

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
ESCOLA DE QUÍMICA

**Isabelle Freitas Fraga de Andrade**



MODELAGEM 3D DE PLANTAS QUÍMICAS: ESTUDOS DE  
CASO DA PLANTA DE FORMALDEÍDO E DA PLANTA DE  
ÁCIDO SULFÚRICO

RIO DE JANEIRO

2023

Isabelle Freitas Fraga de Andrade

MODELAGEM 3D DE PLANTAS QUÍMICAS: ESTUDOS DE CASO DA PLANTA DE  
FORMALDEÍDO E DA PLANTA DE ÁCIDO SULFÚRICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Orientador(es): Kese Pontes Freitas Alberton  
André Luís Alberton

Rio de Janeiro  
2023

### CIP - Catalogação na Publicação

A553m Andrade, Isabelle Freitas Fraga de  
Modelagem 3D de plantas químicas: estudos de caso da planta de formaldeído e da planta de ácido sulfúrico. / Isabelle Freitas Fraga de Andrade. -- Rio de Janeiro, 2023.  
83 f.

Orientadora: Kese Pontes Freitas Alberton.  
Coorientador: André Luis Alberton.  
Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Bacharel em Engenharia Química, 2023.

1. modelagem 3D. 2. processo Formox. 3. processo de contato. 4. representação de processo. I. Alberton, Kese Pontes Freitas, orient. II. Alberton, André Luis, coorient. III. Título.

Isabelle Freitas Fraga de Andrade

MODELAGEM 3D DE PLANTAS QUÍMICAS: ESTUDOS DE CASO DA PLANTA DE  
FORMALDEÍDO E DA PLANTA DE ÁCIDO SULFÚRICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Escola de Química da Universidade Federal do  
Rio de Janeiro, como parte dos requisitos  
necessários à obtenção do grau de Engenheiro  
Químico.

Aprovado em 19 de julho de 2023.

---

Kese Pontes Freitas Alberton, D.Sc., UFRJ

---

André Luís Alberton, D.Sc., UERJ

---

Marcellus Guedes Fernandes de Moraes, D.Sc., UERJ

---

Pedro Henrique Davi Constantino, Ph.D., UFRJ

Rio de Janeiro  
2023

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Shirley e Sérgio, por todo amor e apoio que me deram ao longo da vida. Obrigada por priorizarem meus estudos e por serem meu maior porto-seguro. Sem vocês eu definitivamente não teria conseguido chegar até aqui. Me orgulho de ser filha de vocês e reconheço o privilégio.

Aos meus irmãos, Gustavo e Fernanda, por estarem perto de mim desde que eu nasci, mesmo que fisicamente longe. Eu amo a nossa relação e sei que, independentemente do que aconteça, somos para sempre.

Às minhas sobrinhas Bia, Maitê e Bruna por me ensinarem a olhar a vida por outra perspectiva. Vocês me inspiram a ser uma pessoa melhor a cada dia.

Às minhas primas Letícia, Caroll e Luna por serem como irmãs para mim. Crescer com vocês e ver vocês crescendo foi e é um privilégio sem igual. Obrigada pelos puxões de orelha e pelas gargalhadas também.

Aos meus cunhados Camila e Guilherme por entrarem na família e me tratarem com tanto respeito, carinho e preocupação. Agradeço muito por a gente gente ter se encontrado.

Às minhas dindas Soraya e Monnik, ao meu dindo Sérgio e ao meu tio Fábio por me impulsionarem ao longo de toda essa trajetória, cada um elogiando, ajudando e brincando do próprio jeitinho. Amo gritar para o mundo que faço parte dessa família.

Às minhas amigas Giovanna, Diana e Jasmim por terem passado boa parte desses anos de faculdade bem na cadeira do lado. Vocês foram essenciais para que a rotina se tornasse mais leve, as matérias mais fáceis, e para que eu me sentisse motivada. Me orgulho muito de ver o quanto já alcançaram e minha maior felicidade nesse momento é poder me formar ao lado de quem foi abraço casa nos momentos mais difíceis. Um agradecimento especial à Giovanna por me dar o privilégio de conhecer cada pedacinho da sua alma em tão pouco tempo. Me surpreendi e sigo me surpreendendo com toda beleza que encontro.

À minha amiga Júlia por ter me ajudado a descobrir quem eu sou e por ter acreditado em mim desde o segundo em que a gente se conheceu. Obrigada por mudar a minha vida e por me inspirar tanto. Nossa amizade é construída com os detalhes e clichês mais lindos que eu já vi. Você é a melhor do mundo.

