



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



MARINA SANTOS RODRIGUES

Análise de risco aplicada à produção de acetileno

Uberlândia, MG
2022

Marina Santos Rodrigues

Análise de risco aplicada à produção de acetileno

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro habilitação Engenharia Química.

Área de concentração: Engenharia Química

Orientador: Prof. Dr. Rubens Gedraite

Uberlândia

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Faculdade de Engenharia Química
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4285 - secdireq@feq.ufu.br - www.feq.ufu.br



HOMOLOGAÇÃO Nº 71

MARINA SANTOS RODRIGUES

Análise de risco aplicada à produção de acetileno

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado nesta data, como um dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) - *campus Santa Mônica* (MG) pela banca examinadora constituída por:

Prof. Dr. Rubens Gedraite
Orientador - FEQUI/UFU

Prof. Dr. Jader Conceição da Silva
FEQUI/UFU

Prof. Dr. Rodrigo Sislian
IFSP/Campus Guarulhos

Uberlândia, 10 de agosto de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Rubens Gedraite, Professor(a) do Magistério Superior**, em 13/08/2022, às 07:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jader Conceição da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 13/08/2022, às 08:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Sislian, Usuário Externo**, em 14/08/2022, às 13:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3838174** e o código CRC **E33691B6**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, que me deu o dom da vida e me abençoa todos os dias com o seu amor infinito.

Aos meus pais, Marlene e Marcos, os dois maiores incentivadores das realizações dos meus sonhos. Agradeço pelo carinho, afeto, dedicação e pelo empenho em me educar. Aqui estão os resultados dos seus esforços.

Ao meu irmão, Marco Túlio (que foi literalmente meu presente de aniversário), agradeço por estar sempre comigo e me mostrar o lado divertido da vida.

Aos meus avós Maria das Graças, Tadeu, Eulina e Manoel (in memoriam) agradeço por tudo que fizeram por mim. Suas orações me deram forças para continuar e finalizar esta pesquisa.

Aos meus familiares, incluindo a Turma dos 10 anos, quero agradecer por me apoiarem cada um à sua maneira. Vocês fazem diferença em minha vida.

Um agradecimento especial a minha prima Lívia, por todo companheirismo e por tornar minha vida mais leve com a sua pureza.

Aos meus amigos agradeço por todo suporte, amizade, conquistas, trocas de experiências e esclarecimento de dúvidas. Não preciso mencionar seus nomes, pois eles sabem que são os melhores.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rubens Gedraite, por ter aceitado de bom grado a orientação deste trabalho. Sem sua assistência e envolvimento dedicado em todas as etapas do processo, este projeto nunca teria sido realizado. Agradeço por ser um exemplo de profissional, que inspira a todos.

A todos os mestres que contribuíram com a minha formação acadêmica e profissional durante a minha vida.

A ConsultEQ pela oportunidade de crescimento, desenvolvimento profissional e por ter se tornado minha família na UFU.

RESUMO

A implementação de sistemas de controle automatizados tem sido amplamente difundida, visto que a qualidade é um fator imprescindível em ambientes industriais. De um modo geral, quanto mais uma indústria incorporar novas tecnologias e inovações em controle e automação, mais credível será o seu produto final no mercado, conquistando não só o lucro, mas verdadeiras melhorias na segurança do trabalhador e na segurança ambiental, fatores que compelem a metodologia de análise de risco industrial. Objetivando reduzir e até anular riscos de acidentes em unidade fabris essa análise tem se expandido cada vez mais. Considerando cenários comuns em instalações da indústria química, foi elaborado um HAZOP para reatores descontínuos para produção de acetileno. Com foco na análise do impacto causado pelo fechamento indevido de válvula de controle instalada na saída do gerador de acetileno sobre a temperatura e pressão de operação do equipamento. A análise do risco foi realizada com base na metodologia tradicionalmente utilizada em HAZOP. Os resultados obtidos nos cálculos realizados sugerem que haveria um aumento na temperatura de operação do reator, entretanto sem alcançar o valor limite para que ocorra a autoignição. No caso da pressão, o valor encontrado nos cálculos foi superior ao limite máximo de geradores de média pressão.

Palavras-chave: análise de risco, reator químico, acetileno.

ABSTRACT

The implementation of automated controls has been of great quality, as it is an indispensable factor in industrial environments. In general, the more an industry incorporates new technologies and innovations only in control and automation, the more credible your final product will be on the market, achieving not profit, but real improvements in worker safety and environmental safety, factors that compel industrial risk analysis methodology. Aiming to reduce and even eliminate the risk of accidents in the manufacturing unit, this analysis has expanded more and more. Common considerations in chemical industry facilities, a HAZOP was developed for continuous acetylene production reactors. Focusing on the analysis of the impact caused by the improper closing of a control valve installed at the output of the acetylene generator on the operating temperature and pressure of the equipment. Risk analysis was performed based on the methodology used in HAZOP. Results increase at temperature rise levels that have a rise in temperature, although this does not reach the auto-ignition threshold value. In the case of pressure, the value found is higher than the maximum limit of medium pressure generators.

Key words: risk analysis, chemical reactor, acetylene.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Distribuição das usinas de açúcar e álcool no Brasil	14
Figura 4.1 - Representação esquemática do gerador de C_2H_2	30
Figura 4.2 - Diagrama de simulação do comportamento da temperatura	34
Figura 4.3 - Comportamento da temperatura no gerador de Acetileno	35

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Quadro 2.1 - Produção de petroquímicos primários e derivados.....	18
Tabela 3.1 - Entalpias de formação.....	28
Quadro 4.1 – HAZOP parcial do gerador de C_2H_2	33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BASF – *Badische Anilin & Soda Fabrik*;

EUA - Estados Unidos da América;

HAZOP - *Hazard and Operability Study*;

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;

PIB - Produto Interno Bruto

PVC - Poli cloreto de vinila

SIDRA - Sistema IBGE de Recuperação Automática

SINOPEC - *China Petrochemical Corporation*

LISTA DE SÍMBOLOS

BDO: 1,4-Butanodiol;

C₂H₂: acetileno;

CaC₂: carbeto de cálcio;

THF: tetraidrofurano;

H₂O: Água;

w₂: Vazão mássica de *C₂H₂* que deixa o volume de controle (kg/h);

w₁: Vazão mássica de *C₂H₂* alimentada ao volume de controle (kg/h);

R_{C₂H₂}: Taxa de geração de *C₂H₂* no volume de controle (kg/h);

w₂: Vazão mássica de *C₂H₂* que deixa o volume de controle (kg/h);

Ḃ: Vazão volumétrica de *C₂H₂* que deixa o volume de controle (m³/h);

MM: Massa molecular do *C₂H₂* (g/mol);

P: Pressão do *C₂H₂* no volume de controle (mmHg);

R: Constante universal dos gases (atm·L/mol·K);

T: Temperatura do *C₂H₂* no volume de controle (°C)

Δt_{batelada}: Duração da batelada (h);

M_{0,CaC₂}: Massa inicial de *CaC₂* alimentada na batelada (kg);

R_{CaC₂}: Taxa de consumo do *CaC₂* (kg/h);

Ė₁: Energia alimentada ao volume de controle por unidade de tempo (kW);

Ė₂: Energia retirada do volume de controle por unidade de tempo (kW);

Ė_{gerada}: Energia gerada no volume de controle por unidade de tempo (kW);

$\frac{dE}{dt}$: Variação de energia no volume de controle por unidade de tempo (kW);

\bar{c}_p : Calor específico médio do $C_2H_2 = 1.740 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$;

$M_{sol. Ca(OH)_2}$: Massa de sol. $Ca(OH)_2$ no interior do gerador (kg);

$\tilde{R}_{Ca(OH)_2}$: Taxa molar de produção do $Ca(OH)_2$ na batelada (mol/s);

ΔH_r° : Calor posto em jogo na reação química (J/mol);

$T_{gerador}$: Temperatura do C_2H_2 no gerador de C_2H_2 ($^\circ\text{C}$);

$\frac{dT_{gerador}}{dt}$: Variação de temperatura no gerador de C_2H_2 ($^\circ\text{C/s}$);

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO DA LITERATURA	16
3	METODOLOGIA.....	23
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
5	CONCLUSÃO.....	38
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1 INTRODUÇÃO

1.1 Mercado do acetileno

Em escala global, de acordo com relatórios da **ChemAnalyst (2021)**, o mercado de Acetileno registrou um crescimento considerável, atingindo uma produção de 1,9 milhões de toneladas em 2020. Ainda segundo a referência citada, a taxa de crescimento anual composto, esperado é de aproximadamente 4,1% até 2030. O mercado deste gás é fragmentado por natureza, tendo com principais produtoras as empresas: BASF, Gulf Cryo, Linde, SINOPEC e Praxair.

