



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Química
Coordenação de Graduação



Trabalho de Conclusão de Curso

ANÁLISE DE RISCO HAZOP NUMA PLANTA DE PRODUÇÃO DE ETANOL 2G

Aluno: Raul Soares Aguiar
RA: 157125

Supervisor(a): Rubens Maciel Filho

Campinas – SP
julho de 2020

RESUMO

Existe uma demanda cada vez maior por processos seguros e com baixos riscos na indústria química. Devido a acidentes e tragédias que podem ter um impacto social e econômico de proporções gigantescas. Apenas recentemente, pudemos acompanhar dois vazamentos de petróleo que tiveram consequências gravíssimas. Sendo assim, cada vez mais processos e metodologias de segurança sólidas são necessárias, sendo o HAZOP, Estudos de Perigos e Operabilidade uma das principais na indústria química.

O estudo do HAZOP possui diversos pontos positivos, sendo uma metodologia extremamente sistemática e que envolve estudos multidisciplinares, considera erros humanos e traz diversos pontos de vistas de vários profissionais em seu processo de elaboração. O processo escolhido neste trabalho foi a produção do etanol celulósico, um biocombustível com potencial gigantesco e que tem recebido investimentos consideráveis.

Este trabalho foi dividido em três seções principais, sendo a 1ª seção uma introdução teórica envolvendo diversos temas sobre o HAZOP, como segurança na indústria química, além da introdução, detalhamento e características da técnica. Além disso, também são estudados o cenário atual dos biocombustíveis e do etanol celulósico um pouco mais a fundo.

A segunda seção detalhou um pouco mais a metodologia utilizada, que vai desde o detalhamento do processo e escolha das tecnologias para produção do etanol celulósico até o estudo do HAZOP e elaboração de um fluxograma P&ID para um dos módulos do processo.

Por fim, chegamos a última seção das principais, os resultados obtidos, onde os processos e tecnologias escolhidas são apresentadas e detalhadas, é realizado o estudo de HAZOP para a produção do etanol celulósico e o fluxograma P&ID do nódulo de maior risco do processo considerando os riscos e recomendações feitas no HAZOP.

SUMÁRIO

1. Introdução	5
1.1. Segurança em Indústrias Químicas.....	7
1.2. Introdução à técnica HAZOP	8
1.3. Características do HAZOP	10
1.4. Detalhamento do HAZOP	12
1.5. Cenário atual biocombustíveis.....	18
1.6. Etanol de segunda geração	20
2. Metodologia.....	22
2.1. Estudo da Planta e Processo de Produção do Etanol 2G	22
2.2. Aplicação da Metodologia de Análise de Risco: HAZOP	23
2.3. Análise Crítica e Consequências práticas do HAZOP	24
3. Resultados	25
3.1. Escolha da tecnologia de produção do etanol celulósico	25
3.2. Aplicação do estudo HAZOP	30
3.3. Análise da metodologia e P&ID	33
4. Conclusões	34
5. Referências	35

1. Introdução

Atualmente, é perceptível na indústria química que existe uma demanda muito grande pelo aumento de produção, corte de custos e aumento da qualidade dos produtos, de modo a maximizar os lucros e tornar os processos trabalhados tão eficientes quanto possível. Devido à essas ambições citadas, alguns acidentes de escala considerável ocorreram, como por exemplo o da empresa Pemex® na sua planta em Coatzacoalcos no México em 2016, deixando 24 mortos e liberando diversas substâncias químicas tóxicas no ar (GALLEGO, 2016). Nesse contexto, a segurança de processos e de trabalho tem um papel cada vez mais importante no dia a dia do engenheiro químico e várias outros profissionais. Um modo eficiente e simples de garantir processos e um ambiente de trabalho seguros é a aplicação de técnicas de análise de risco, dentre as quais encontra-se o HAZOP, estudo de perigo e operabilidade. Existem várias outras técnicas, cada qual com sua finalidade, que podem até mesmo ser usadas em conjunto com o intuito de complementar umas às outras.

O Estudo de Perigo e Operabilidade, conhecido como HAZOP, sigla para Hazard and Operability Studies, é uma ferramenta de análise de risco que surgiu inicialmente na década de 60 numa indústria química britânica, com o objetivo de realizar uma análise completa das variáveis de um processo e avaliar como modificações nesses diferentes parâmetros podem afetar cada etapa e equipamentos de cada uma das unidades (NOLAN, 1994). O método HAZOP, não é aplicado numa planta que ainda não está em operação. A metodologia HAZOP, além de atuar na parte de segurança do processo, diminuindo o risco de acidentes e perigo aos trabalhadores, também é útil na questão de melhoria de processos já que também avalia como cada uma das variáveis estudadas afetam os produtos intermediários e finais, além da eficiência do processo como um todo.

Subsistema:		Documento:	XXX	Data:	
Nº:					
<i>Desvios</i>	<i>Causas</i>	<i>Consequências</i>	<i>Deteção (D) / Salvaguardas (S)</i>	<i>Recomendações / Observações</i>	<i>Cenários</i>

Figura 1 – Modelo de planilha para o Estudo de Perigo e Operabilidade (HAZOP) (SELLA,

2014).

Um dos maiores fatores responsáveis pelo sucesso da aplicação dessa metodologia é que além de possuir simples execução, usando palavras chaves é possível mapear todas as variáveis do processo, também avalia o processo detalhadamente e todas suas linhas de serviço (água, vapor, gases, etc.) e possíveis ramificações. A equipe responsável pela elaboração do relatório HAZOP deve ser formada por membros experientes e que tenham amplo conhecimento do processo, para que possuam autonomia para dar sugestões de melhorias com base em dados e fatores relevantes.

Atualmente, existe uma grande demanda energética por novos combustíveis e fontes de energia que sejam menos prejudiciais ao meio ambiente e ao mesmo tempo economicamente viáveis. Um dos biocombustíveis mais utilizados atualmente é o etanol, cujo Brasil é o segundo maior produtor do mundo, atrás apenas dos Estados Unidos. Uma das promessas para o futuro é o etanol de segunda geração que utiliza como matéria prima o bagaço da cana de açúcar e a palha como matéria prima. Existem diversos benefícios na utilização da cana de açúcar, dentre eles estão: um maior aproveitamento da cana e seus subprodutos, aumento em até 50% a produção de etanol, segundo informações da Raizen®, numa mesma área de cultivo, além da diminuição da emissão de carbono durante o processo de produção de etanol como um todo. Espera-se que no ano de 2025, a produção do etanol celulósico (2G) já seja viável economicamente, com o custo de produção caindo de 1,50 R\$ para 0,75 R\$ por litro (MILANEZ, 2015), o que torna esse produto uma grande promessa e ótima oportunidade de estudo.

O principal objetivo deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) é realizar o estudo e aplicação de uma das técnicas de análise de risco mais utilizadas atualmente, o HAZOP, Estudo de Perigo e Operabilidade. Além de aplicar o método para o processo de produção do etanol de segunda geração, será realizada uma série de sugestões de melhoria para o processo de modo a garantir maior segurança e eficiência. Outro objetivo é o estudo do processo de produção do etanol celulósico, ou de segunda geração, poder entender as tecnologias atuais e o processo industrial aplicável, para depois realizar as respectivas análises de risco e propor melhorias para o processo. Para garantir a eficácia do HAZOP, serão realizadas avaliações de frequência, severidade e categoria de risco, tanto no início das análises quanto após sua aplicação.

1.1. Segurança em Indústrias Químicas

No ano de 1987, Robert M. Solow, um economista do MIT (Instituto de Tecnologia de Massachusetts) recebeu o prêmio Nobel de economia pelo seu trabalho em determinar as fontes e causas do crescimento econômico, no qual ele concluiu que a base do crescimento de uma economia seria resultados de avanços tecnológicos (Crowl et al., 2011). É bem razoável correlacionar o crescimento de uma determinada indústria é altamente dependente de seus avanços tecnológicos, especialmente as indústrias químicas, que está numa era de desenvolvimento de processos cada vez mais complexos: trazendo maiores pressões e temperaturas, substâncias mais reativas etc.

Com processos mais complexos e muitas vezes perigosos também surge a necessidade de tecnologias de segurança mais avançadas. Muitos industrialistas acreditam até que o desenvolvimento e aplicação de tecnologias de segurança chegam a restringir o crescimento da indústria química (Crowl et al., 2011).

Desde 1950, avanços tecnológicos significantes têm sido feitos na área de segurança de processos químicos. Hoje em dia, a segurança é tão importante quanto a produção em si, sendo que se tornou até uma disciplina de cunho complexo e altamente técnico que inclui muitas teorias. Algumas tecnologias importantes são: modelos de dispersão de vapor tóxico e técnicas de matemática para determinar as várias possíveis falhas em um processo e sua probabilidade. Recentes avanços na segurança de plantas químicas enfatizam o uso de ferramentas tecnológicas apropriadas para prover informações que suportem tomadas de decisão adequada em relação ao design e operação da planta (Crowl et al., 2011).

Termos muito utilizados quando se discute o tema abordado são: segurança ou prevenção de perdas, perigo e risco. “Segurança ou prevenção de perdas”, está relacionado a prevenção de acidentes através do uso de ferramentas tecnológicas para a identificação dos perigos de uma planta química e os eliminar antes que ocorram acidentes. “Perigo” é uma condição química ou física que possui o potencial de causar danos a pessoas, propriedades ou meio-ambiente. “Risco” é uma medida de dano humano, ambiental ou perda econômica em termos da probabilidade e magnitude dos danos ou perdas (Marcel, 1995).

As plantas químicas contêm uma larga variedade de perigos. Primeiramente, os usuais perigos mecânicos que causam lesões aos trabalhadores através de quedas,

tropeços ou movimentação de equipamentos. Além disso, existem todos os perigos químicos, que incluem o risco de explosão, reações inesperadas e contaminação.

Um programa de segurança adequado possui seis ingredientes principais, os quais são: sistema, atitude, fundamentação, experiência, tempo e pessoas. Primeiro, o programa precisa de um sistema que grave tudo o que necessita ser feito para que se tenha um programa de segurança de excelência, que faça o que é necessário e grave quando as tarefas requeridas foram feitas. Segundo ponto, os participantes precisam ter uma atitude positiva, incluindo a disposição para tarefas que pareçam “chatas”, mas importantes. Terceiro, os participantes devem entender e usar os fundamentos em segurança de processos químicos no desenvolvimento, construção e operação das plantas. Quarto, todos devem aprender com experiências e histórico para evitar repetir erros, em casos históricos e/ou dentro da própria organização, o que inclui conversas com pessoas de dentro ou fora da sua empresa. Quinto, todos devem reconhecer que tornar um processo seguro leva tempo, no qual é necessário estudar, trabalhar, anotar resultados para o histórico, compartilhar experiências e treinamentos. Sexto, todos devem entender que o programa necessita de comprometimento de todos os níveis dentro da organização. A segurança deve ser vista tendo a mesma importância da produção (Crowl et al., 2011).