À minha amiga Bruna por ter me escutado com tanto amor e atenção ao longo de todos esses anos. Você me fez ter a certeza de que sempre vai existir alguém com quem a gente se identifica e se conecta profundamente. Fico feliz que minhas peculiaridades foram de encontro às suas.

Ao humilde por continuar sendo como família mesmo depois que eu saí do curso de Química. Vocês fizeram cada almoço, cada Natal, cada jogo e cada feira terem um significado único. Obrigada pela amizade sincera e pela certeza de estarmos juntos.

Aos amigos da Pimpolho, Leonardo, Isis, Barbara e Ricardo, por se fazerem presentes desde o berçário. Poder dividir a vida com vocês desde sempre é incrível e eu sou muito feliz por isso.

Às amigas do Paranapuã, Alícia, Amanda, Júlia, Juliana, Lívia, Natália, Paula, Saory e Yaisa por terem me apoiado tanto ao longo desses anos. Me orgulho muito de ver o quanto a gente cresceu e tomou rumos diferentes, mas sem perder a essência do que construímos lá atrás. Vocês são maravilhosas!

À minha amiga Sofia que, apesar de ter aparecido já no finzinho dessa jornada, foi essencial para que eu conseguisse lidar melhor com todo caos desses últimos meses. Sou muito grata pelo destino ter feito a gente se encontrar e desabafar tanto. Te levo juntinho.

Aos meus professores, Letícia, Sabrina, Rodrigo, Lourdes, Marcelo e Luiz Felipe por terem acreditado tanto em mim. Vocês me ensinaram muito além das matérias de sala de aula.

À minha orientadora Kese que me inspirou desde a primeira aula. Foi um prazer sem igual poder ouvi-la falar com tanto amor e tanta sensibilidade do que faz. Sua preocupação com os alunos e com a faculdade é linda e eu sou de verdade muito grata por poder fazer parte da sua história acadêmica. Obrigada por me ensinar, me acalmar e por fazer questão que esse trabalho desse certo.

E ao meu coorientador André, por também ter sido fundamental ao longo do desenvolvimento desse trabalho.

## RESUMO

ANDRADE, Isabelle Freitas Fraga de. **Modelagem 3D de plantas químicas: estudos de caso da planta de formaldeído e da planta de ácido sulfúrico**. Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

As plantas químicas são extremamente complexas e integradas e, por isso, sua representação visual é uma parte chave de seu entendimento. Com o avanço das tecnologias de realidade virtual e manufatura digital, os modelos tridimensionais de plantas, equipamentos e outros elementos de processo se mostram cada vez mais relevantes à comunidade da engenharia química, apesar de pouco ainda se ter mapeado na literatura sobre o tema. Assim, o objetivo deste trabalho foi desenvolver a modelagem 3D de processos empregando dois estudos de caso: (i) a planta de formaldeído via processo Formox e (ii) a planta de ácido sulfúrico via processo de contato. A construção dos equipamentos se baseou em dimensões típicas e na combinação de formas geométricas por comandos do AutoCAD, enquanto a construção das tubulações foi feita com o auxílio de um código desenvolvido em Scilab, em conjunto com comandos específicos do AutoCAD. Todas as representações, por sua vez, foram construídas no plano isométrico, o que possibilitou o trabalho em qualquer um dos três planos. O software de escolha permitiu que modelos 3D simplificados fossem obtidos para ambos os estudos de caso, levando a um resultado satisfatório sem requerer o conhecimento avançado desta ferramenta. Apesar disso, foi observado que o software apresenta limitações para alguns aspectos de modelagem 3D, sobretudo no que diz respeito à representação das tubulações.

Palavras-chave: modelagem 3D; processo Formox; processo de contato; representação de processo.

## ABSTRACT

ANDRADE, Isabelle Freitas Fraga de. **3D modeling of chemical plants: case studies for the formaldehyde plant and the sulfuric acid plant.** Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Chemical plants are extremely complex and integrated, thus their visual representation is a key part of their understanding. With the advance of virtual reality technologies and digital manufacturing, three-dimensional models of plants, equipment and other process elements are increasingly relevant to the chemical engineering community, although little has yet been mapped in the literature on this subject. Thus, the objective of this study was to develop the 3D modeling of processes using two case studies: (i) the formaldehyde plant via the Formox process and (ii) the sulfuric acid plant via the contact process. The equipment construction was based on typical dimensions and the combination of geometric shapes by AutoCAD commands, while the pipes construction was made with the aid of a code developed in Scilab, along with specific AutoCAD commands. All representations, in turn, were built on the isometric plane, which made it possible to work in any of the three planes. The software of choice allowed simplified 3D models to be obtained for both case studies, leading to a satisfactory result without requiring advanced knowledge of this tool. Despite this, it was observed that the software has limitations for some aspects of 3D modeling, especially in regard to the representation of pipes.