A crescente demanda do mercado estudado se deve às propriedades químicas e físicas do acetileno, que permitem a aplicação em diversas áreas que estão em expansão, como por exemplo em síntese de produtos químicos, metalurgia e automotiva. Dentre os principais usos do produto químico estão o tratamento térmico, soldagem e corte oxi-acetilenico, pois pode alcançar a temperatura de combustão de 3.090°C liberando uma quantidade de energia correspondente a 54,8 kJ/L em sua combustão. Aliás, o acetileno é prioritariamente utilizado para este fim.

A indústria metalúrgica, por exemplo, representou 4,2% do PIB brasileiro em 2019, segundo o Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA). Tendo a região sudeste como a mais expressiva, concentrando 5,6% do PIB deste setor.

Outro setor que representa uma grande parte do consumo do acetileno é o sucroalcooleiro, que utiliza este gás para manutenção de equipamentos. Só no Brasil existem 422 usinas, concentradas em maior parte na região Sudeste (**Nova Cana, 2020**). Na **Figura 1.1** é apresentada a distribuição das usinas no Estados Brasileiros.

Em relação ao consumo mundial, a região da Ásia-Pacífico dominou o mercado, devido ao aumento das atividades de transporte e construção na China e

no Japão. É importante destacar que a China é a maior fabricante de automóvel do mundo.

Figura 1.1 - Distribuição das usinas de açúcar e álcool no Brasil



Fonte: Nova Cana (2020)

Em 2020, de acordo com a **ChemAnalyst (2021)**, o mercado foi duramente afetado pela pandemia COVID-19, devido às restrições impostas pelos Governos e parada de fábricas afim de conter a propagação do vírus. Entretanto, no último trimestre de 2020 as vendas mostraram uma melhora em volume na Ásia e na Europa, à medida que as atividades de construção foram recuperando e a demanda por cilindros de oxiacetileno aumentou. Já nas Américas a demanda por acetileno permaneceu reduzida, principalmente após a diminuição da produção na planta da BASF em Geismar, após o Furacão Laura.

No primeiro trimestre de 2021, houve uma baixa na produção em regiões na América do Norte e conseqüentemente um aumento no preço do acetileno. Essa baixa foi ocasionada pelas tempestades de inverno que interromperam 7,4% da produção de Gás Natural Liquefeito (GNL) na região, levando a uma escassez crítica e reduzindo a produção de acetileno que depende da disponibilidade de GNL. Com isso houve uma diminuição na exportação, fazendo com que a Europa não tivesse

matéria-prima suficiente para produção de produtos químicos derivados do acetileno, tais como o BDO e o THF.

Já na Ásia, o mercado permaneceu estável, mesmo com a diminuição na produção devido aos feriados lunares chineses, pois vários importadores mantiveram seus estoques altos com antecedência.

De julho à setembro de 2021, apesar das incertezas da 2ª onda de COVID-19, o mercado na América do Norte retomou seu crescimento nas indústrias de uso final. Entretanto a exportação de Carboneto de Cálcio da China estava limitada devido às regulamentações governamentais para economia de energia.

Em dezembro de 2021, houve uma reação em cascata nos EUA devido a demanda por carvão aumentar em 9,4%, desencadeando um aumento no consumo de acetileno, visto que este é utilizado na mineração. (**AMERICAN CHEMICAL COUNCIL, 2022**).

1.2 Objetivos a serem alcançados

O objetivo principal deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) é aplicar a metodologia do HAZOP ao processo de fabricação do acetileno via reação do carbeto de cálcio com a água;

Como objetivos secundários deste TCC tem-se:

- a) Avaliar o impacto causado pelo fechamento indevido de válvula de controle instalada na saída do gerador de acetileno sobre a temperatura de operação do equipamento; e
- b) Avaliar o impacto causado pelo fechamento indevido de válvula de controle instalada na saída do gerador de acetileno sobre a pressão de operação do equipamento.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O processo de fabricação do acetileno (C_2H_2) foi escolhido como tema de estudo deste trabalho devido a sua importância no mercado brasileiro como um produto químico que é empregado nos mais diversificados setores da indústria (ABIQUIM,2022).

2.1 Aspectos históricos relacionados à fabricação do acetileno

A produção de produtos químicos a partir do petróleo alcançou proporções enormes a partir da 1ª guerra mundial, com o surgimento da indústria petroquímica, a qual ocupa uma posição de destaque no mercado até os nossos dias.

Desenvolvido na década de 30 pelo grupo Lummus, líder no mercado mundial e constituindo-se naquela época em excepcional inovação técnica, o **processo Wulff** contribuiu para o incremento da fabricação de olefinas pela pirólise de hidrocarbonetos. Em nosso país, a Union Carbide do Brasil – subsidiária da Union Carbide Corporation, que era a detentora da tecnologia empregada no referido processo – instalou um forno de pirólise baseado naquele processo em sua fábrica localizada no complexo industrial de Cubatão, Estado de São Paulo, que era usada para fabricar polietileno (**RQI, 1969**).

Criado em 1930, o **processo Wulff** somente foi aplicado industrialmente em 1950, em uma unidade industrial norte-americana da empresa Union Carbide, que produzia etileno e acetileno numa proporção entre 2:1 e 3:1. Inicialmente foi usado o etano como matéria-prima e posteriormente a nafta. O rendimento global de etileno e acetileno variava entre 39% e 51%, de acordo com a proporção entre o acetileno e o etileno.

Partindo da nafta petroquímica, o processo industrial da Union Carbide permitia a fabricação de produtos petroquímicos primários, tais como: acetileno, etileno e benzeno e dos derivados apresentados no **Quadro 2.1**.

Quadro 2.1 - Produção de petroquímicos primários e derivados

Produtos Primários	Produtos Intermediários	Produtos Finais
Acetileno	Cloreto de vinila	PVC
	Acrilonitrila	Fibra de Orlon Borracha GR-A
	Tetracloroeto de etileno	Solventes fungicidas
	Vinil acetileno	Borracha, Neoprene
Etileno	Polietileno	Fios e cabos elétricos Tubulações Embalagens Artigos domésticos Agricultura Brinquedos
	Óxido de etileno:	
	• Etanolaminas	Emulsificantes, plastificantes e detergentes
	• Etil hexanol	Plastificantes
	• Etileno cloridrina	Antraquinona
	• Etileno glicol	Plásticos, fibras
	• Hexileno glicol	Fluidos hidráulicos
	• Polietileno glicóis	Espuma de borracha
	Álcoois	Solventes
	• Acetaldeído	Ácido acético
		Anidrido acético
	Fluoretanos	Refrigerantes
	Benzeno	Estireno
Ciclo hexano / ácido adípico		Nylon
Clorobenzeno		Corantes Inseticidas
Anidrido maleico		Poliéster
Fenol		Plásticos fenólicos
		Adesivos
Nitrobenzeno		Corantes

Fonte: (RQI, 1969)

O processo Wulff apresentava algumas características interessantes, sendo especialmente projetado para craqueamento de hidrocarbonetos e posterior formação de etileno e acetileno, a saber:

1. Podia utilizar matérias-primas que variavam do etano ao gasóleo ou óleo-cru; também, podia partir de frações aromáticas e gases residuais ricos em hidrogênio;

2. No caso particular do acetileno o fato de o processo não necessitar de suprimento de oxigênio fazia com que o produto final fosse puro, sem a presença do subproduto propileno;
3. Era flexível a ponto de permitir alterações rápidas de proporções entre acetileno e etileno, de 0,5:1 até 8:1, para fazer frente a situações competitivas do mercado consumidor

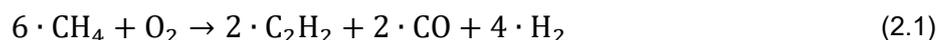
Em resumo, os fornos de pirólise Wulff – de ciclo combinado – apresentavam fases de aquecimento e craqueamento alternadas, empregando duas massas refratárias idênticas, situadas em uma zona de combustão central. Sem perdas de calor no processo, o gás craqueado era arrastado pelos produtos da reação, oferecendo maior economia na recuperação do produto e no sistema de purificação. No processo em questão, as fornalhas eram compostas de placas revestidas de refratários, sendo aquecidas até a temperatura de craqueamento por meio da queima de óleo combustível com ar.