O modo mais simples de implementar um programa de segurança adequado é torná-lo responsabilidade de todos dentro de um processo químico. O conceito de deixar poucos funcionários responsáveis pela segurança é inadequado dentro dos padrões atuais, onde todos devem ter a responsabilidade de conhecer sobre segurança e práticas recomendadas (Marcel, 1995).

Também é muito importante reconhecer a diferença entre um programa de segurança bom e um excelente (Marcel, 1995). Um bom programa de segurança identifica e elimina perigos à segurança existente, enquanto o de excelência possui sistemas de gestão que previnem a existência desses perigos, ou seja, previne a própria existência do perigo. Esses sistemas de gestão geralmente incluem revisões de segurança, auditorias, técnicas de identificação de perigos, checklists e a aplicação apropriada de conhecimentos técnicos (Crowl et al., 2011).

1.2. Introdução à técnica HAZOP

O HAZOP, *Hazard and Operability Study*, em português Estudo de Perigos e Operabilidade, é um método de estudo desenvolvido pelo ICI (Imperial Chemical Industries)

nos anos 60 e publicado pela Associação das Indústrias Químicas (CIA) em 1977. Desde então, se tornou uma das técnicas mais usadas durante o desenvolvimento de novos processos e operações. Além de identificar potenciais perigos à segurança, saúde e meio ambiente, o estudo do HAZOP também é capaz de identificar possíveis problemas operacionais, sendo aplicado de várias formas diferentes nas indústrias de processo. Apesar de ser tradicionalmente utilizado em novas instalações, também é aplicado a instalações “antigas” ou novas modificações. Pode ser aplicado até mesmo à documentação de processos, plantas piloto e operações perigosas em laboratório, além de tarefas como comissionamento e descomissionamento, operações de emergência e investigação de incidentes. Por outro lado, outros métodos também devem ser considerados dependendo da complexidade dos perigos da instalação de estudo. (Crawler *et al.*, 2015).

O HAZOP é uma análise estruturada de um sistema, processo ou operação para o qual estão disponíveis informações detalhadas sobre o projeto, realizadas por uma equipe multidisciplinar. A equipe procede ao exame linha a linha ou estágio a estágio de um projeto, sendo que todos os processos e operações são avaliados. Apesar de ser um estudo, sistemático e rigoroso, também é aberto e criativo ao mesmo tempo. Isso se deve pelo uso de um conjunto de palavras-guias em combinação com parâmetros do sistema, de forma a buscar desvios significativos no planejamento e desenho do projeto. Um desvio significativo é aquele fisicamente possível como não haver fluxo, alta pressão ou reação reversa. O foco da equipe devem ser os desvios que poderiam levar a riscos potenciais à segurança, saúde, meio ambiente ou uma combinação destes. O risco também pode ser expresso como uma combinação de frequência e severidade, conforme a Figura 1 abaixo (Crawler *et al.*, 2015).

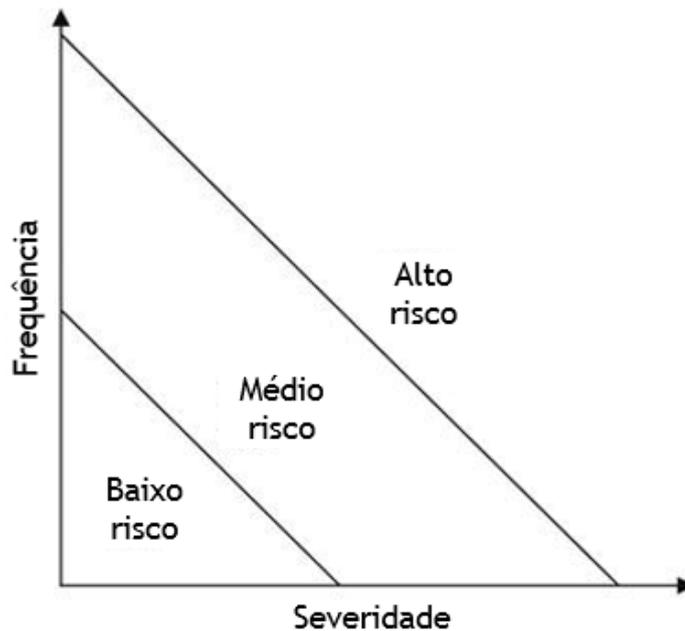


Figura 2: Gráfico de risco ilustrativo - adaptado (Crawler *et al.*, 2015)

Além da identificação de perigos, é uma prática comum que a equipe responsável também busque possíveis problemas operacionais, relacionados à segurança, fatores humanos, qualidade, perda financeira ou problemas no design do processo. Uma vez que as causas de um desvio são encontradas, a equipe responsável avalia as possíveis consequências usando sua experiência e julgamento. Se as medidas e equipamentos de segurança existentes forem consideradas inadequados, a equipe recomenda uma ação de mudança ou solicita uma investigação mais aprofundada do problema. As consequências e ações relacionadas devem ser classificadas de acordo com seu respectivo risco. A análise é registrada e apresentada na forma de um relatório escrito que é usado na implementação das ações (De Cicco *et al.*, 2003).

1.3. Características do HAZOP

O HAZOP é um exame estruturado e sistemático de um processo ou operação, em fase de planejamento ou em funcionamento. No início do estudo, a equipe responsável cria uma representação esquemática do objeto de estudo. Esta etapa utiliza todo o material relevante disponível, como o design detalhado do processo, resumo dos procedimentos operacionais, planilhas de dados e relatórios de estudos de risco anteriores. Os riscos e possíveis problemas operacionais são procurados considerando possíveis desvios em relação a intenção e objetivo da seção avaliada no projeto. Para os desvios em que a equipe pode sugerir uma causa, as consequências são estimadas usando a experiência da equipe

e os equipamentos e procedimentos de segurança existentes são levadas em consideração. Onde a equipe considera o risco não trivial ou quando um aspecto requer investigação adicional, um registro formal é gerado para permitir que o problema seja acompanhado fora da reunião. A equipe então segue com as análises pertinentes a serem realizadas (Dekkar, 1995).

A validade da análise depende muito de ter as pessoas certas na equipe, a precisão das informações utilizadas e a qualidade do projeto. Normalmente, supõe-se que o projeto tenha sido realizado de maneira competente, para que as sugestões dadas sejam seguras. Mesmo que todo o projeto seja feito de forma excelente, as etapas posteriores do projeto também devem ser executadas corretamente - ou seja, os padrões de qualidade para engenharia devem ser seguidos na construção, comissionamento, operação, manutenção e gerenciamento. Um bom estudo do HAZOP tenta levar em consideração esses aspectos e as mudanças que são esperadas durante a vida útil da operação. Às vezes, um estudo identifica problemas que estão dentro das limitações do projeto, bem como problemas que se desenvolvem à medida que a planta envelhece ou causados por erro humano (Dekkar, 1995).

Um dos objetivos do HAZOP é identificar e avaliar quaisquer riscos remanescentes em um processo ou operação planejada, que não foram identificados ou projetados em etapas anteriores. Os riscos podem ser de vários tipos, incluindo aqueles para pessoas e propriedades, dentro e fora do local da planta de produção. Também é muito importante que potenciais efeitos potenciais para o meio ambiente sejam levados em conta. Independentemente do tipo de risco, muitos deles podem ter consequências financeiras graves além de outros tipos de perda (Crawler et al., 2015).

Os estudos de HAZOP normalmente também são usados para identificar problemas operacionais ou de qualidade no processo que sejam significativos, o que também é incluído como um objetivo definido do estudo. Os problemas de operacionalidade surgem através da confiabilidade e do modo de operação da planta, com consequências como tempo de inatividade, equipamentos danificados e despesas com produtos perdidos, estragados ou fora da especificação, levando a custos extras com a produção e descarte. A necessidade de considerar questões de qualidade varia muito com os detalhes da operação, mas em alguns setores é uma área crucial. Muitos problemas operacionais também trazem diversos perigos, dando ainda mais motivos para identificá-los e controlá-los de maneira adequada. O HAZOP também pode considerar possíveis variáveis de qualidade na proposta de projeto (Crawler et al., 2015).

Também é aconselhável abranger aspectos das operações de manutenção, incluindo isolamento, preparação e remoção para manutenção, uma vez que isso geralmente cria perigos entre outras questões. Onde haver operações ou atividades manuais, pode ser necessário analisar a ergonomia de toda a operação ou atividade de forma detalhada (Dekkar, 1995).

Algumas dificuldades podem ser causadas pela má definição do escopo do estudo, sendo que a intenção do estudo não é tornar-se uma reunião de redesenho do projeto. No entanto, algumas ações podem resultar em alterações no projeto original ao encontrar problemas em potencial dentro do intervalo de operação avaliado. A análise de problemas dentro do HAZOP é normalmente qualitativa, embora cada vez mais uma simples avaliação de risco seja usada para ajudar a equipe a decidir sobre a necessidade de ação e a própria ação a ser tomada. Alguns dos problemas podem precisar de uma análise quantitativa mais completa, incluindo uma avaliação quantitativa de riscos (QRA), que deve ser realizada fora da reunião do HAZOP (Crawler et al., 2015).

O HAZOP está longe de ser um método infalível para identificar todos os possíveis perigos ou problemas operacionais que possam surgir durante o funcionamento da planta. Sendo que o conhecimento e a experiência dentro da equipe são cruciais para a qualidade e a integridade de um estudo. A precisão e extensão das informações disponíveis para a equipe, o escopo do estudo e a maneira com que é feito influenciam muito em seu sucesso. Somente um exame sistemático, criativo e imaginativo pode gerar um relatório de alta qualidade, mas até dessa forma, nem todos os problemas em potencial serão necessariamente encontrados (Dekkar, 1995). Além disso, o HAZOP realizado só será eficaz se os problemas identificados durante o estudo forem resolvidos e colocados em prática.