Keywords: 3D modeling; Formox process; contact process; process representation

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 2.1 - Representação pictórica de bomba, compressor e ventilador.
- Figura 2.2 - Representação pictórica de válvulas e turbina.
- Figura 2.3 - Representação pictórica de trocadores de calor, forno e caldeira.
- Figura 2.4 - Representação pictórica de equipamentos de separação de misturas heterogêneas.
- Figura 2.5 - Representação pictórica de equipamentos de separação de misturas homogêneas.
- Figura 2.6 - Representação pictórica de reatores.
- Figura 2.7 – Diagrama de blocos.
- Figura 2.8 - Fluxograma de processo para produção de benzeno a partir do tolueno.
- Figura 3.1 – Estrutura molecular do formaldeído.
- Figura 3.2 - Diagrama de blocos do processo Formox.
- Figura 3.3 - PFD do processo Formox.
- Figura 3.4 - Estrutura molecular do ácido sulfúrico.
- Figura 3.5 - Diagrama de blocos do processo de contato.
- Figura 3.6 - PFD do processo de contato.
- Figura 3.7 - Eixo isométrico, linhas isométricas e linhas não isométricas.
- Figura 3.8 - Sistema de coordenadas universal (WCS).
- Figura 3.8 - Criando a orientação XZ no AutoCAD.
- Figura 3.10 - Criando a orientação YZ no AutoCAD.
- Figura 3.11 - Salvamento e acesso das coordenadas do usuário em AutoCAD.
- Figura 3.12 - Construindo o tampo do reator no AutoCAD.
- Figura 3.13 - Construindo o corpo do reator no AutoCAD.
- Figura 3.14 - Construindo o corpo do reator no AutoCAD.
- Figura 3.15 - Construindo a bomba no AutoCAD.
- Figura 3.16 - Construindo o filtro no AutoCAD.
- Figura 3.17 - Construindo a torre de secagem no AutoCAD.
- Figura 3.18 - Construindo a chaminé no AutoCAD.
- Figura 3.19 - Construindo o trocador de calor no AutoCAD.
- Figura 3.20 - À esquerda os sólidos antes de estarem agrupados. À direita o objeto formado após utilização do comando union.
- Figura 3.21 - Exemplo de bocais no reator.
- Figura 3.22 - Exemplo de polilinha base conectando dois equipamentos.

Figura 3.23 - Tubulação após o uso do comando sweep.

Figura 4.1 - Vista superior da planta de formaldeído.

Figura 4.2 - Planta de formaldeído no modo de visualização 2D Wireframe do AutoCAD.

Figura 4.3 - Planta de formaldeído no modo de visualização Shades of Gray do AutoCAD.

Figura 4.4 - Vista superior da planta de ácido sulfúrico.

Figura 4.5 - Planta de ácido sulfúrico no modo de visualização 2D Wireframe do AutoCAD.

Figura 4.6 - Planta de ácido sulfúrico no modo de visualização Shades of Gray do AutoCAD.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Identificação de equipamentos no PFD.

Tabela 2.2 - Letras que designam cada tipo de equipamento no PFD.

Tabela 3.1 - Propriedades físico-químicas do formaldeído e seus pictogramas de perigo.

Tabela 3.2 - Principais componentes de cada corrente do PFD do processo Formox.

Tabela 3.3 - Propriedades físico-químicas do ácido sulfúrico e seus pictogramas de perigo.

Tabela 3.4 - Principais componentes de cada corrente do PFD do processo de contato.