A nafta petroquímica era misturada com vapor de água de baixa pressão e introduzida nas fornalhas duplas, ocorrendo a reação de pirolise por volta de 1.200°C e vácuo de 0,5 atm. Os fornos eram operados aos pares e controlados automaticamente por meio de sistema de gerenciamento do funcionamento dos ciclos alternados. Cada ciclo consistia na alimentação da mistura vaporizada de nafta / vapor de água de diluição a um dos fornos, no qual ocorria a reação de pirólise enquanto o outro forno estava em aquecimento. Na sequência ocorria a alternância entre os fornos. A duração de cada ciclo era curta, de modo que a temperatura era mantida praticamente uniforme e a composição do gás craqueado constante.

Considerando, ainda, o fato de que o acetileno é o alcino de maior importância industrial, é importante apresentar, de maneira breve, alguns dos processos que foram empregados para a sua produção em escala industrial. Um dos processos muito utilizados foi a reação da água sobre o carbeto de cálcio (CaC_2). Importante destacar que no período da evolução tecnológica em que a carboquímica predominou, esta rota foi a mais empregada industrialmente (**MORRISON & BOYD, 2011**).

O carbeto de cálcio era produzido pela reação entre o óxido de cálcio e o coque, realizada a altíssimas temperaturas (aproximadamente 2.000°C), em fornos elétricos (JI et al., 2014). O óxido de cálcio era fabricado a partir da pedra de cal e o coque a partir do carvão, considerando o emprego de matérias-primas abundantes na época.

Com o passar do tempo e com o advento da era da petroquímica, o processo anterior foi sendo substituído pelo processo que consistia na oxidação parcial do metano, também à altas temperaturas (da ordem de 1.500°C), como mostrado na reação apresentada na **Equação (2.1)**. importante ressaltar o fato de que a viabilidade econômica deste processo se devia à formação do monóxido de carbono e do hidrogênio, precisamente nas proporções requeridas para a produção do metanol (MORRISON & BOYD, 2011; BADISCHE ANILIN & SODA FABRIK, 2014).



2.2. Rotas de Produção

Várias rotas de produção industrial do acetileno são apresentadas na literatura (PÄSSLER et al., 2000). Porém, cada uma delas leva em consideração tanto questões de ordem econômica quanto a realidade da região em que a produção se dará.

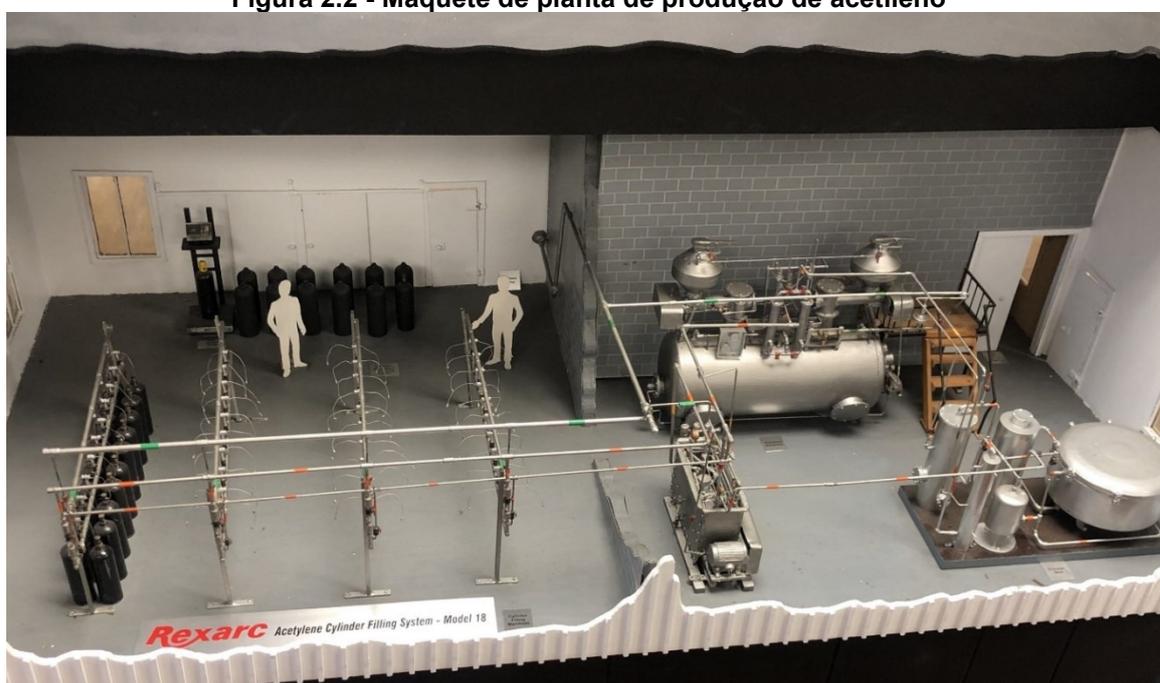
Pesquisas realizadas mostram que a rota de produção baseada no emprego do Carbeto de Cálcio (CaC_2) e da água como matérias-primas ainda é atrativa, principalmente pela simplicidade de implantação do parque produtivo e pelo menor custo de investimento e de operação, quando comparada com instalações industriais petroquímicas, que geralmente são de grande porte.

Como já anteriormente citado, para que ocorra a formação do acetileno é necessária a reação do carbeto de cálcio com a água. É importante destacar que esta reação é extremamente exotérmica, o que faz com que o controle de temperatura e de pressão sejam mandatórios, pois o acetileno é um composto altamente reativo. Caso ocorra a perda do controle das citadas variáveis de

processo, a reação torna-se perigosa (**MESSER GESELLSCHAFT MIT BESCHRÄNKTER HAFTUNG, 2017**).

A escolha da rota de produção baseada no emprego do Carbetto de Cálcio (CaC_2) e da água se justifica pelo fato de que existem no mercado empresas especializadas nesta tecnologia que poderiam atender plenamente a necessidade de produção local. Na **Figura 2.1** é apresentada uma maquete que ilustra a produção de acetileno por esta rota tecnológica (**REXARC, 2022**).