1.4. Detalhamento do HAZOP

O estudo do HAZOP deve ser feito de forma sistemática e cuidadosamente planejada para abranger todos os aspectos do processo ou operação a ser avaliado. É normal cobrir uma operação contínua dividindo-a em seções e trabalhando a partir de um ponto inicial. Um processo em batelada ou um procedimento é dividido em etapas sequenciais e estas são cumpridas em uma ordem cronológica. Segundo os passos apresentados na Figura 2.

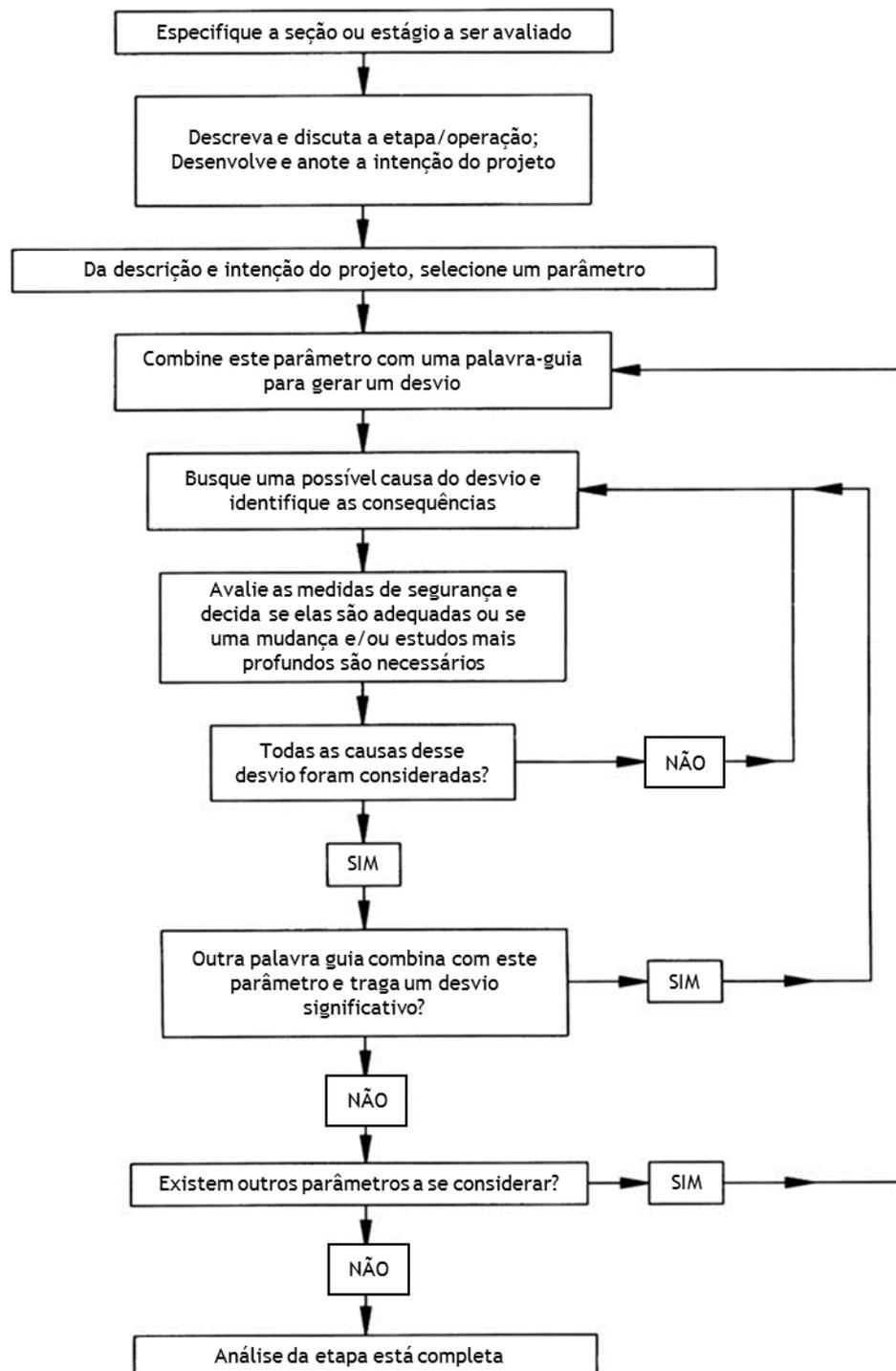


Figura 3: Fluxograma para o estudo do HAZOP numa etapa ou seção de uma operação - adaptado (Crawler *et al.*, 2015)

É essencial que a equipe comece com um entendimento completo da seção ou estágio a ser estudado no HAZOP, de forma a possuir informações suficientes para formar um modelo conceitual adequado. Uma descrição completa deve ser desenvolvida, incluindo todos os parâmetros principais, e o relatório HAZOP deve incluir a descrição do projeto. Em seguida, uma intenção de projeto para a etapa é formulada e registrada, o que deve incluir

uma declaração do intervalo operacional adequado para que a equipe possa reconhecer qualquer situação fora desse intervalo como desvio (Crawler et al., 2015). A intenção do projeto pode ser interligada com as descrições das etapas e, portanto, aos parâmetros de projeto dos equipamentos.

O próximo passo é gerar um desvio significativo e que faça sentido. Um desvio pode ser gerado através de um parâmetro combinando com uma palavra-guia, deve-se então verificar se é gerado um desvio significativo. Como o objetivo das palavras-guia e parâmetros é auxiliar na equipe na busca criativa e completa de desvios significativos, é importante selecionar um conjunto que funcione bem para o problema estudado. Algumas empresas desenvolveram seu próprio conjunto de palavras-guia, no caso em que se trabalha com tecnologias específicas (Crawler et al., 2015). Uma lista de parâmetros, palavras guias e desvios é apresentado na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1: Lista de desvios de acordo com os parâmetros do processo (Crawler et al., 2015)

Parâmetro	Palavra-guia	Desvios
Fluxo	Nenhum	Nenhum fluxo
	Menos	Menos fluxo
	Mais	Mais fluxo
	Também	Contaminação
	Reverso	Fluxo reverso
Pressão	Menos	Pressão baixa
	Mais	Pressão alta
Temperatura	Menos	Temperatura baixa
	Mais	Temperatura alta
Nível	Menos	Nível baixo
	Mais	Nível alto

Depois que um desvio significativo é identificado, a equipe deve procurar por uma causa, há menos que as consequências daquele desvio sejam irrelevantes, nesse caso, não se deve buscar por uma causa (Crawler et al., 2015). Se é provável que o desvio possua várias causas, é muito útil ter uma sessão curta de brainstorming para identificar o maior número destas, lembrando que as causas também podem estar relacionadas tanto a fatores humanos quanto a falhas técnicas. Durante a busca por causas é essencial que todos os membros da equipe adotem uma atitude positiva e crítica, mas não defensiva,

especialmente para membros responsáveis pelo projeto. Pode ser útil criar e usar um banco de dados de causas frequentes para garantir que nenhuma causa comum seja ignorada. Se isso for feito, no entanto, não deve ser permitido afetar a criatividade da equipe ou tornar-se a principal fonte das causas a serem avaliadas.

É importante que as causas sejam minuciosamente descritas, pois causas semelhantes podem ter consequências distintas, caso em que é necessário distinguir e tratar cada causa separadamente. Por exemplo, a falha de uma bomba devido a uma causa mecânica pode causar perda de contenção e fluxo, enquanto a falha na bomba devido a uma causa elétrica pode simplesmente levar à perda de fluxo. Embora seja possível agrupar causas, isso deve ser feito apenas quando a equipe tiver certeza de que as consequências são idênticas para todas as causas. Por fim, antes que a discussão de um desvio específico seja concluída, a equipe deve considerar as possíveis causas sugeridas.

As consequências de cada causa devem ser analisadas cuidadosamente para verificar se elas trazem algum desvio que afete o processo e o faça sair da faixa de operação ideal. É essencial identificar completamente todas as consequências, imediatas e atrasadas, dentro e fora da seção em análise. Muitas vezes, isso ajuda a analisar como as consequências se desenvolvem ou aumentam ao longo de um período de tempo, de forma a avaliar quando os alarmes e travas são ativadas, além do momento em que os operadores serão alertados. Isso permite um julgamento realista sobre a probabilidade e influência da intervenção do operador (Crawler et al., 2015; Dekkar, 1995).

No escopo original do HAZOP, pouca ou nenhuma avaliação de risco era realizada, o que vem mudando e ocorre com o objetivo de identificar perigos e problemas de operacionais. Pode ser muito demorado fazer uma avaliação de risco para cada problema do processo, porém se a equipe tiver uma matriz de risco familiar e bem construída, apropriada para seu processo de estudo em particular, ela se tornará eficiente na atribuição de categorias de frequência e severidade. As estimativas de frequência e severidade são normalmente qualitativas, normalmente em faixas de ordem de magnitude da probabilidade e impacto causados segundo as tabelas 2 e 3 abaixo:

Tabela 2: Categorias de frequência – adaptado (Sella, 2014)

Frequência	Descrição
Extremamente remota (A)	Teoricamente possível, porém sem casos reais como referência
Remota (B)	Muito inesperado, porém existem casos em plantas similares
Possível (C)	Possível que ocorra pelo uma vez durante a vida útil de um conjunto de plantas similares
Provável (D)	Possível que ocorra pelo uma vez durante a vida útil da planta
Frequente (E)	Possível que ocorra pelo várias vezes durante a vida útil da planta

Tabela 3: Categorias de severidade– adaptado (Sella, 2014)

Frequência	Descrição
Catastrófica (V)	Diversas fatalidades dentro da planta ou fatalidades externas Equipamentos são tão afetados a ponto de perda da planta industrial Danos que se estendem para locais externos ao complexo industrial
Crítica (III)	Acidentes ou lesões graves, fatalidades intramuro Equipamentos são afetados de forma significativa
Marginal (II)	Acidentes ou lesões leves Equipamentos são levemente danificados
Desprezível (I)	Sem acidentes ou lesões Equipamentos são afetados de forma que não afete a continuidade do processo

O risco que será dado para determinado desvio será diretamente ligado a severidade e frequência da causa e consequência relacionada. O risco pode ser classificado em um número de 1 a 5, sendo que os classificados como 1 são toleráveis e não possuem a necessidade de medidas de controle e segurança adicionais. Aqueles classificados com 2 e 3 são moderados, ou seja, necessitam de controles adicionais para redução do risco da etapa do processo se praticáveis. Já os riscos classificados com 4 e 5 são intoleráveis, estes não possuem controles e medidas de segurança suficientes, e até medidas de segurança alternativas devem ser consideradas para evitar maiores problemas e tragédias. Segue abaixo uma matriz de classificação de risco (Figura 3) e sua respectiva legenda (Figura 4), que correlacionam frequência, severidade e risco, além de classificá-los.