Tabela 3.5 - Dimensões padrão dos equipamentos desenhados.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
2.1 PROCESSOS QUÍMICOS .....	16
2.1.1 Equipamentos de processo para modificação da pressão .....	16
2.1.2 Equipamentos de processo para transferência de calor/energia .....	17
2.1.3 Equipamentos de processo para separação de componentes .....	18
2.1.4 Equipamentos de processo para reação de componentes .....	19
2.2 REPRESENTAÇÃO DE PROCESSOS QUÍMICOS .....	20
2.2.1 Diagrama de blocos (BDF) .....	21
2.2.2 Fluxograma de processo (PFD).....	22
2.2.3 Layout de plantas.....	24
2.3 FERRAMENTAS DE GERAÇÃO DE REPRESENTAÇÕES DE PROCESSOS QUÍMICOS.....	25
2.3.1 Microsoft Visio.....	25
2.3.2 Draw.io.....	25
2.3.3 Lucidchart.....	26
2.3.4 AutoCAD.....	26
2.3.5 Aveva E3D.....	27
2.4 OS MODELOS TRIDIMENSIONAIS .....	27
2.4.1 A indústria 4.0 e os modelos tridimensionais.....	27
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>29</b>
3.1 ESTUDO DE CASO: PROCESSO DE PRODUÇÃO DO FORMALDEÍDO .....	29
3.1.1 Propriedades físico-químicas do formaldeído .....	29
3.1.2 Rotas de produção .....	31
3.1.3 Processo Formox .....	32
3.2 ESTUDO DE CASO: PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ÁCIDO SULFÚRICO .....	37
3.2.1 Propriedades físico-químicas do ácido sulfúrico .....	37
3.2.2 Óleo.....	39
3.2.3 Rotas de produção .....	39
3.2.4 Processo de contato .....	39

3.3 O USO DO AUTOCAD PARA MODELAGEM 3D DE PROCESSOS .....	45
3.3.1 <i>O desenho isométrico</i> .....	45
3.3.2 <i>O uso de diferentes coordenadas</i> .....	46
3.4 CONSTRUÇÃO DOS EQUIPAMENTOS .....	49
3.4.1 <i>Reator de leito fixo</i> .....	49
3.4.2 <i>Absorvedor</i> .....	51
3.4.3 <i>Tanque e conversor</i> .....	51
3.4.4 <i>Compressor</i> .....	51
3.4.5 <i>Bomba</i> .....	52
3.4.6 <i>Filtro</i> .....	53
3.4.7 <i>Torre de secagem</i> .....	54
3.4.8 <i>Forno e caldeira</i> .....	55
3.4.9 <i>Chaminé</i> .....	55
3.4.10 <i>Trocador de calor</i> .....	56
3.4.11 <i>Comando Union</i> .....	56
3.5 CONSTRUÇÃO DAS TUBULAÇÕES .....	57
3.5.1 <i>Criação dos bocais</i> .....	57
3.5.2 <i>Determinação das coordenadas da linha base</i> .....	58
3.5.3 <i>Uso do comando 3dpoly</i> .....	59
3.5.4 <i>Uso do comando sweep</i> .....	60
3.6 CONSTRUÇÃO DA PLANTA INDUSTRIAL EM 3D.....	60
3.6.1 <i>Tamanho padrão dos equipamentos</i> .....	61
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>63</b>
4.1 REPRESENTAÇÃO 3D DA PLANTA DO PROCESSO FORMOX.....	63
4.2 REPRESENTAÇÃO 3D DA PLANTA DO PROCESSO DE CONTATO .....	66
4.3 POR QUE DESENVOLVER MODELOS 3D? .....	69
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>70</b>
5.1 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	70
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>72</b>
<b>ANEXO A - CÓDIGO EM SCILAB UTILIZADO PARA OBTENÇÃO DAS</b>	
<b>COORDENADAS DA LINHA BASE USADA NO DESENHO DAS TUBULAÇÕES</b>	

## 1 INTRODUÇÃO

Os processos químicos e bioquímicos são responsáveis por transformar a matéria-prima em produtos de interesse (SHREVE & BRINK JR, 2012). Por esse motivo, muito se estuda na academia sobre as especificidades de cada processo, bem como sobre as formas de simulação de resultados e otimização de seu desempenho. Por outro lado, pouco se discute sobre a distribuição espacial de equipamentos e tubulações na planta, que para o ensino e treinamento de pessoal pode representar grande impacto e eficácia, além de numerosos benefícios aos aspectos de logística, operabilidade e segurança dos processos.

Diante da complexidade apresentada por uma planta química, considerando suas correntes de produto e de reagente, suas utilidades e seus equipamentos, não fica difícil perceber que descrever um processo químico na forma textual não é muito eficiente e acaba tornando inviável o entendimento de toda a integração presente nas plantas. E é por isso que a representação visual dos processos é tão relevante para os engenheiros e operadores.