Figura 2.2 - Maquete de planta de produção de acetileno



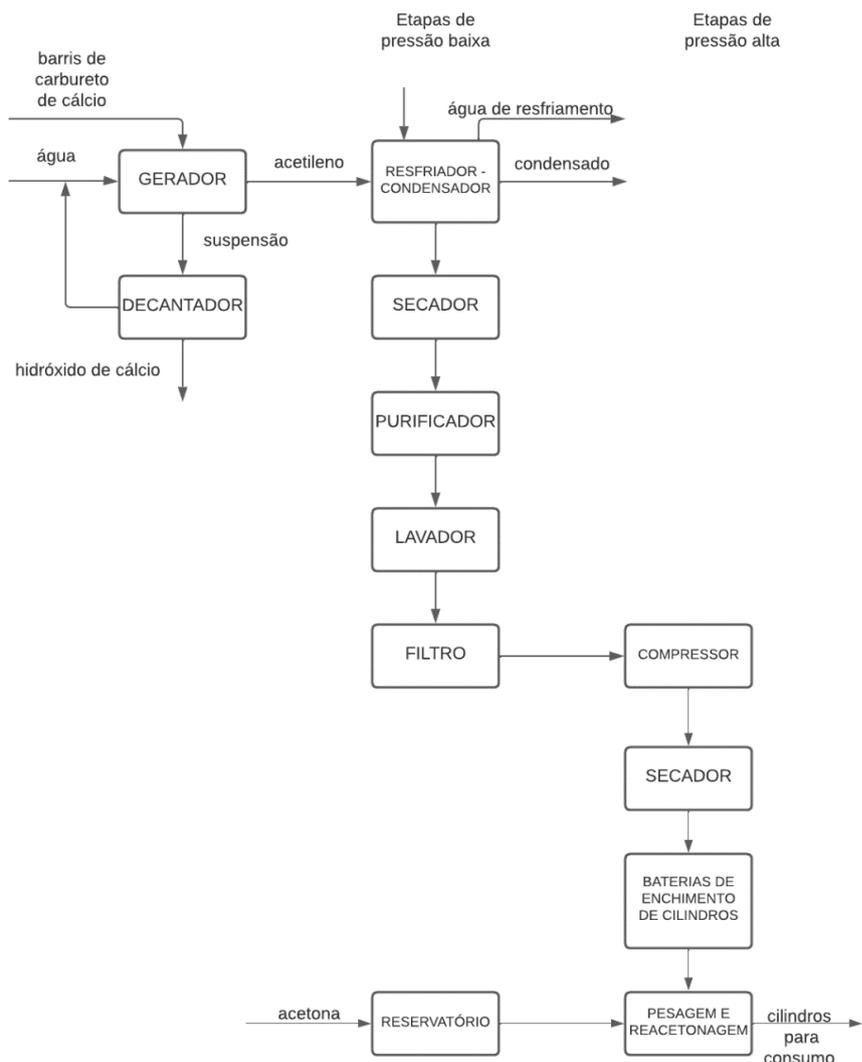
Fonte: **REXARC (2022)**

Na **Figura 2.2** é apresentado o diagrama de blocos do processo de produção do Acetileno por via úmida. Neste tipo de unidade de processamento, o carbetto de cálcio é alimentado pelo topo do gerador, já contendo a massa de água requerida para a produção do gás acetileno e do hidróxido de cálcio.

O acetileno produzido não é adequado para a compressão, portanto antes é necessário que ele seja resfriado, lavado com água para remover a amônia, purificado e seco. Em seguida é empregada uma nova secagem, para então passar por uma compressão em três estágios, seguida de posterior secagem e, por fim, ser enviado aos cilindros de armazenamento para o enchimento dos mesmos.

A acetona é utilizada como “recheio” para os cilindros de armazenagem visando a solubilização do acetileno com o objetivo de torná-lo mais estável, permitindo alcançar pressões internas mais altas e conseqüentemente uma maior quantidade armazenada por unidade de volume (**DWECK, 1982**).

Figura 2.2 - Diagrama de blocos de uma planta de produção de acetileno por via úmida



Fonte: **DWECK (1982)**

2.3 Análise de Risco

A análise de risco é comumente conhecida pela abreviatura em inglês HAZOP, que significa *Hazard and Operability Study* (Estudo de Risco e Operabilidade). Na década de 1970 foram iniciados estudos de operabilidade, baseados na hipótese de que um problema existe apenas quando há um desvio do que é normalmente esperado (**ROSSING et al., 2010**).

O HAZOP é o procedimento que gera perguntas de maneira estruturada e sistemática através do uso apropriado de um conjunto de palavras-guias aplicadas a pontos críticos do sistema em estudo (**SILVA, 2019**).

Essa análise proporciona uma metodologia sistemática, que possibilita a identificação, avaliação minuciosa e mitigação de possíveis riscos de cada parcela do processo, sobretudo de alguns pontos específicos (os chamados nós) que podem causar graves perdas humanas, ambientais e econômicas. Diferentes métodos são praticados em vários estágios durante o ciclo de vida da planta (**SWANN; PRESTON, 1995**).

Dessa forma, a saída esperada de um HAZOP é a descoberta de todos os possíveis desvios das condições normais de operação, identificando as causas responsáveis por tais desvios e as respectivas consequências. Em seguida, deve-se propor medidas para eliminar ou controlar o perigo ou para sanar o problema de operabilidade da instalação (**CROWL; LOUVAR, 2015**).

A metodologia HAZOP, engloba tanto problemas de segurança, buscando identificar os perigos que possam colocar em risco os operadores e aos equipamentos da instalação, quanto os problemas de operabilidade que embora não sejam perigosos, podem causar perda de produção ou que possam afetar a qualidade do produto ou a eficiência do processo.

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizada a metodologia HAZOP com a finalidade de mapear e avaliar os principais desvios no processo de produção de Acetileno por via úmida. Além disso, por se tratar de um método minucioso, foi possível estudar e estruturar possíveis ações de prevenção desses perigos a fim de evitar acidentes.

Com base nas orientações apresentadas em **Gedraite (2019)**, foi realizada a subdivisão do sistema em nós (pontos de estudos) sendo o nó de interesse o localizado na tubulação de saída de acetileno.

Através do programa Microsoft Office Excel™, foi elaborada a planilha de Análise de Perigos e Operabilidade, contendo as palavras guia, desvios, causas, consequências e providências dos riscos estudados. Os resultados do HAZOP estão apresentados na Seção 4 deste trabalho.

Para a Análise de Risco é considerada uma planta com capacidade para produzir 8,5 m³/h de acetileno a 27°C e 700 mmHg. A massa de carbeto de cálcio usada como base de cálculo para atender à produção é de 150 kg, com pureza de 100%.

Aplicando um balanço de massa para o acetileno no volume de controle definido pelo gerador de acetileno propriamente dito, pode-se escrever a **Eq. (3.1)**, a qual permitirá calcular a taxa de produção do gerador de acetileno em função do tempo.

$$w_2 - w_1 + \frac{dM}{dt} = R_{C_2H_2} \quad (3.1)$$

Considerando que o acetileno produzido não permaneça no interior do gerador, pode-se assumir que não haja acúmulo de C_2H_2 , em função do tempo, no volume de controle. Portanto, $\frac{dM}{dt} = 0$. Pode-se, também, afirmar que a vazão mássica de acetileno alimentada ao reator em função do tempo seja nula, uma vez que o carregamento dos reagentes no reator será assumido ser descontínuo (reator

operando em batelada). Neste cenário, a **Eq. (3.1)** pode ser reescrita como apresentado na **Eq. (3.2)**.

$$w_2 = R_{C_2H_2} \quad (3.2)$$

É necessário determinar o valor da vazão mássica de acetileno que deixa o volume de controle. Para tanto é aplicada a equação de Clapeyron ao sistema em estudo, como apresentado na **Eq. (3.3)**.

$$P \cdot \dot{V} = \frac{w_2}{MM} \cdot R \cdot T \quad (3.3)$$

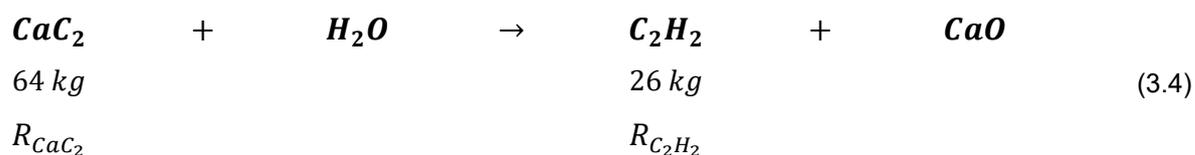
Substituindo os valores informados anteriormente na **Eq. (3.3)**, depois da conversão de unidades para assegurar homogeneidade dimensional da mesma, resulta a **Eq. (3.3.a)**.

$$\frac{700}{760} \cdot 8.500 = \frac{w_2}{26} \cdot 0,082 \cdot (27 + 273,15) \quad (3.3.a)$$

Resolvendo a **Eq. (3.3.a)** pode-se calcular o valor da vazão mássica de C_2H_2 que deixa o gerador de acetileno.

$$w_2 = 8,27 \text{ kg/h}$$

Uma vez conhecido o valor da taxa de geração do acetileno e com base na estequiometria da reação, pode-se calcular a taxa de consumo de Carbetto de Cálcio, como apresentado na **Eq. (3.4)**.