		FREQUÊNCIA				
		A	B	C	D	E
SEVERIDADE	IV	2	3	4	5	5
	III	1	2	3	4	5
	II	1	1	2	3	4
	I	1	1	1	2	3

Figura 4: Matriz de classificação de risco – frequência x severidade (Cesaro, 2013)

Severidade		Frequência		Risco	
I	Desprezível	A	Extremamente Remota	1	Desprezível
II	Marginal	B	Remota	2	Menor
III	Crítica	C	Improvável	3	Moderado
IV	catastrófica	D	Provável	4	Sério
		E	Frequente	5	Crítico

Figura 5: Legenda da matriz de classificação de risco – frequência x severidade (Cesaro, 2013)

1.5. Cenário atual biocombustíveis

Os biocombustíveis são muito antigos, sendo inclusive mais velhos que os carros, porém não possuem preço competitivos comparados a gasolina e o diesel, ficando assim, à margem. Picos no preço do petróleo, e agora os esforços globais para mitigar os efeitos do aquecimento global e desacelerar as mudanças climáticas, aumentaram a urgência e necessidade à busca por combustíveis limpos e renováveis.

Viagens rodoviárias, voos e entregas são responsáveis por quase um quarto das emissões mundiais de gases responsáveis pelo efeito estufa, sendo que o transporte no geral permanece fortemente dependente de combustíveis fósseis para funcionar de forma adequada (Nunes, 2019). O objetivo por trás dos biocombustíveis é substituir os combustíveis fósseis tradicionais por aqueles feitos de material vegetal ou outros tipos de matéria-prima renováveis.

Mas o conceito de usar terras agrícolas para produzir combustível em vez de alimentos traz seus próprios desafios, e as soluções que dependem de resíduos, como o bagaço de cana, ou de outras matérias-primas, ainda não foram capazes de competir em preço e escala com os combustíveis fósseis convencionais. A produção global de biocombustíveis precisa triplicar até 2030, a fim de cumprir as metas da Agência Internacional de Energia para um crescimento global sustentável (Nunes, 2019).

Existem várias maneiras de produzir biocombustíveis, mas geralmente usam reações químicas, fermentação e calor para quebrar amidos, açúcares e outras moléculas nas plantas. Os produtos resultantes são refinados para produzir um combustível que carros e outros veículos possam usar. Grande parte da gasolina brasileira contém um dos biocombustíveis mais comuns em sua mistura para a venda: o etanol. Feito pela fermentação dos açúcares de plantas como milho e cana-de-açúcar, o etanol contém oxigênio que ajuda o motor do carro a queimar combustível com mais eficiência, reduzindo a poluição atmosférica. Nos EUA, onde a maior parte do etanol é derivada do milho, o combustível é tipicamente 90% da gasolina e 10% do etanol, já no Brasil - o segundo maior produtor de etanol do mundo, atrás apenas dos EUA - o combustível contém até 27% de etanol, sendo a cana-de-açúcar a principal matéria-prima (Nunes, 2019).

Alternativas ao combustível diesel incluem biodiesel e diesel renovável. O biodiesel, derivado de gorduras como óleo vegetal, gordura animal e graxa de cozinha reciclada, pode

ser misturado com o diesel à base de petróleo. Alguns ônibus, caminhões e veículos militares usam combustíveis com até 20% de biodiesel, porém o biodiesel puro pode ter sua eficácia comprometida pelo clima frio e até causar problemas em veículos mais antigos (Nunes, 2019). O diesel renovável, por outro lado, é um produto quimicamente diferente que pode ser derivado de gorduras ou dejetos à base de plantas, além disso não precisa ser misturado ao diesel convencional como o biodiesel.

Outros tipos de combustível a base vegetal foram criados para aviação e transporte. Mais de 150.000 voos anualmente utilizaram biocombustível, porém essa quantidade representou menos de 0,1% do consumo total de combustível na aviação (Nunes, 2019). No transporte marítimo, também, a adoção de biocombustível está em níveis muito abaixo das metas estabelecidas para 2030 pela Agência Internacional de Energia.

Outro combustível que potencialmente poderia ser usado não apenas para transporte, mas também para geração de calor e eletricidade, é o gás natural renovável, ou biometano. Este gás pode ser capturado em aterros, operações de gado, águas residuais ou outras fontes. Após capturado deve então ser refinado ainda mais para remover água, dióxido de carbono e outros elementos contaminantes, de modo a atender ao padrão necessário para abastecer veículos movidos a gás natural (Nunes, 2019).

Uma vasta variedade de materiais e matérias-primas, pode ser usada para produzir biocombustíveis. Embora o milho e a cana-de-açúcar sejam matérias-primas muito bem estabelecidas devido ao etanol, o processo de cultivo, produção de fertilizantes e pesticidas, além do processamento de planta em combustível consome muita energia - tanta energia que há um debate sobre se o etanol de milho realmente fornece benefícios ambientais o suficiente para que o investimento valha a pena.

Assim, cientistas e startups estão explorando outros materiais que têm o potencial de servir como combustível sem as preocupações que acompanham o suprimento de alimentos e o impacto ambiental. O etanol celulósico, por exemplo, usa palha de milho, resíduos de madeira ou outro material vegetal que não seria usado de outra forma, apenas descartado ou para queima e geração de energia. Outras matérias-primas potenciais para biocombustíveis incluem gramíneas, algas, resíduos de animais, graxa de cozinha e lodo de águas residuais, sendo que pesquisas estão encontrando cada vez mais maneiras eficientes e econômicas de transformá-las em combustíveis que possam ser utilizados na prática (Nunes, 2019).

1.6. Etanol de segunda geração

O etanol celulósico, é um biocombustível de segunda geração fabricado pela conversão de vegetação inadequada para o consumo humano em etanol. Enquanto os biocombustíveis de primeira geração usam matéria-prima que muitas vezes é comestível, como milho por exemplo, o etanol celulósico, por sua vez, pode ser produzido usando matérias-primas que são pouco aproveitadas, como madeira, grama ou partes de plantas não comestíveis. Todos os biocombustíveis são renováveis, mas o etanol celulósico tem um impacto menor na cadeia alimentar do que os biocombustíveis de primeira geração, porque podem ser produzidos a partir de resíduos agrícolas ou de culturas energéticas cultivadas em terras que são bem pouco úteis para a produção de alimentos (Denault, 2014). No entanto, a taxa de conversão de matérias-primas em produto é menor para o etanol celulósico do que para os biocombustíveis de primeira geração e, sem melhorias na tecnologia de fabricação, o futuro do etanol celulósico pode se tornar mais um aditivo de combustível ao invés de um substituto real do petróleo.

O uso de matéria-prima regular como componente principal dos biocombustíveis de primeira geração desencadeou o debate "alimentos versus combustível", que questionou o real valor dos biocombustíveis de primeira geração como uma alternativa ambientalmente amigável ao petróleo. Acreditava-se que ao desviar terras aráveis e matéria-prima da cadeia alimentar humana, a produção de biocombustíveis teria um impacto direto no preço de alimentos para os consumidores. Os críticos dos biocombustíveis alegaram que, à medida que a demanda por matérias-primas aumentasse, os agricultores venderiam suas colheitas a fabricantes de biocombustíveis mais bem pagos, em vez de seus compradores tradicionais, criando escassez de alimentos e aumentos rápidos de preços. Embora tenha havido de fato aumentos globais nos preços e escassez de alimentos desde a introdução dos biocombustíveis de primeira geração, especialmente em 2007 e 2008, os apoiadores afirmam que este aumento pode ser atribuído ao aumento dos custos de petróleo e não à produção de biocombustíveis (Denault, 2014). Durante esse debate, o etanol celulósico surgiu em 2006 como uma alternativa ao etanol de primeira geração, porque poderia usar plantas de resíduos e que não tem propósito alimentar, geralmente cultivadas em terras de qualidade inferior. Muitas das culturas que podem servir para a produção do etanol celulósico também exigem menos fertilizante do que as culturas alimentares usadas no etanol de primeira geração.

O etanol celulósico continua a ter muito apoio político e é bem visto em muitas partes do mundo, incluindo Estados Unidos, Brasil e União Europeia, sendo apresentado como uma possível solução para a independência energética, assim como um método para reutilizar alguns resíduos. Os biocombustíveis são uma fonte de energia fortemente subsidiada no mundo todo e provavelmente seriam incapazes de competir no mercado atual sem a subvenção do governo. Embora seja possível que um dia os custos de produção de etanol celulósico sejam inferiores aos custos de produção do petróleo, tal mudança exigiria um aumento acentuado nos preços dos combustíveis fósseis, tanto quanto menores custos de produção do etanol celulósico.

2. Metodologia

2.1. *Estudo da Planta e Processo de Produção do Etanol 2G*

Na primeira etapa do Trabalho de Conclusão de Curso, foi realizado um estudo da tecnologia da produção de etanol de segunda geração. O principal objetivo desta fase é realizar um detalhamento do processo como um todo, em relação aos equipamentos, peculiaridades e principais tecnologias já desenvolvidas. Ao final da etapa, espera-se ter o processo separado em nódulos (partes) para que seja possível fragmentá-lo e realizar a aplicação da técnica de análise de risco. Grande parte dos dados em relação a planta e processo de produção do etanol foram retirados do livro *Technical and Economical Feasibility of Production of Ethanol from Sugar Cane and Sugar Cane Bagasse* (DELFT, 2005).

O objetivo possui uma descrição detalhada de todas as etapas do processo, assim como sua respectiva instrumentação e equipamentos usados antes e após o estudo do HAZOP. O processo de produção do etanol foi dividido em 3 grandes módulos: pré-tratamento, hidrólise e, fermentação e purificação, além destes também foi estudado um módulo do processo de cogeração, que é essencial para a geração de energia da planta.