Algumas formas de representação gráfica de processos são: diagrama de blocos, fluxograma de processos, fluxograma de engenharia e layout de plantas. Cada um deles apresenta um nível diferente de profundidade de informações, sendo, por isso, utilizados com objetivos distintos (TURTON et al., 2008).

Com o avanço das tecnologias da indústria 4.0, surge um interesse cada vez mais crescente em modelagem 3D de processos, já que esta leva em consideração as restrições físicas de um local e as dimensões reais dos equipamentos e tubulações através de sua distribuição espacial na planta (MORAN, 2017). É fato que os modelos tridimensionais se mostram cada vez mais necessários, o que torna preocupante o *gap* de conhecimento e a pouca quantidade de trabalhos disponíveis na literatura nesse campo (MORAN, 2015).

Nesse contexto, o principal objetivo deste trabalho foi ampliar esta discussão no âmbito da engenharia química, com o desenvolvimento de modelos 3D baseados em dois estudos de caso: (i) a planta de produção do formaldeído via processo Formox e (ii) a planta de produção do ácido sulfúrico via processo de contato. O software escolhido para construção desses modelos foi o AutoCAD, uma vez que é um software que não requer conhecimentos avançados em representação e modelagem 3D de processos e por ser de fácil acesso no meio acadêmico, tendo disponível uma versão estudante. A versão utilizada foi AutoCAD 2023.

Tais representações tridimensionais geradas no AutoCAD, por sua vez, são esboços iniciais do layout em modelagem 3D, feitos de maneira simplificada, sendo o principal foco permitir que o leitor tenha uma noção de como é a estrutura base das plantas de formaldeído e de ácido sulfúrico. Para que a construção dos modelos 3D fosse possível, utilizou-se dimensões típicas para os equipamentos envolvidos, bem como um algoritmo em Scilab para a geração das coordenadas que representam o caminho percorrido pelas tubulações no plano isométrico.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 PROCESSOS QUÍMICOS**

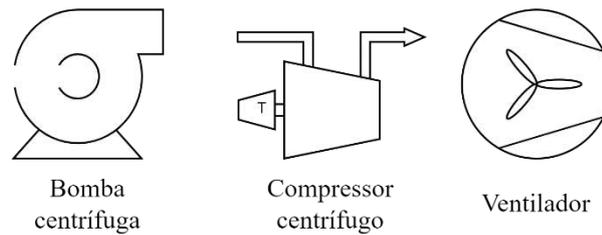
Através de transformações químicas e/ou alterações físicas, os processos químicos visam modificar a matéria de modo a obter produtos de interesse. De maneira geral, os processos consistem na formação de novos componentes por meio de reações químicas ou bioquímicas, podendo envolver mudanças no estado físico da matéria, alterações nas condições termodinâmicas (e.g., mudanças e/ou variações de temperatura e pressão) que favorecem a cinéticas das reações envolvidas, bem como operações de separação, de mistura e de transporte. É possível citar, por exemplo, a produção de ácido sulfúrico a partir de enxofre, a qual engloba reações, como a oxidação e a hidratação, e modificações físicas relacionadas ao controle de temperatura para melhor rendimento (SHREVE & BRINK JR, 2012).

A realização industrial dos processos químicos, a fim de permitir produção em maior escala, se baseia, portanto, em uma sequência coordenada de equipamentos, cada qual com suas especificações e responsável por uma ou mais etapas do todo (SHREVE & BRINK JR, 2012). Intuitivamente, é possível dividir esse universo de equipamentos em alguns grupos, a depender da sua principal função.

#### **2.1.1 Equipamentos de processo para modificação da pressão**

Os principais equipamentos para aumento da pressão das correntes são as bombas e os compressores. Enquanto as primeiras transformam trabalho mecânico em energia hidráulica, transferindo para o líquido um acréscimo de energia potencial e cinética, os últimos transformam trabalho mecânico em energia de pressão para os gases. Ambos, portanto, podem ser usados para garantir o escoamento e para compensar as perdas de carga inerentes ao processo (PONTE, 2018). Ademais, no caso específico dos gases, sopradores e ventiladores também se mostram como uma opção viável, no caso em que a potência requerida é baixa (ALBERTON, 2023).