Portanto, com base na **Eq. (3.4)**, pode-se escrever a **Eq. (3.4.a)**, a qual permite calcular o valor da taxa de consumo de Carbetto de Cálcio.

$$R_{CaC_2} = \frac{64}{26} \cdot R_{C_2H_2} \cong 20,36 \frac{kg}{h} \quad (3.4.a)$$

Uma vez conhecida a taxa de consumo do Carbetto de Cálcio, pode-se calcular o tempo de funcionamento do gerador de acetileno a partir da massa inicial de Carbetto de Cálcio usada na batelada, como apresentado na **Eq. (3.5)**.

$$\Delta t_{batelada} = \frac{M_{0,CaC_2}}{R_{CaC_2}} = \frac{150 \text{ kg}}{20,36 \frac{kg}{h}} \cong 7,37 \text{ h} \quad (3.5)$$

Aplicando um balanço global de energia no volume de controle definido pelo gerador de acetileno propriamente dito, pode-se escrever a **Eq. (3.6)**, a qual permitirá calcular a taxa de produção do gerador de acetileno em função do tempo.

$$\dot{E}_1 - \dot{E}_2 + \dot{E}_{gerada} = \frac{dE}{dt} \quad (3.6)$$

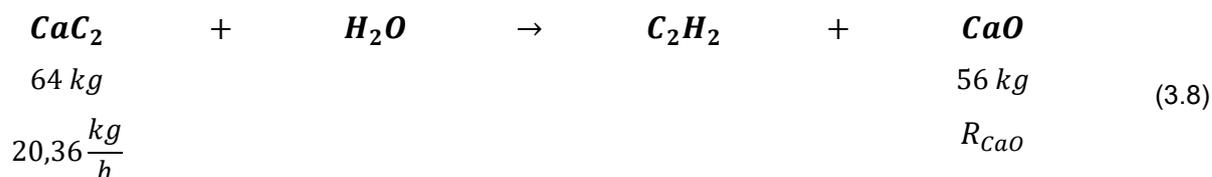
Considerando que não existe a alimentação de energia no início da batelada e que cada parcela de energia citada na **Eq. (3.6)** possa ser escrita em função das quantidades e temperaturas envolvidas no estudo, pode-se reescrever a **Eq. (3.6)** como apresentado na **Eq. (3.6.a)**.

$$-W_2 \cdot \bar{c}_p \cdot T_{gerador} + \tilde{R}_{Ca(OH)_2} \cdot \Delta H_r^\circ = M_{sol. Ca(OH)_2} \cdot \bar{c}_{p, H_2O} \cdot \frac{dT_{gerador}}{dt} \quad (3.6.a)$$

O número de mols de CaC_2 alimentado ao gerador é calculado com base na massa inicial deste elemento na batelada, como apresentado na **Eq. (3.7)**.

$$n^o \text{ mols}_{CaC_2} = \frac{150 \text{ kg}}{26 \frac{kg}{kmol}} \cong 5,77 \text{ kmols} \cong 5.769,23 \text{ mols} \quad (3.7)$$

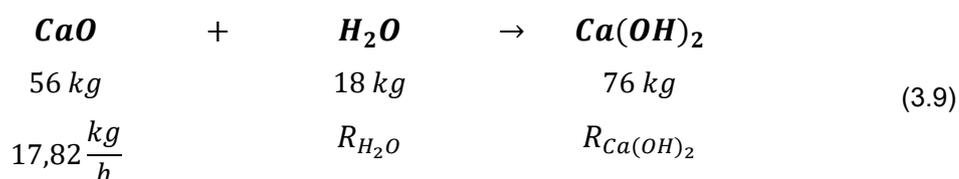
Uma vez conhecido o valor da taxa de consumo do CaC_2 e com base na estequiometria da reação, pode-se calcular a taxa de produção do Óxido de Cálcio, como apresentado na **Eq. (3.8)**.



Portanto, com base na **Eq. (3.8)**, pode-se escrever a **Eq. (3.8.a)**, a qual fornece o resultado desejado.

$$R_{CaO} = \frac{56}{64} \cdot 20,36 \cong 17,82 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cong 0,00495 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (3.8.a)$$

A estequiometria da reação de obtenção do Ca(OH)_2 é apresentada na **Eq. (3.9)**.



Uma vez conhecido o valor da taxa de consumo do CaO e com base na estequiometria da reação, pode-se calcular a taxa de produção do Ca(OH)_2 , como apresentado na **Eq. (3.9.a)**.

$$R_{Ca(OH)_2} = \frac{76}{56} \cdot 17,82 \cong 24,18 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cong 0,00672 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (3.9.a)$$

A quantidade de *sol.* Ca(OH)_2 produzida no interior do gerador de C_2H_2 pode ser calculada considerando a duração da batelada, como apresentado na **Eq. (3.10)**.

$$M_{Ca(OH)_2} = R_{Ca(OH)_2} \cdot \Delta t_{batelada} \cong 24,18 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 7,37 \text{ h} \cong 178,21 \text{ kg} \quad (3.10)$$

A quantidade de calor por unidade de tempo posta em jogo na reação é calculada com base nos valores das entalpias de formação dos reagentes e do produto formado na reação de hidratação do Óxido de Cálcio. Sabe-se que a reação é exotérmica e que as entalpias de formação são apresentadas na **Tabela 3.1**.

Tabela 3.1 - Entalpias de formação

Componente	Valor (kJ/mol)
$\Delta H_{f,Ca(OH)_2}^\circ$	- 987,0
$\Delta H_{f,CaO}^\circ$	- 285,5
$\Delta H_{f,H_2O}^\circ$	- 635,5

O cálculo do valor de ΔH_r° é apresentado na **Eq. (3.11)**.

$$\Delta H_r^\circ = \Delta H_{f,Ca(OH)_2}^\circ - \Delta H_{f,CaO}^\circ - \Delta H_{f,H_2O}^\circ \quad (3.11)$$

ou seja,

$$\Delta H_r^\circ = -987,7 - (-285,5) - (-635,5) \cong -66,7 \frac{kJ}{mol} \cong 66.700 \frac{J}{mol} \quad (3.11.a)$$

Retomando a **Eq. (3.6.a)** e substituindo os valores obtidos anteriormente, pode-se escrever a **Eq. (3.12)**. A referida equação é dimensionalmente homogênea, sendo cada termo expresso em J/h.

$$-8,27 \cdot 1740 \cdot T_{gerador} + 66.700 \cdot \tilde{R}_{Ca(OH)_2} = M_{sol. Ca(OH)_2} \cdot 4.187 \cdot \frac{dT_{gerador}}{dt} \quad (3.12)$$

A $M_{sol. Ca(OH)_2}$ formada é obtida pela soma da M_{H_2O} com a M_{CaO} produzida na reação. Neste trabalho ela é avaliada de maneira aproximada, considerando que a $M_{sol. Ca(OH)_2}$ seja aproximadamente constante durante a reação.