O primeiro passo estudado foi o pré-tratamento do bagaço. A degradação dos materiais lignocelulósicos requer duas etapas; o primeiro passo é o pré-tratamento para a solubilização da hemicelulose e liberação da lignina e o segundo passo é a hidrólise de celulose. O objetivo do pré-tratamento é remover lignina e hemicelulose, reduzir a cristalinidade da celulose, e aumentar a porosidade e a área de contato dos materiais para permitir que as enzimas celulase tenham acesso a as moléculas de celulose (Sun e Cheng, 2002). Durante o pré-tratamento do material a fração composta de hemicelulose também é hidrolisada. Os monômeros de hemicelulose são uma mistura de açúcares do tipo hexose e pentose. Existem vários métodos diferentes propostos por pesquisadores e empresas de engenharia. Tratamentos físicos, físico-químicos, químicos e biológicos têm sido propostos para o pré-tratamento de materiais lignocelulósicos. Algumas alternativas para o pré-tratamento avaliadas foram o tratamento mecânico, explosão a vapor etc. Na hidrólise foram avaliadas alternativas de hidrólise ácida e alcalina.

Para a fermentação dos açúcares C₅ e C₆, foram avaliadas diversas alternativas também. Sendo que o principal ponto chave seria se a pentose e hexose seria fermentada no mesmo reator com um GMO (organismo geneticamente modificado) ou em processos

de fermentação separados com diferentes microorganismos. Alguns microorganismos avaliados foram a *Escherichia coli*, *Candida shehatae* e *Saccharomyces cerevisiae*.

2.2. Aplicação da Metodologia de Análise de Risco: HAZOP

Esta será a etapa foi a mais importante do projeto, onde após o estudo do processo, descrição e separação em nódulos será realizado o estudo e aplicação das metodologias de análise de risco. Nesta fase foram avaliados todos os riscos presentes, suas possíveis causas e consequências, além de medidas preventivas e melhorias nos equipamentos, processos e capacitação dos operadores. Todo o procedimento seguido foi de acordo com as normas para o Estudo de Perigo e Operabilidade (HAZOP), porém com as limitações do projeto, como conhecimento técnico e sobre o processo, além do estudo ser realizado de forma individual. Também foram realizadas sugestões em relação à instrumentação da planta após o estudo do HAZOP, de modo a manter o equilíbrio entre custo e segurança no processo. De modo a garantir a eficácia de todas as medidas e alterações propostas pelo HAZOP, além da metodologia como um todo, a frequência, severidade e categoria de risco também avaliadas após as recomendações decorrentes da aplicação das técnicas.

Primeiramente foi realizado o modelo de preenchimento do HAZOP, segundo a Figura 6, seguindo os pontos descritos a seguir. Após o modelo estar pronto, foram selecionados os nódulos do processo que seriam estudados no HAZOP, com foco naqueles com maior risco para o sucesso do processo produtivo e operadores. Segundo, os desvios, causas e consequências a seres avaliados foram selecionados. Terceiro, foram preenchidas as consequências de cada causa e desvio, e sua respectiva avaliação de frequência, severidade e risco. Por último, foram sugeridas ações para mitigar ou eliminar estes riscos, além de uma análise posterior de frequência, severidade e risco para garantir a eficiência da aplicação do HAZOP.

Relatório HazOp						Frequência, Severidade e Risco			Data: 01/06/2020 Área: Process Safety Folha: 1 Fluxograma: 1		Frequência, Severidade e Risco após implementação das ações requeridas		
Parâmetro	Palavra-chave	Desvio	Nódulos	Causa	Consequências	Frequência	Severidade	Risco	Nº	Ações Requeridas	Frequência	Severidade	Risco

Figura 6: Modelo de HAZOP e estudo de análise de risco utilizado

2.3. *Análise Crítica e Consequências práticas do HAZOP*

Para a etapa final do projeto, foi realizada uma análise detalhada das principais vantagens e desvantagens da técnica de análise de risco HAZOP, no caso do processo de produção do etanol 2G e para engenharia de processos como um todo. Após esse estudo do método, foram avaliadas as possíveis vantagens que este método possa gerar quando bem utilizado, novamente, tanto para o caso específico estudado quanto para processos químicos no geral. Além disso foi realizada a instrumentação (P&ID) de um dos nódulos do processo pós-estudo do HAZOP, o mais crítico, para apresentar os resultados que o estudo pode ter no desenho e segurança de um projeto.

3. Resultados

Foi realizado a escolha da tecnologia de produção do etanol celulósico, estudo do HAZOP e P&ID de um dos nódulos de escolha, nas seções 3.1, 3.2 e 3.3, respectivamente.

3.1. Escolha da tecnologia de produção do etanol celulósico

Nesse cenário, são utilizadas duas caldeiras (43 e 68 bar), a moenda mecânica, uma turbina de contrapressão (43/2,5 bar) e uma turbina de condensação (68/22,5 bar). O vapor necessário para o funcionamento da moenda é proveniente da caldeira de 68 bar e passa pela turbina de condensação. O restante do vapor a 2,5 bar necessário para o processo é produzido pela passagem de vapor a 43 bar proveniente da caldeira de 43 bar pela turbina de contrapressão (Figura 3.6). Para esta configuração, a potência gerada pela turbina de condensação é de 175,45 MW e a gerada pela turbina de contrapressão é de 23,24 MW, com 189,18 MW vendidos para o grid. Não há venda de bagaço.

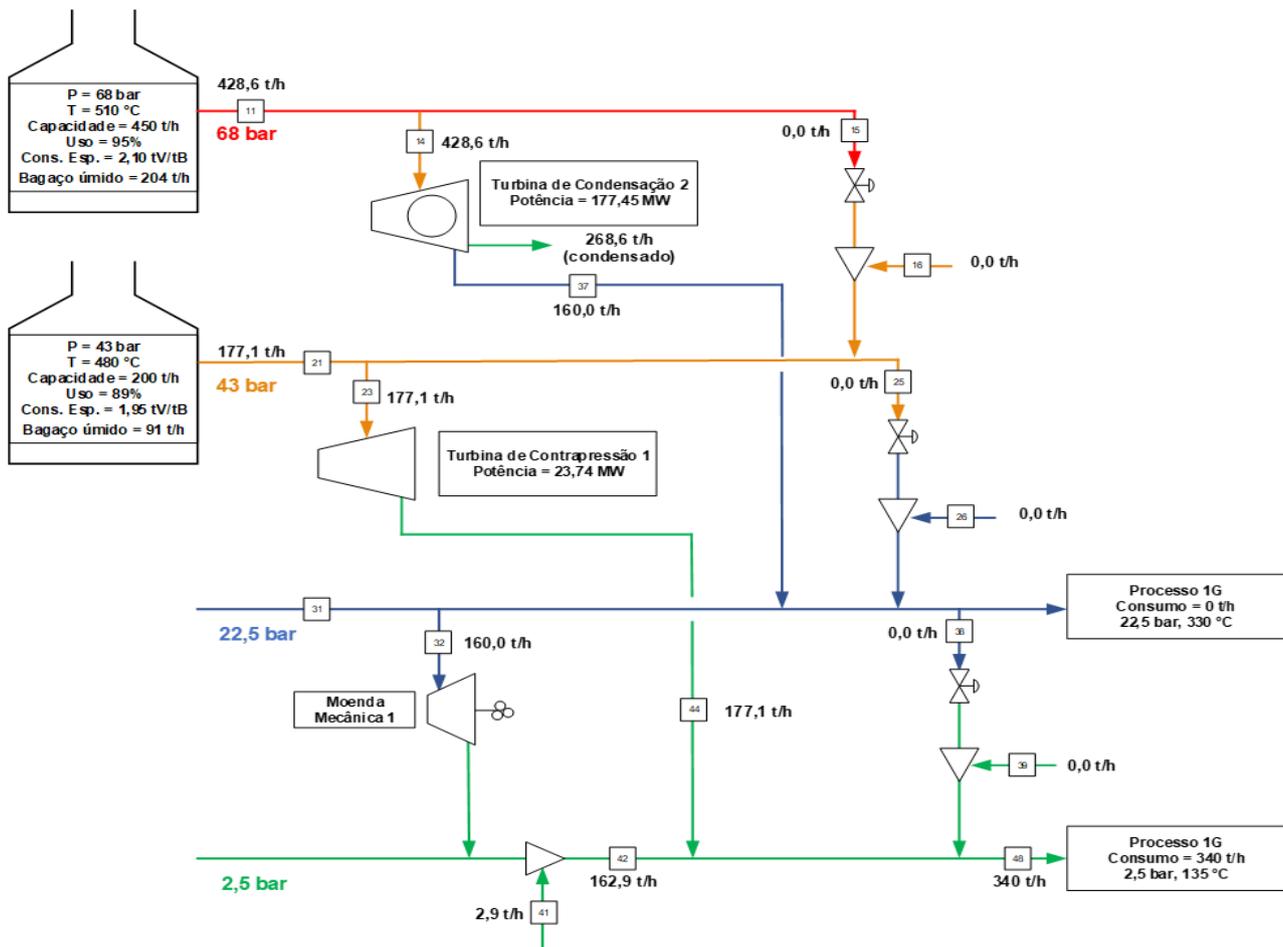


Figura 7: Configuração do sistema de cogeração

A primeira parte da análise da implementação da usina de etanol 2G consistiu na escolha das tecnologias para as diferentes etapas da produção. A princípio, foi selecionada a tecnologia de pré-tratamento do bagaço de cana proveniente da usina de etanol 1G, etapa essa cuja finalidade está relacionada à remoção da lignina e da hemicelulose, bem como o aumento da porosidade e área de contato do material do bagaço para a futura realização da hidrólise da celulose. A tecnologia escolhida para o pré-tratamento foi a explosão a vapor catalisada por ácido, no caso o ácido sulfúrico, na qual a biomassa é exposta a vapor a alta pressão seguida de uma descompressão repentina, resultando em uma explosão. Essa explosão, quando catalisada por ácido, promove um maior rendimento de açúcares, posteriormente utilizados para a conversão em etanol, bem como diminui a produção de compostos inibitórios e auxilia em uma remoção mais completa da hemicelulose (Efe et al, 2007). A Figura 8 contém um esquema simplificado da etapa de pré-tratamento e Tabela 2 uma lista de equipamentos.