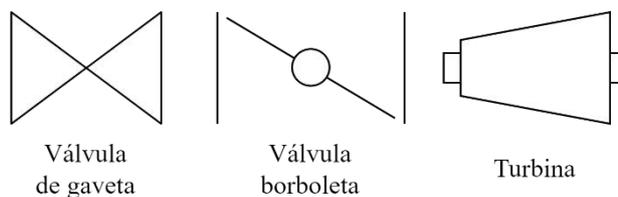
**Figura 2.1 - Representação pictórica de bomba, compressor e ventilador.**



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Para descompressão de uma corrente, por outro lado, podem ser empregadas as válvulas. Tanto para gases quanto para líquidos, estas promovem a dissipação de energia e são capazes de aliviar a pressão e direcionar o escoamento (SOUZA, 2017). Além disso, as turbinas também se mostram como uma excelente opção, uma vez que permitem que parte da energia perdida seja recuperada na forma de energia elétrica (ANDRADE, 2015).

**Figura 2.2 - Representação pictórica de válvulas e turbina.**

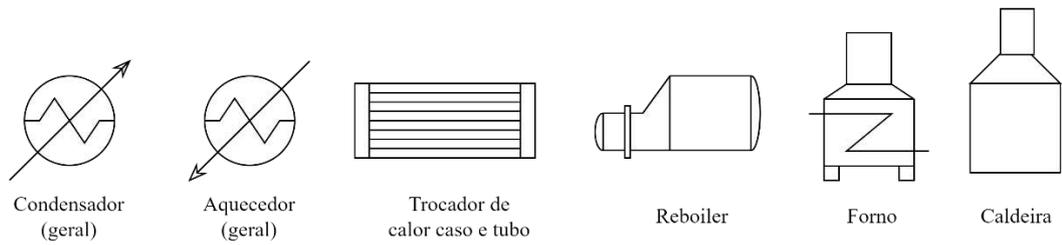


Fonte: Elaboração própria, 2023.

### 2.1.2 Equipamentos de processo para transferência de calor/energia

A transferência de calor entre fluidos é feita através dos denominados trocadores de calor. Estes podem ser classificados de acordo com seu tipo de construção e a ideia é que cada um desses tipos permita um certo arranjo de correntes, podendo elas escoarem no mesmo sentido e na mesma direção ou não. Independente do trocador, entretanto, a ideia base é a mesma: permitir que fluidos de diferentes temperaturas, separados por uma parede sólida, troquem energia entre si, de modo a manter uma temperatura desejada de corrente ou a permitir uma mudança de fase (INCROPERA & DEWITT, 2002). É possível ainda citar o caso especial dos fornos e caldeiras, nos quais ocorre a combustão e geração de um vapor capaz de aquecer a corrente de interesse (TURTON et al., 2008; ALBERTON, 2023).

**Figura 2.3 - Representação pictórica de trocadores de calor, forno e caldeira.**



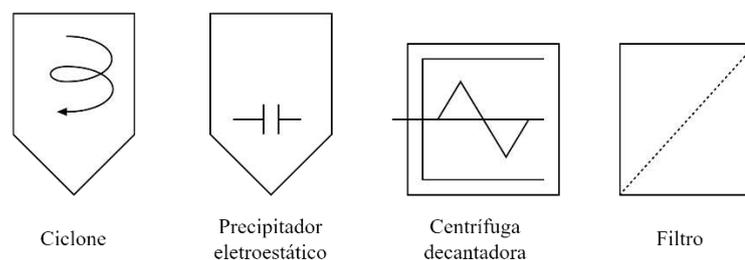
Fonte: Elaboração própria, 2023.

### 2.1.3 Equipamentos de processo para separação de componentes

Um típico processo químico é composto de uma reação principal, sendo esta precedida e sucedida de etapas de separação. Essas etapas visam purificar tanto as matérias-primas alimentadas ao processo quanto os produtos de interesse antes de serem vendidos, removendo subprodutos e reagentes não convertidos. As operações de separação, em uma planta, podem chegar a compor cerca de 70% do seu capital e custos operacionais, o que já evidencia a importância da escolha adequada do tipo de operação (WANKAT, 2012).

Os processos de separação de misturas heterogêneas apresentam tipicamente menor complexidade quando comparado aos processos de separação de misturas homogêneas. A separação de misturas heterogêneas pode se basear, por exemplo, na retenção por tamanho, na afinidade eletrostática e na ação de campo (e.g., centrífugo, elétrico, magnético ou gravitacional) (ALBERTON, 2023).