A estequiometria da reação de consumo de H_2O já foi apresentada na **Eq. (3.9)**. Uma vez conhecido o valor da taxa de consumo do CaO e com base na estequiometria da reação, pode-se calcular a taxa de consumo da H_2O , como apresentado na **Eq. (3.12)**.

$$R_{H_2O} = \frac{18}{56} \cdot 17,82 \cong 5,73 \frac{kg}{h} \cong 0,0016 \frac{kg}{s} \quad (3.12)$$

A M_{H_2O} alimentada ao gerador de C_2H_2 pode ser calculada considerando a duração da batelada, como apresentado na **Eq. (3.13)**.

$$M_{H_2O} = R_{H_2O} \cdot \Delta t_{batelada} \cong 5,73 \frac{kg}{h} \cdot 7,37 h \cong 42,23 kg \quad (3.13)$$

Com base no anteriormente exposto, a massa $M_{sol. Ca(OH)_2}$ será igual à soma da M_{H_2O} consumida no gerador com a massa de $M_{Ca(OH)_2}$ produzida, como apresentado na **Eq. (3.14)**.

$$M_{sol. Ca(OH)_2} = M_{Ca(OH)_2} + M_{H_2O} \cong 220,44 kg \quad (3.14)$$

Retomando a **Eq. (3.12)** e substituindo o valor obtido anteriormente para a $M_{sol. Ca(OH)_2}$, pode-se escrever a **Eq. (3.15)**, a qual é resolvida na sequência.

$$-8,27 \cdot 1.740 \cdot T_{gerador} + \frac{6,72}{76} \cdot 66.700 = 220,44 \cdot 4.187 \cdot \frac{dT_{gerador}}{dt} \quad (3.15)$$

Rearranjando os termos, resulta a **Eq. (3.16)**, que deve ser resolvida para se obter o valor da temperatura no interior do gerador de C_2H_2 .

$$\frac{220,44 \cdot 4.187}{8,27 \cdot 1.740} \cdot \frac{dT_{gerador}}{dt} + T_{gerador} = \frac{66.700}{8,27 \cdot 1.740} \cdot \tilde{R}_{Ca(OH)_2} \quad (3.16)$$

ou seja,

$$\frac{T_{gerador}(s)}{\tilde{R}_{Ca(OH)_2}(s)} = \frac{4,64}{64,14 \cdot s + 1} \quad (3.16.a)$$

Resolvendo a função de transferência apresentada na **Eq. (3.16.a)**, para uma variação brusca no valor de $\tilde{R}_{Ca(OH)_2}$, que considera que não existia a produção de $Ca(OH)_2$ antes do início da reação de produção do C_2H_2 , resulta a **Eq. (3.16.b)**.

$$T_{gerador}(s) = \frac{4,64}{64,14 \cdot s + 1} \cdot \frac{24,18 \cdot 1.000}{s} \quad (3.16.b)$$

ou seja,

$$T_{gerador}(s) = \frac{23,02}{s \cdot (s + 0,016)} \quad (3.16.b)$$

portanto,

$$T_{gerador}(t) = 25 + 1.438,75 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{64.14}}) \quad (3.16.c)$$

Com base na **Eq. (3.16.c)** e considerando o tempo de operação de 7,37 horas anteriormente definido para cada batelada, pode-se obter o valor da temperatura no gerador ao final do período de reação, como apresentado na **Eq. (3.17)**.

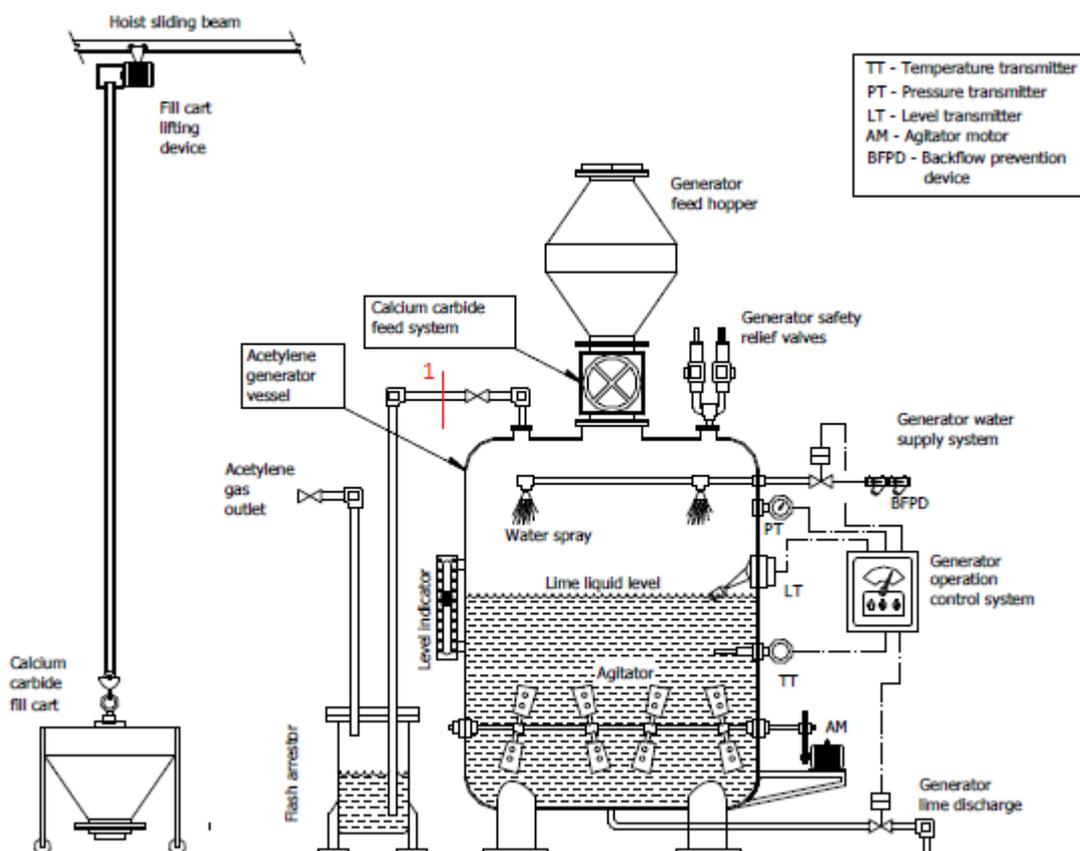
$$T_{gerador}(t = 7,37 \text{ h}) = 185,2^{\circ}\text{C} \quad (3.17)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise de HAZOP parcial do gerador

Na **Figura 4.1** é apresentada a representação esquemática simplificada de um gerador de C_2H_2 , considerando as principais variáveis de processo envolvidas na análise, a saber: a quantidade de C_2H_2 alimentada por batelada, a quantidade de água alimentada por batelada, a pressão de operação do gerador de C_2H_2 e a temperatura de operação do equipamento.

Figura 4.1 - Representação esquemática do gerador de C_2H_2



Fonte: ASIA INDUSTRIAL GASES ASSOCIATION (2022)

Durante as etapas de partida e parada do gerador de C_2H_2 , o controle da pressão e da temperatura, tem um papel fundamental para o funcionamento.

O nó de interesse para este trabalho é o nó (1), localizado na tubulação de saída de C_2H_2 .

No **Quadro 4.1** é apresentado o HAZOP do reator, objeto de estudo deste trabalho, levando em consideração as possíveis falhas do processo e as respectivas ações mitigatórias para as variáveis consideradas.

Quadro 4.1 – HAZOP parcial do gerador de C_2H_2

Análise de Perigos e Operabilidade				
Unidade: Produção de acetileno				
Sistema: Gerador de C_2H_2			Equipe: Marina Santos Rodrigues	Data: 16/08/2022
Parâmetro: Vazão de acetileno			Nó: 1	Página: 01
Palavra guia	Desvio	Causas	Consequências	Providências
Nenhuma	Ausência de vazão no nó.	<ol style="list-style-type: none"> Falha no funcionamento do gerador de C_2H_2; e Falha completamente fechada da válvula de controle. 	<ol style="list-style-type: none"> Não alimentar o gerador de C_2H_2 com a massa requerida de CaO; e Não deixar o reator operacional. 	<ol style="list-style-type: none"> Instalar chave de fluxo na tubulação de saída do gerador de C_2H_2; Instalar medidor de vazão de C_2H_2 com alarme de vazão muito baixa.
Menos	Menos vazão no nó.	<ol style="list-style-type: none"> Problema no funcionamento da válvula de controle; e Problema no funcionamento do gerador de C_2H_2; 	<ol style="list-style-type: none"> Aumentar a pressão no interior do gerador de C_2H_2; Aquecer o gerador de C_2H_2 mais rapidamente do que o permitido; e Não deixar o reator operacional. 	<ol style="list-style-type: none"> Instalar medidor de vazão com alarme de vazão baixa; Instalar medidor de temperatura no reator, com alarme de temperatura alta.
Mais	Mais vazão no nó	<ol style="list-style-type: none"> Falha completamente aberta da válvula de controle; e Problema no funcionamento do gerador de C_2H_2. 	<ol style="list-style-type: none"> Não regular a vazão de C_2H_2 produzido; e Não deixar o reator operacional. 	<ol style="list-style-type: none"> Instalar chave de fluxo na tubulação de saída do gerador de C_2H_2; e Instalar medidor de vazão com alarme de vazão alta.