Figura 8: Esquema simplificado da etapa de pré-tratamento

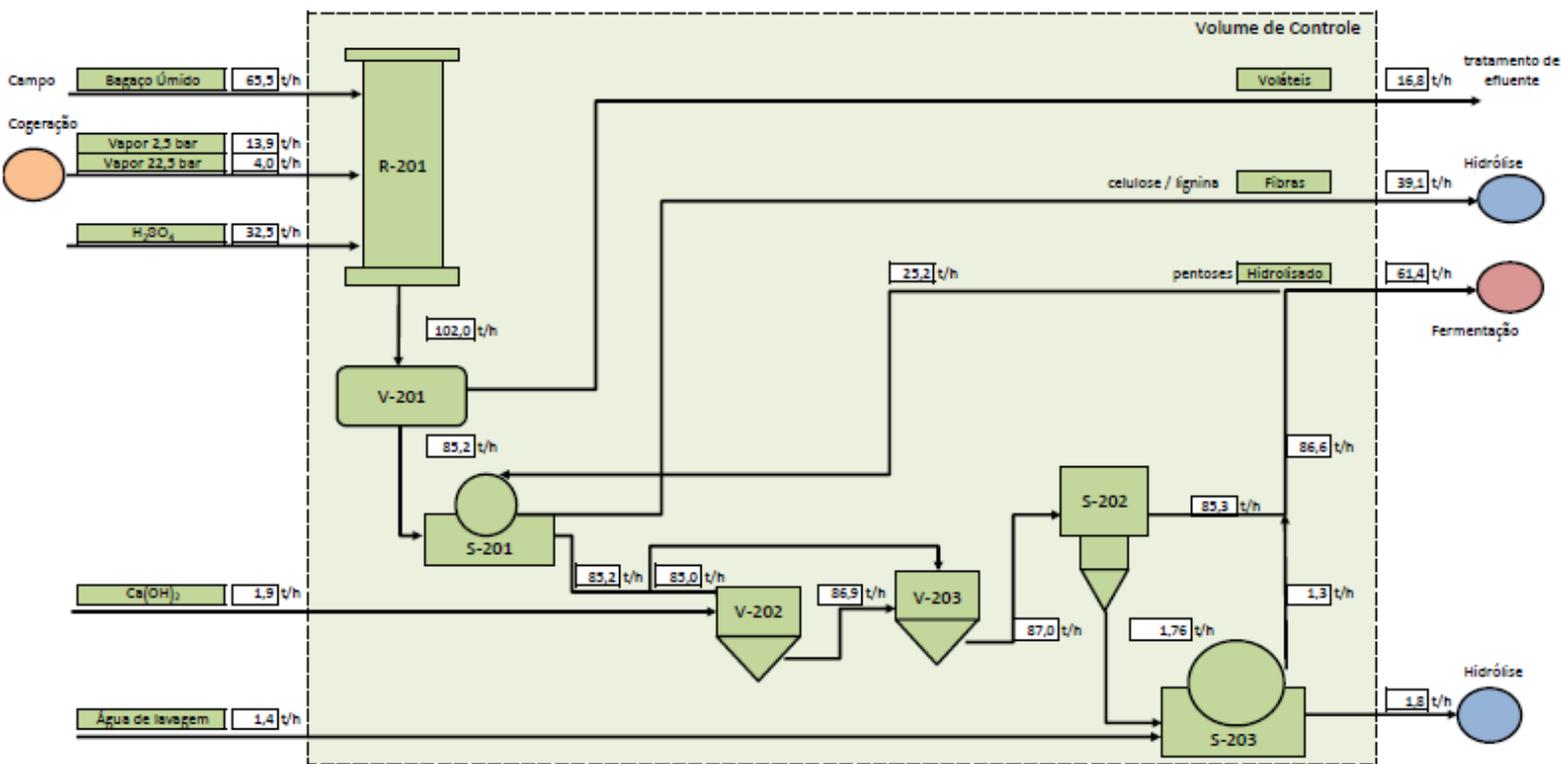


Tabela 2: Lista de equipamentos e respectivas tags no pré-tratamento (Obs.: Alguns equipamentos, como bombas e compressores, não estão representados no esquema simplificado)

Tag	Equipamento	Tag	Equipamento
R-201	Reator de Explosão a Vapor	P-201	Bomba
V-201	Tanque Flash	P-202	Bomba
S-201	Prensa Parafuso	P-203	Bomba
E-201	Trocador de Calor	P-204	Bomba
E-202	Trocador de Calor	P-205	Bomba
V-202	Tanque de <i>Overliming</i>	P-206	Bomba
V-203	Tanque de Condicionamento	P-207	Bomba
S-202	Clarificador	P-208	Bomba
S-203	Filtro Tambor Rotativo	P-209	Bomba
-	Esteiras para fibra		

Em seguida, definiu-se a tecnologia da etapa de hidrólise da celulose, optando-se, no caso, pela realização da hidrólise enzimática. Essa tecnologia utiliza um conjunto de enzimas, coletivamente conhecidas como celulase, que catalisam a quebra da celulose em açúcares C₅ e C₆. Como vantagens da hidrólise enzimática, pode-se citar a alta especificidade das enzimas celulases em relação ao substrato, o que reduz a formação de subprodutos indesejados na reação, havendo uma redução de custos relacionados a separação de produtos; além da especificidade da enzima evitar que ocorra a degradação da glicose, fato que pode ocorrer quando realiza-se uma hidrólise ácida, por exemplo (Efe et al., 2007). A Figura 9 contém um esquema simplificado da etapa de hidrólise e a Tabela 3 uma lista de seus respectivos equipamentos.

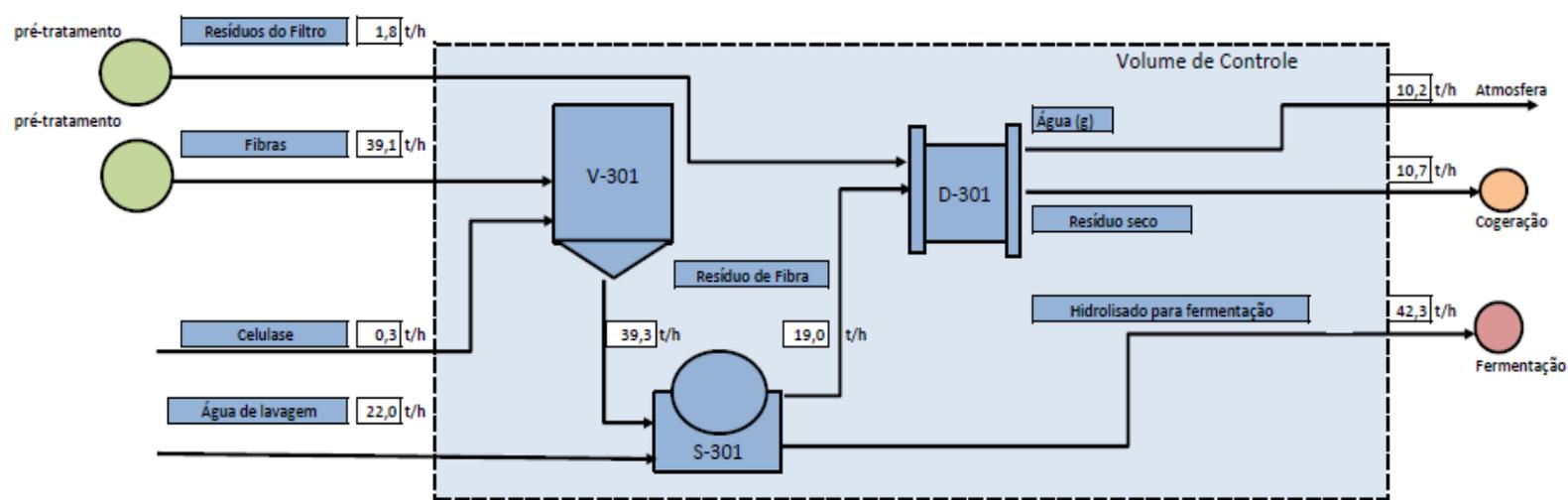


Figura 9: Esquema simplificado da etapa de hidrólise

Tabela 2: Lista de equipamentos e respectivas tags na hidrólise (Obs.: Alguns equipamentos, como bombas e compressores, não estão representados no esquema simplificado)

Tag	Equipamento
R-301	Tanque de Hidrólise
P-301	Bomba A
P-302	Bomba B
S-301	Prensa Parafuso
D-301	Secador

Com relação à etapa de fermentação dos açúcares formados na hidrólise para a obtenção do etanol, optou-se pela realização dessa etapa de modo separado para os açúcares C₅ e C₆, visando a um menor risco tecnológico do processo, uma vez que, quando na realização da fermentação conjunta dos dois tipos de açúcares, a levedura tende a consumir primeiramente os açúcares do tipo C₆, entrando novamente na fase lag antes de passar a fermentar C₅, aumentando o tempo de processo. Além disso, há uma maior quantidade de informações a respeito do processo realizado em modo separado, outra razão para a sua escolha. Com relação ao microrganismo utilizado na etapa de fermentação, optou-se pela escolha da levedura *Saccharomyces cerevisiae* geneticamente modificada para atender C₅ e C₆, por conta da tecnologia para a fermentação com essa linhagem já estar bem desenvolvida; apesar da existência de outros microrganismos com rendimentos da produção de etanol superiores aos da *Saccharomyces cerevisiae*, como certas linhagens de *Escherichia coli* por exemplo, o fato da tecnologia da fermentação com

o primeiro estar consolidada contribuiu para a sua seleção, não havendo a necessidade de grandes alterações com relação aos processos realizados atualmente. A respeito da definição do tipo de etanol a ser produzido na usina 2G, optou-se pela escolha do etanol anidro em face do hidratado, devido ao fato da usina 1G já realizar uma produção consolidada do primeiro tipo, facilitando a tomada de decisões do cliente com relação a pesquisas de mercado, logística e estratégias de venda, diminuindo os riscos com relação ao investimento em questão (Moysés et al., 2016; McMillan, 1993). A Figura 10 contém um esquema simplificado da etapa de fermentação e a Tabela 3 uma lista dos respectivos equipamentos.