**Figura 2.4 - Representação pictórica de equipamentos de separação de misturas heterogêneas.**

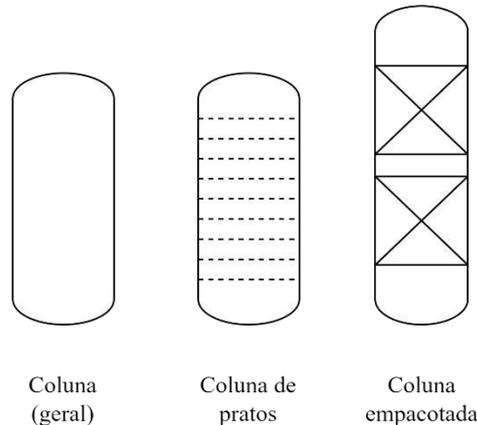


Fonte: Elaboração própria, 2023.

Por outro lado, para misturas homogêneas o processo de separação tem que lidar com os componentes que estão em uma mesma fase, adotando ou uma estratégia de mudança de fase, de modo a gerar uma mistura heterogênea, ou a estratégia de inserir no sistema uma

nova fase distinta, capaz de reter um componente de interesse. As principais operações de separação para misturas homogêneas são: absorção, esgotamento, adsorção, dessorção, troca iônica, extração líquido-líquido, cristalização, evaporação, secagem e lixiviação (ALBERTON, 2023).

**Figura 2.5 - Representação pictórica de equipamentos de separação de misturas homogêneas.**



Fonte: Elaboração própria, 2023.

#### 2.1.4 Equipamentos de processo para reação de componentes

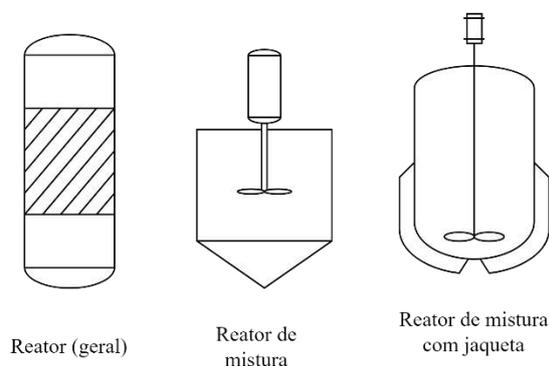
Uma reação química acontece quando moléculas de uma ou mais espécies passam por uma transformação e têm seu número e/ou estrutura de átomos modificada. Tal processo ocorre dentro dos chamados reatores ou biorreatores, os quais, em resumo, operam em batelada ou com escoamento contínuo, podendo contar com o auxílio de catalisadores para aumentar a velocidade da reação (FOGLER, 2009).

Em geral, os reatores em batelada, são usados para operações de pequena escala, como para testar novos processos ou produzir produtos de alto valor agregado. Eles não operam em estado estacionário, já que a concentração dos reagentes e produtos varia com o tempo, têm a vantagem de possibilitar altas conversões e a desvantagem de operar com altos custos e com variabilidade de produtos de batelada (FOGLER, 2009).

Os reatores com escoamento contínuo, por sua vez, normalmente operam em estado estacionário e são de três principais tipos: tanque agitado (CSTR), com escoamento empistonado (PFR) e de leito fixo (PBR). O reator CSTR, é usado para reações em fase líquida e, no caso ideal, resulta numa mistura perfeita, o que significa que temperatura,

concentração de reagentes e produtos e velocidade de reação não variam com tempo ou espaço dentro do reator. Já o reator PFR é utilizado para reações em fase gasosa. Nele os reagentes são consumidos à medida que escoam ao longo de um tubo cilíndrico, fazendo a concentração dos reagentes e produtos variarem na direção axial do reator, bem como a velocidade de reação o faz (FOGLER, 2009). Por fim, o reator PBR consiste em um reator similar ao PFR, mas recheado com catalisador, o que proporciona maior área superficial para a reação, por unidade de volume (SILVA et al., 2015).

**Figura 2.6 - Representação pictórica de reatores.**



Fonte: Elaboração própria, 2023.

## 2.2 REPRESENTAÇÃO DE PROCESSOS QUÍMICOS

Considerando o que foi abordado na Seção 2.1, não é difícil perceber que uma planta química pode ser extremamente complexa, envolvendo operações térmicas, de separação, de bombeamento, de descompressão, entre outras, além da sensibilidade do próprio sistema reacional. Descrever, portanto, um processo químico na forma textual não se mostra como a opção mais eficiente quando se trata do seu projeto, operação e controle. Além do tamanho do texto que pode facilmente requerer várias páginas para sua adequada descrição, não permitindo um entendimento “instantâneo”, a forma puramente textual torna inviável que muitas informações sejam diretamente integradas, o que é fundamental para que o leitor tenha uma visão mais acurada do todo e ao mesmo tempo dos detalhamentos do processo.