Quadro 4.1– HAZOP parcial do gerador de C_2H_2 (cont.)

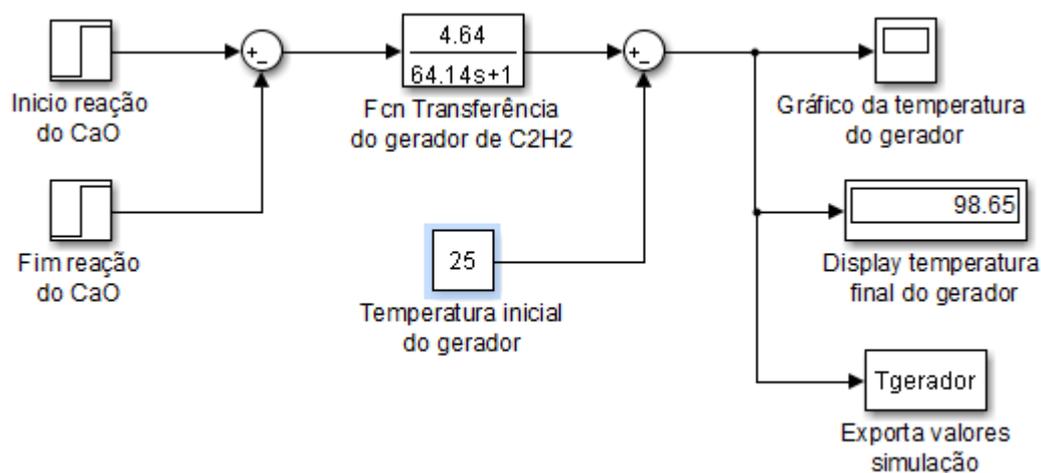
Análise de Perigos e Operabilidade				
Unidade: Produção de acetileno				
Sistema: Gerador de C_2H_2			Equipe: Marina Santos Rodrigues	Data: 16/08/2022
Parâmetro: Temperatura do acetileno			Nó: 1	Página: 02
Palavra guia	Desvio	Causas	Consequências	Providências
Nenhuma	Ausência de temperatura no nó.	1. Nenhuma alimentação de CaO ao gerador de C_2H_2 .	1. Não alimentar o gerador de C_2H_2 com a massa requerida de CaO ; e 2. Não deixar o reator operacional.	1. Instalar alarme de falha do sistema de alimentação de CaO ; e 2. Instalar medidor de temperatura no reator, com alarme de temperatura alta
Menos	Menos temperatura no nó.	1. Pouca alimentação de CaO ao gerador de C_2H_2 .	1. Alimentar o gerador de C_2H_2 com menor massa de CaO do que a requerida; e 2. Não deixar o reator operacional.	1. Instalar alarme de falha do sistema de alimentação de CaO , acusando vazão baixa; 2. Instalar medidor de temperatura no reator, com alarme de temperatura baixa.
Mais	Mais temperatura no nó	1. Muita alimentação de CaO ao gerador de C_2H_2 .	1. Alimentar o gerador de C_2H_2 com maior massa de CaO do que a requerida; e 2. Não deixar o reator operacional.	1. Instalar alarme de falha do sistema de alimentação de CaO , acusando vazão alta; e 2. Instalar medidor de temperatura no reator, com alarme de temperatura alta.

4.2 Considerações sobre os cenários de falha estudados

Dentre os cenários de falha estudados, aquele que apresenta maior interesse é o que considera a falha na condição fechada da válvula de controle instalada na saída do gerador de C_2H_2 , uma vez que proporcionará o aumento da temperatura e da pressão no interior do equipamento.

Foi realizada a simulação usando o programa Matlab/Simulink™ para representar o comportamento da temperatura com o tempo de reação. O diagrama de simulação é apresentado na **Figura 4.2**.

Figura 4.2 - Diagrama de simulação do comportamento da temperatura



Fonte: Elaboração própria.

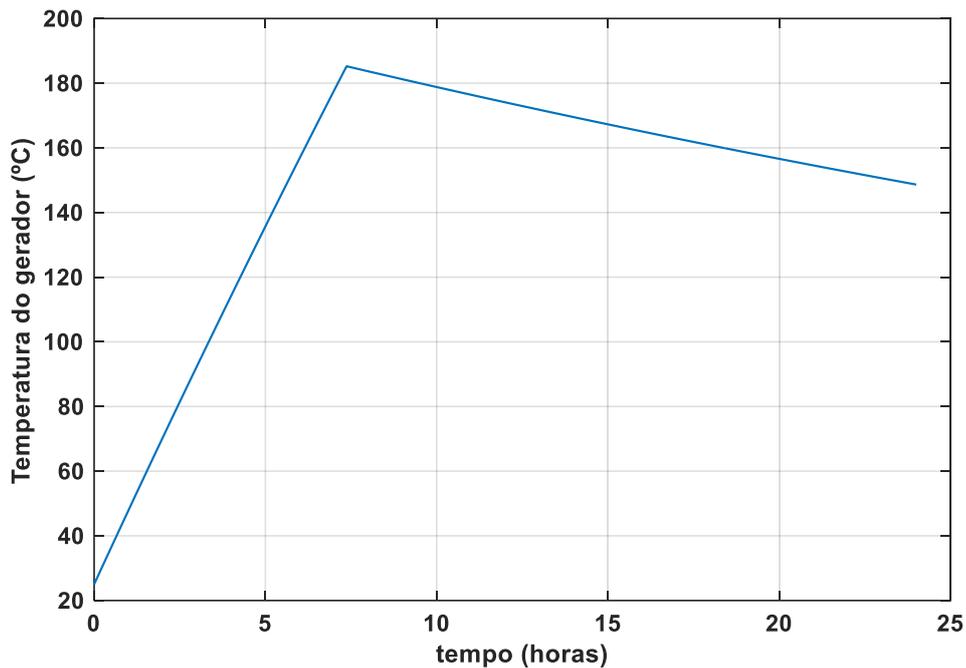
O comportamento da temperatura no interior do gerador de C_2H_2 , é apresentado na **Figura 4.3**, considerando os parâmetros operacionais usados na Seção 3 deste TCC.

O tempo de simulação foi de aproximadamente 24 horas, considerando um dia de operação. Contudo, é sabido que a reação dura aproximadamente 8 horas. Assim, a temperatura no interior do gerador ao final da reação seria aproximadamente igual a 185°C , ocasião em que todo o CaO teria reagido. A partir deste instante, a temperatura do gerador de C_2H_2 iria diminuindo por convecção natural. Na simulação do comportamento da temperatura durante a etapa de

reação, o gerador foi assumido tendo comportamento adiabático, tendo sido desprezadas as perdas de calor através das paredes do equipamento.

Foi verificado que o aumento do valor da temperatura não foi relevante a ponto de atingir o valor considerado para que ocorra a autoignição do C_2H_2 ($299^\circ C$).

Figura 4.3 - Comportamento da temperatura no gerador de Acetileno



Fonte: Elaboração própria.