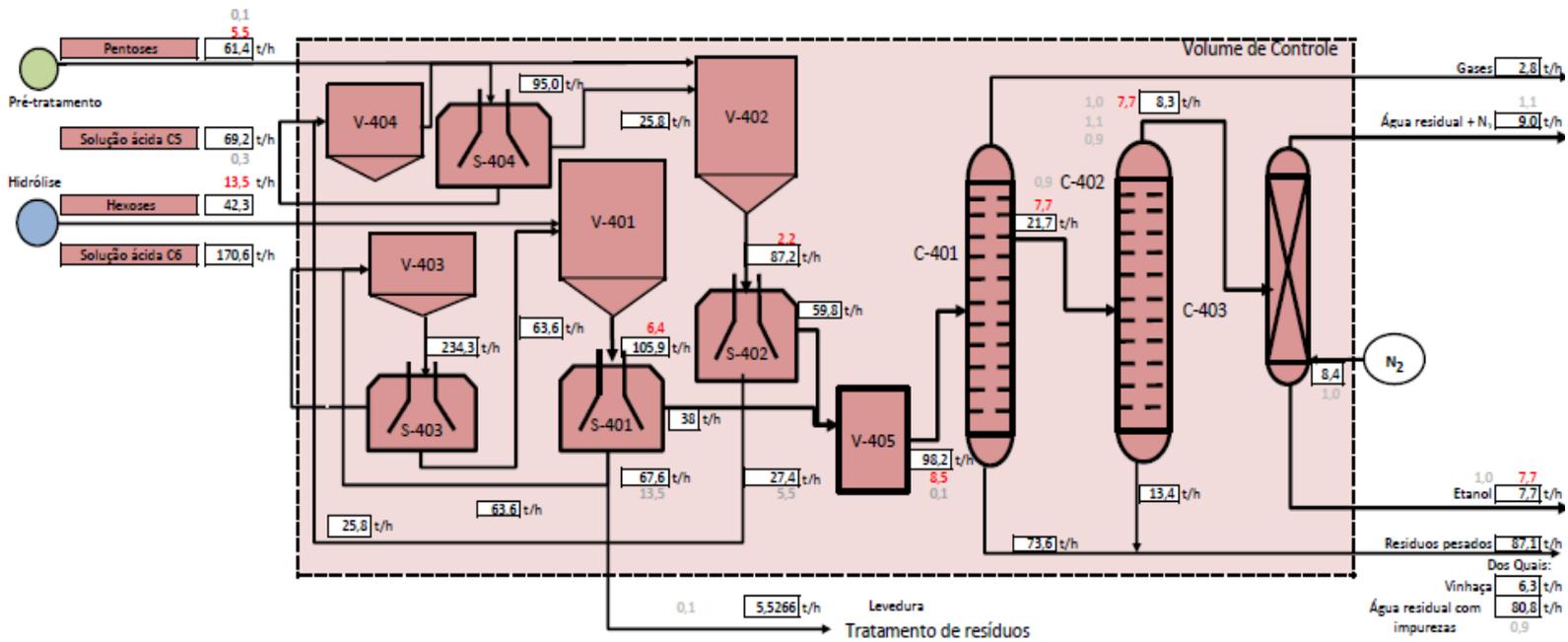


Figura 10: Esquema simplificado da etapa de fermentação e purificação

Tabela 3: Lista de equipamentos e respectivas tags na fermentação (Obs.: Alguns equipamentos, como bombas e compressores, não estão representados no esquema simplificado)

Tag	Equipamento	Tag	Equipamento
V-401	Fermentador C6	P-403	Bomba
V-402	Fermentador C5	P-404	Bomba
V-403	Tanque esterilizante C6	P-405	Bomba
V-404	Tanque esterilizante C5	P-406	Bomba
V-405	Tanque Pulmão	P-407	Bomba
S-401	Centrífuga	P-408	Bomba
S-402	Centrífuga	P-409	Bomba
S-403	Centrífuga	P-410	Bomba
S-404	Centrífuga	P-411	Bomba
C-401	Coluna destilação	P-412	Bomba
C-402	Coluna retificação	P-413	Bomba
C-403	Coluna Peneira Molecular	K-401	Compressor
P-401	Bomba	K-402	Compressor
P-402	Bomba		

3.2. Aplicação do estudo HAZOP

Nesta etapa foi realizada o estudo do HAZOP conforme descrito na introdução teórico, foi selecionado o nódulo com maior risco no processo. Para avaliação de potenciais perigos que podem decorrem de desvios em relação as condições de projeto ideais. A Tabela 4 indica diferentes expressões usadas para avaliar cada parte do processo e seus respectivos significados.

Tabela 4: Lista de palavras-guias mais comuns e seus significados genéricos (Sinnot, 1999)

Palavra-guia	Desvios
Nenhum	Nenhum dos objetivos do projeto é alcançado
Mais	Aumento quantitativo em um parâmetro
Menos	Diminuição quantitativa de um parâmetro
Também	Todos os objetivos do projeto são atendidos, porém algo que não deveria ocorrer também
Reverso	Ocorre o contrário do que era esperado

Os parâmetros típicos do processo de produção do etanol celulósico que podem apresentar algum desvio são: vazão, pressão, temperatura, mistura, nível, reação, separação, operação e manutenção. O estudo do HAZOP foi realizado para os principais equipamentos do processo que basicamente são o reator de explosão a vapor (R-201), os tanques de uma forma geral (V-201, V-202 etc.), além de caldeiras e turbinas na cogeração de energia. O maior fator de risco na seção de pré-tratamento são o reator de explosão a vapor que opera em altas pressões e temperaturas e os meios ácidos que circulam no sistema (Elf et al. 2015). Sendo assim, o reator de pré-tratamento e os fatores que podem causar derramamento ou transbordamento de meio ácido, além de outras substâncias como a levedura geneticamente modificada na fermentação, foram avaliados no HAZOP. São avaliados de forma reator de pré-tratamento (R-401) e seu respectivo tanque de coleta (V-401), dos quais é realizado um fluxograma P&ID além do PFD apresentado na seção anterior.

Os demais equipamentos das seções de pré-tratamento e hidrólise são tanques em sua grande maioria e o principal risco nesse caso seria o derramamento ou estes transbordarem. É por isso que uma análise geral do HAZOP será realizada para todos os tanques, que possuem diferentes funções como mistura, neutralização e desidratação, por exemplo. O HAZOP completo está na próxima página na Tabela 5.

A divisão por nódulos foi feita da seguinte forma: reator de explosão a vapor e tanque flash (nódulo 1), sistema de cogeração de energia (nódulo 2), tanques no geral (nódulo geral), enquanto os outros nódulos são correntes específicas.

Tabela 5: Estudo de HAZOP realizado para a planta de etanol celulósico

Relatório HazOp				Frequência, Severidade e Risco			Data: 01/06/2020 Área: Process Safety Folha: 1 Fluxograma: 1		Frequência, Severidade e Risco após implementação das ações requeridas				
Parâmetro	Palavra-chave	Desvio	Nódulos	Causa	Consequências	Frequência	Severidade	Risco	N°	Ações Requeridas	Frequência	Severidade	Risco
Reator de explosão à vapor (linha de entrada de vapor e saída do reator)													
Pressão	Não	Sem pressão	1	Falha na transferência de vapor, vazamento	Pode haver um problema com a entrada de vapor. Instale um controlador de fluxo. Não há fator de risco, mas, a eficiência do processo diminuiria nesse caso. Em caso de vazamento, a alta pressão e temperatura do vapor prejudicará os operadores.	D	III	4	1	Aos operadores devem ser fornecido com a proteção necessária. Instale um alerta sonoro de não fluxo que informe o operador para verificar o motivo.	B	II	1
Vazão	Não	Sem Vazão	1	Falha na válvula ou fratura da linha		C	III	3	2	Idem 1	B	II	1
Pressão	Menos	Menor pressão	1	Baixo fluxo de vapor, falha da válvula ou fratura da linha	Pode haver um problema com a entrada de vapor. Instale um controlador de fluxo. Não há fator de risco, mas, a eficiência do processo diminuiria nesse caso. Em caso de vazamento, a alta pressão e temperatura do vapor prejudicará os operadores.	C	II	2	3	Aos operadores devem ser fornecido com a proteção necessária. Instale um alerta sonoro de não fluxo que informe o operador para verificar o motivo.	E	I	1
Vazão	Menos	Menor vazão	1			C	II	2	4	Idem 3	E	I	1
Vazão	Mais	Maior vazão	1	Aumento da entrada de vapor	Se a quantidade de vapor aumentar, a pressão e temperatura dentro do reator aumentarão causando risco de explosão	C	IV	4	5	Instale um controlador de fluxo na linha de vapor e controladores de pressão e temperatura para o reator	B	III	2
Vazão	Reverso	Fluxo reverso	1	Queda na pressão da linha e alta pressão no reator	Fluxo reverso interrompendo o processo	D	II	3	6	Instale a válvula de controle para impedir o fluxo reverso	B	I	1
Entrada de biomassa (reator de explosão à vapor)													
Pressão/vazão	Não	Sem vazão	1	Bomba, falha na válvula Entupimento Vazamento de linha	Em caso de vazamento da linha, os ingredientes ácidos irão derramar e causar perigo para os operadores. No caso de baixa pressão, ocorrerá fluxo reverso e os ingredientes do reator irão vazar do reator. A linha pode estar entupida devido à fibra e/ou manutenção irregular do equipamento	D	III	4	7	Instale válvulas unidirecionais para impedir o fluxo reverso. Instale o controlador de fluxo e alerta sonoro, que irão informar o operador sobre as oscilações dos pontos de ajuste. Instale a drenagem adequada para permitir que os vasos fluam para os locais de coleta dos derramamentos. Forneça as precauções de emergência necessárias em caso de lesões.	B	III	2
Pressão/vazão	Menos	Menor vazão	1			D	III	4	8	Idem 7	B	III	2
Pressão/vazão	Mais	Maior vazão	1	Bomba, falha na válvula	A alta vazão aumentará a pressão dentro do reator e pode causar vazamentos ou explosões.	C	IV	4	9	Instale um controlador de fluxo e um alerta sonoro.	B	III	2
Saída do reator de explosão à vapor													
Pressão	Menos	Sem pressão	1	Bico entupido Sem fluxo de entrada	Se os bicos estiverem entupidos, a pressão dentro do reator aumentará, causando risco de explosão. - Em caso de não haver fluxo, idem 1 e 3	C	IV	4	10	Para evitar essa situação, o fluxo de saída do reator deve ser monitorado por controladores de vazão.	B	II	1
Vazão	Menos	Menor vazão	1	Bico entupido Sem fluxo de entrada	Idem 11	C	IV	4	11	Idem 10	B	II	1
Vazão	Mais	Maior vazão	1	O fluxo de entrada excedeu a pressão recomendada	Aumento do fluxo de saída indica aumento da pressão dentro do reator e pode causar risco de explosão	D	IV	5	12	Instale controladores de pressão e válvulas de escape	A	III	1
Entrada do reator de explosão à vapor e fermentador													
Pressão	Não	Sem pressão	Geral	Falha na válvula / bomba ou fratura na linha	Em caso de vazamento na linha, os ingredientes ácidos irão derramar e causar perigo para os operadores. Em caso de baixa pressão, ocorrerá fluxo reverso e o equipamento os ingredientes sairão do equipamento, instale válvulas unidirecionais para impedir o fluxo reverso.	B	III	2	13	Instale controladores de fluxo e alertas sonoros, para que o operador seja informado sobre oscilações nos set points. Instale adequadamente uma drenagem que permita que os derramamentos fluam para os locais de coleta. Forneça as precauções em caso de emergência necessárias e lesões. A linha / bomba pode estar entupida devido à fibra, realize manutenção regular dos equipamentos.	B	II	1
Vazão	Não	Sem vazão	Geral			B	III	2	14	Idem 13	B	II	1
Pressão	Menos	Menor vazão	Geral	Baixa vazão, falha na válvula / bomba ou fratura de linha	Idem 13	B	III	2	15	Idem 13	B	II	1
Vazão	Menos	Menor vazão	Geral			B	III	2	16	Idem 13	B	II	1
Vazão	Mais	Maior vazão	Geral	Falha na bomba / válvula	Se a vazão aumentar, o nível dentro do tanque vai aumentar e causar risco de transbordamento	C	III	3	17	Instale controladores de fluxo na linha e controlador de nível para o equipamento se aplicável.	B	I	1
Vazão	Reverso	Fluxo reverso	Geral	Fluxo reverso	Instale uma válvula unidirecional	C	II	2	18	Idem 17	B	II	1
Saída do fermentador e entrada do reator de explosão a vapor													
Vazão/pressão	Não	Sem pressão	Geral	Bomba, falha na válvula Entupimento Fratura de linha	Em caso de vazamento na linha, os ingredientes ácidos irão derramar e haverá perigo para os operadores. Em caso de falha da bomba ou válvula, o fluxo irá parar e o nível do líquido dentro do o equipamento aumentará até transbordar.	C	III	3	19	Para impedir isso, um controlador de nível deve ser instalado no equipamento, e estes devem passar por manutenção constante para evitar a falha por entupimento. Drenagem suficiente deve ser instalada para melhor controle do fluxo de derramamento. As precauções necessárias devem ser tomadas no caso de contato dos operadores com meios ácidos.	B	I	1
Vazão/pressão	Menos	Menor pressão	Geral			C	III	4	20		B	I	1
Vazão/pressão	Mais	Maior vazão	Geral	Bomba, falha na válvula	A alta vazão diminuirá o volume do líquido dentro do equipamento e poderá afetar o tempo de residência, sendo insuficiente para concluir a tarefa.	D	II	3	21	Instale um controlador de fluxo e de alerta sonoro.	A	II	1
Caldeira e turbinas (cogeração)													
Temperatura	Mais	Maior temperatura	2	Excesso da queima de bagaço (geração descontrolada) Temperatura do vapor muito alta	Destrói o tambor da tubulação devido ao superaquecimento dos tubos e o que poderia levar a explosão da caldeira	C	IV	4	22	Instale um sistema de resfriamento nos aquecedores primários e secundários	A	IV	2
Pressão	Mais	Maior pressão	2	Pressão excessiva dentro da turbina	Transporte de vapor à alta pressão na turbina pode levar a corrosão da lâmina	D	II	3	23	Instalação de uma válvula de segurança para aliviar o excesso de pressão	B	II	1
Temperatura	Mais	Maior temperatura	2	Pressão excessiva dentro da turbina	Enfraquecimento da tubulação transportando o vapor desse modo enfraquecendo os materiais de construção.	D	II	3	24	Verificações regulares na sonda térmica.	B	II	1
Temperatura	Mais	Maior temperatura	2	Pressão excessiva dentro da turbina	Causar expansão nas pás e conchas da turbina o que faz com que ambos entrem em contato com um ao outro e poderia levar ao desgaste destes	C	II	2	25	Verificações regulares na sonda térmica.	B	I	1
Tratamento de resíduos													
Vazão	Mais	Maior vazão	Saída de resíduo ácido	Resíduos ácidos	Poluição e contaminação do meio ambiente (existe regulação específica para tratamento desse tipo de resíduo)	D	III	4	26	Realizar tratamento e descarte adequado dos resíduos ácidos	C	II	2
Vazão	Mais	Maior vazão	Saída de levedura	Resíduos fermentação (GMO)	Poluição e contaminação do meio ambiente (existe regulação específica para tratamento desse tipo de resíduo)	D	III	4	27	Realizar tratamento e descarte adequado dos GMOs	C	II	2
Manutenção das linhas do reator de explosão à vapor													
Pressão/vazão	Menor	Menor pressão	1	Falha na válvula de escape no reator	Vazamento de gases ácidos e poluição	C	III	3	28	Manutenção das linhas e checagem periódica Se ajustar a legislação do CONAMA	B	II	1
Pressão/vazão	Menor	Menor pressão	Todas as linhas	Corrosão das paredes e linhas do reator	Vazamento do reator e paredes das linhas Risco de ruptura das linhas e reator Risco ao operadores	B	III	2	29	Manutenção das linhas e checagem periódica dos equipamentos Utilização de material adequado para construção das tubulações e equipamentos (aço inoxidável, liga de aço caborno, etc) dependendo do equipamento e etapa do processo	B	II	1

perigos não relacionados as palavras-guias. Além disso, HAZOPs são tipicamente muito demorados e, portanto, caros.

4. Conclusões

Com base na análise HAZOP, foi confirmada a importância da instalação de um bom sistema de controle nos pontos críticos do processo de produção do etanol, segundo verificado pela análise de risco. Dessa forma, é possível identificar as seções nas quais o processo pode apresentar riscos mais altos durante a fase inicial. Também é interessante desenvolver um programa de manutenção para todos os equipamentos, em especial, aqueles que apresentem maior risco durante a operação ou que possam ter um peso relevante no processo em caso de falha. Seguindo as diretrizes e passo a passo do HAZOP, é possível minimizar os acidentes e situações de risco durante a operação da planta.

Conclui-se também que os objetivos iniciais propostos foram atingidos. Apesar de HAZOP ter sido realizado para uma pequena parte do processo, por ser bastante complexo, foi possível levantar os principais desvios do processo, suas principais causas e consequências. Além disso, num estudo de HAZOP real, uma equipe de vários profissionais experientes poderia trazer diversos insights que agregariam muito a operação e segurança do processo avaliado. Porém, deve-se frisar que o HAZOP não pode ser a única metodologia para encontrar riscos e problemas numa planta. Vários processos diferentes, que muitas vezes são complementares são complementares devem ser realizados, como a APR (Análise preliminar de risco) por exemplo.

Também é bastante visível que o etanol de segunda geração é um dos biocombustíveis com maior potencial para o futuro, uma vez que não precisa utilizar terras produtivas, como o etanol de primeira geração e outros biocombustíveis por exemplo. Apesar do etanol celulósico poder ser feitos apenas com matéria prima ou restos que não teriam utilidade nenhuma, o seu processo de produção ainda é bem caro comparado ao etanol de primeira geração, necessitando de subsídios governamentais e melhorias e criação de tecnologias mais eficientes e baratas para sua produção.

5. Referências

De CICCIO, Francesco e FANTAZZINI, Mario Luiz. Tecnologias Consagradas de Gestão de Riscos, 2003.

LOEWE, Katharina e KARIUKI S.G. Integrating Human Factors Into Process Hazard Analysis. Reliability Engineering and System Safety, Technische Universität Berlin, Institute of Process and Plant Technology. Berlin, Germany, n. 92, p. 1764-1773, 2007.

SELLA, Bianca Cristina. Comparativo entre as Técnicas de Análise de Riscos APR e HAZOP, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Departamento Acadêmico de Construção Civil. Curitiba, Paraná. p. 12-29, 2014. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/3521/1/CT_CEEEST_XXVIII_2014_06.pdf Acesso em 04 de junho de 2020.

NOLAN, Dennis P. Application Of Hazop And What-If Safety Reviews To The Petroleum, Petrochemical & Chemical Industries. New Jersey, U.S.A.: Noyes Publications, 1994.

MILANEZ, Artur Yabe; et. Al.. De Promessa a Realidade: como o etanol celulósico pode revolucionar a indústria da cana-de-açúcar – Uma Avaliação do Potencial Competitivo e Sugestões de Política Pública. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, BNDES, n. 41, p. 237-294, mar.2015.

https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/4281/2/BS%2041_mar_atualizado_P.pdf Acesso em 06 de junho de 2020.

EFE, Ç. et al. Technical and Economical Feasibility of Production of Ethanol from Sugar Cane and Sugar Cane Bagasse, B-Basic Internal Report, Delft University of Technology, The Netherlands, 2007.

ALVES, D.N. Estudo de sistemas de cogeração em usinas de açúcar e álcool, com utilização do bagaço e palha da cana, 2011, 114 p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, 2011.

SENGER, R. Análise do rendimento térmico de uma caldeira alimentada com lenha em toras, 2015, 62 p., Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

MOYSÉS, R. et al. Xylose Fermentation by *Saccharomyces cerevisiae*: Challenges and Prospects, Int. J. Mol. Sci., v. 17, 2016.

MCMILLAN, J.D. Xylose Fermentation to Ethanol: A Review. National Renewable Energy Laboratory, Colorado, 1993.

TURTON, R. et al. Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes, 4. ed., Prentice Hall, New Jersey, 2012.

COUPER, J.R. Process Engineering Economics, 1 ed., Marcel Dekker, New York, 2003.

STUCCHI, A. A experiência da Raízen com o etanol de segunda geração, NovaCana, Disponível em: <<https://www.novacana.com/n/eventos/aexperienciadaraizencomoetanoldesegundageraca0130616/?tmpl=component&print=1>>. Acesso em 17 de junho de 2020

E4TECH. From the Sugar Platform to biofuels and biochemical, Final report for the European Commission Directorate-General Energy, v. 1.4, 2015.

ALVES, M. Estudo de sistemas de cogeração em usinas de açúcar e álcool, com utilização do bagaço e palha da cana, 2011, 114 p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, 2011.

CRAWLEY, F.; TYLER, G. HAZOP : Guide to Best Practice: Guidelines to Best Practice for the Process and Chemical Industries, Elsevier, 2015.

NUNES, C. Biofuels explained, Disponível em: <<https://www.nationalgeographic.com/environment/global-warming/biofuel/>>. Acesso em 17 de junho de 2020

DENAULT, J. Cellulosic ethanol, Disponível em: <<https://www.britannica.com/technology/cellulosic-ethanol/>>. Acesso em 23 de junho de 2020

CROWL, Daniel A.; LOUVAR, J. F. Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 2011.