O aumento no valor da pressão interna do gerador de C_2H_2 foi avaliado com base na eq. de Clapeyron, como apresentado na **Eq. (4.1)**, considerando que o volume ocupado pelo C_2H_2 praticamente não varia com o tempo.

$$\Delta P \cdot (V_{gerador} - V_{sol. Ca(OH)_2}) = \frac{M_{C_2H_2}}{MM_{C_2H_2}} \cdot R \cdot \Delta T \quad (4.1)$$

Na **Eq. (4.1)** foi usada a seguinte nomenclatura:

ΔP	=	Varição de pressão no gerador de C_2H_2	(atm)
$V_{gerador}$	=	Volume interno do gerador de C_2H_2 (1.500)	(L)
$V_{sol. Ca(OH)_2}$	=	Volume ocupado pela <i>sol. Ca(OH)₂</i> no gerador	(L)
$M_{C_2H_2}$	=	Massa de C_2H_2 produzida na batelada	(g)
$MM_{C_2H_2}$	=	Massa molecular de C_2H_2 (26)	(g/mol)

R	=	Constante universal dos gases (0,082)	($atm \cdot L/mol \cdot K$)
ΔT	=	Variação de temperatura no gerador de C_2H_2	(K)

A massa de C_2H_2 produzida na batelada pode ser calculada como apresentado na **Eq. (4.2)**, considerando as informações apresentadas na Seção 3 deste TCC.

$$M_{C_2H_2} = 8,27 \frac{kg}{h} \cdot 7,37 h \cong 60.949,90 g \quad (4.2)$$

De maneira análoga, o volume ocupado pela *sol. Ca(OH)₂* no gerador de C_2H_2 pode ser calculado com base na massa de *sol. Ca(OH)₂* produzida e no valor da densidade da solução resultante. O cálculo do valor da densidade da solução é apresentado na **Eq. (4.3.b)**.

$$\rho_{sol. Ca(OH)_2} = \rho_{Ca(OH)_2} \cdot x_{Ca(OH)_2} + \rho_{H_2O} \cdot x_{H_2O} \quad (4.3)$$

ou seja,

$$\rho_{sol. Ca(OH)_2} = 2.210 \cdot \frac{178,21}{220,44} + 1.000 \cdot \frac{42,23}{220,44} \quad (4.3.a)$$

portanto,

$$\rho_{sol. Ca(OH)_2} = 1.978,20 \frac{kg}{m^3} \quad (4.3.b)$$

Assim, o volume ocupado pela *sol. Ca(OH)₂* no gerador de C_2H_2 é calculado como apresentado na **Eq. (4.4)**.

$$V_{sol. Ca(OH)_2} = \frac{M_{sol. Ca(OH)_2}}{\rho_{sol. Ca(OH)_2}} = \frac{220,44}{1.978,20} \cong 111,43 L \quad (4.4)$$

Voltando à **Eq. (4.2)** e substituindo-se os valores previamente conhecidos e, também, aqueles calculados, tem-se o valor da variação de pressão no interior do gerador de C_2H_2 , como apresentado na **Eq. (4.5)**.

$$\Delta P \cdot (1.500 - 111,43) = \frac{60.949,90}{26} \cdot 0,082 \cdot (185 - 25) \quad (4.5)$$

ou seja,

$$\Delta P = 22,14 \text{ atm} \quad (4.5.a)$$

5 CONCLUSÃO

Os objetivos definidos para o TCC foram alcançados, sendo que o estudo desenvolvido neste trabalho permitiu avaliar o impacto de alguns cenários de falha sobre a operação de um gerador C_2H_2 típico.

Este estudo se constituiu em uma etapa preliminar para uma análise mais aprofundada sobre o tema, que envolveria o projeto detalhado do equipamento, considerando diferentes taxas de produção.

O impacto mais relevante foi aquele causado pelo fechamento indevido de válvula de controle instalada na saída do gerador de acetileno, especificamente sobre a pressão interna do equipamento.

A variação da temperatura não foi tão significativa, haja vista que o valor alcançado no interior do gerador de acetileno está muito aquém do valor limite de autoignição apresentado na literatura.

É sugerida a continuação dos estudos realizados, visando quantificar de maneira mais precisa o comportamento da pressão e da temperatura no interior do gerador de acetileno, considerando o emprego de simuladores de plantas inteiras de modo a permitir uma análise mais abrangente do tema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIQUIM. **O desempenho da indústria química brasileira – 2022**. Disponível em: < <https://abiquim.org.br/industriaQuimica> > Acesso em: 14/07/2022

ASIA INDUSTRIAL GASES ASSOCIATION. **Mechanical integrity of generator systems in acetylene plants**. Asia Industrial Gases Association, ed. 121, ano 2022. Disponível em: <https://www.asiaiga.org>

American Chemical Council. **Produção global de produtos químicos**. Disponível em: <<https://www.americanchemistry.com/>> Acesso em: 08/07/2022

BADISCHE ANILIN & SODA FABRIK AND ACETYLENE. **50 Years of Natural Gas based Acetylene Production – Now the Only Clean Technology for Acetylene Production**. Germany. 22 May 2014. Disponível em: <https://tufreiberg.de/sites/default/files/media/professur-fuer-energieverfahrenstechnik-und-thermischerueckstandsbehandlung-16460/publikationen/2014-19-1.pdf>. p. 3-5.

CHEMANALYST. **Acetylene Market Analysis: Plant Capacity, Production, Operating Efficiency, Technology, Demand & Supply, End-User Industries, Distribution Channel, Regional Demand, 2015-2030**. Disponível em: <<https://www.chemanalyst.com/industry-report/acetylene-market-628> > Acesso em: 08/07/2022

CONSELHO ADMINISTRATIVO DE DEFESA ECONÔMICA. **Parecer nº 5/2018/CGAA4/SGA1/SG. Requerentes: Praxair, Inc. e Linde AG. Fusão. Mercados regionais de gases industriais e especiais fornecidos a granel e por cilindros**. Brasília: Sistema Eletrônico de Informação, 4 Mai. 2018. https://sei.cade.gov.br/sei/modulos/pesquisa/md_pesq_documento_consulta_externa.php?DZ2uWeaYicbuRZEFhBtn3BfPLlu9u7akQAh8mpB9yPEWwTS_vqPpDIO5JIHgQQ4leeLPNKspeHt-ITzsTba69sroP_yXPg6PyNGwMq2vBY2e0uvL1rB92Oy9AhbYh.

CONSELHO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Perfil da indústria nos estados**. Brasília, 2022. Disponível em: <<https://perfildaindustria.portaldaindustria.com.br/>> Acesso em: 09/07/2022

CROWL, D. A.; LOUVAR, J. F. **Segurança de Processos Químicos - Fundamentos e Aplicações**. 3ª ed., LTC. 2015.

DWECK, J; ZAKON, A. **Acetileno – Processos unitários inorgânicos**. Rio de Janeiro, 3 Mai. 1982. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.ambientesquimicos.eq.ufrj.br/Nosso_ambito_files/1982%20JD-AZ%20DPI-EQUFRJ%20-%20Acetileno.pdf> Acesso em: 12/07/2022

GEDRAITE, R. **Notas de aula da disciplina Segurança e Análise de Risco em Processos Industriais**. Comunicação pessoal. UFU, 2019, Uberlândia/MG.

Ji, Leiming; LIU, Qingya; LIU, Zhenyu. Thermodynamic analysis of calcium carbide production. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 53, n. 6, p. 2537-2543, 2014.

MESSER GESELLSCHAFT MIT BESCHRÄNKTER HAFTUNG. **Ficha de Informação de segurança de produto químico – FISPQ. Acetileno**. 29 Mai. 2019. Disponível em: <<https://www.messer-br.com/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/2019/08/ACETILENO.pdf>> Acesso em: 01/07/2022

MORRISON, R. T; BOYD, R. N. **Química orgânica**. 16. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2011.

NOVA CANA. **As usinas de açúcar e etanol do Brasil - Por estado**. Disponível em: https://www.novacana.com/usinas_brasil. Acesso em: 02/07/2022

PÄSSLER, Peter et al. **Acetylene**. **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**, 2000.

Processo Wulff: Nova Era para a produção de Acetileno e Oleofinas. **Revista de Química Industrial**, Rio de Janeiro, ed. 451, ano 1969, Mensal.

REXARC. **Acetylene plants**. Disponível em: <https://www.rexarc.com/acetylene-plant>. Acesso em: 28/07/2022

ROSSING, N.L.; LIND, M.; NIELS, J.; JØRGESEN, S.B. **A Functional HAZOP Methodology**. *Computers and Chemical Engineering* 34, 2010, 244-253.

SILVA, A. B. **Análise de Risco do Processo de produção de resina para tinta automotiva**. Trabalho de Conclusão de Curso. UFU, 2019, Uberlândia/MG.

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