Nesse sentido, a representação gráfica dos processos é considerada grande aliada dos engenheiros; é menos provável que uma informação visual seja interpretada incorretamente, sendo a forma visual de comunicação prática e corriqueira quando se trata de processos químicos.

Alguns tipos de representação gráfica dos processos químicos e bioquímicos são: diagrama de blocos (*Block Flow Diagram – BFD*), fluxograma de processos (*Process Flow Diagram – PFD*), fluxograma de engenharia (*Piping and Instrumentation Diagram – P&ID*) e layout de plantas (TURTON et al., 2008). Dentre as representações mencionadas, o P&ID tem grande foco no detalhamento das malhas de instrumentação e controle de processos e, portanto, não será abordado neste trabalho, cujo objetivo está mais especificamente relacionado à modelagem 3D de equipamentos e tubulações de processos e sua distribuição espacial.

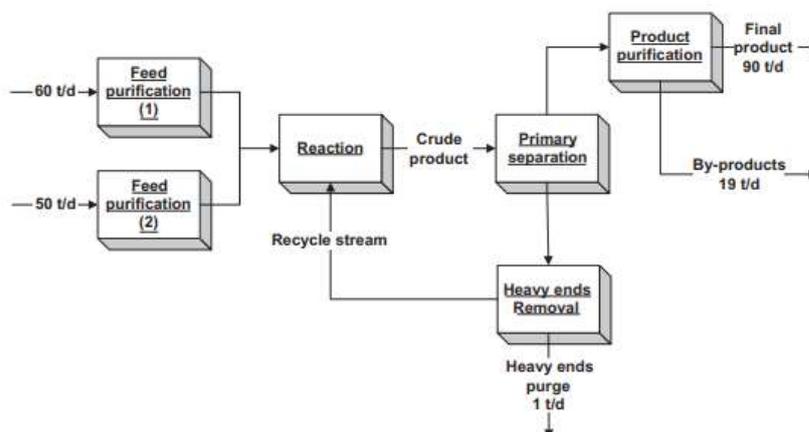
### **2.2.1 Diagrama de blocos (BDF)**

Os diagramas de blocos são as formas mais fáceis de tornar visual um processo. Trata-se de diagramas compostos por uma série de blocos, em que cada bloco representa um equipamento ou etapa do processo químico. Esses blocos, por sua vez, são conectados por correntes de entrada e saída e em geral não se preocupam em mostrar detalhes específicos dos equipamentos que representam podendo, por outro lado, ter especificadas algumas informações básicas de temperatura, pressão, composição e fluxo (TURTON et al., 2008).

Pela sua simplicidade inerente, esses diagramas são normalmente usados para treinar pessoas que não estão familiarizadas com determinada planta, além de serem uma ótima ferramenta para rascunhar e comparar alternativas de processo em estágios iniciais de estudos de viabilidade (TURTON et al., 2008).

Não há normas fixadas universalmente para esse tipo de diagrama, podendo os blocos até adotarem uma representação pictórica (figuras típicas) dos equipamentos. No geral, entretanto, o fluxo de correntes segue da esquerda para direita, saindo os líquidos para baixo e os gases para cima, de acordo a gravidade (SUTTON, 2015). A Figura 2.7 ilustra um exemplo de diagrama de blocos.

**Figura 2.7 – Diagrama de blocos.**



Fonte: (SUTTON, 2015).

### 2.2.2 Fluxograma de processo (PFD)

Os fluxogramas de processo contêm representações pictóricas de todos os equipamentos e são mais complexos e detalhados que os diagramas de blocos. Esse tipo de diagrama fornece informações de fluxo, composição, fase, temperatura, pressão, viscosidade, condutividade térmica e calor específico de todas as correntes significativas de processo, além de normalmente mostrar as utilidades empregadas, os dados específicos dos equipamentos e as principais válvulas e malhas de controle do sistema. Detalhes acerca dos instrumentos de controle, entretanto, são omitidos do diagrama final (SUTTON, 2015).

Não existe um padrão universalmente aceito para a criação dos fluxogramas de processo, mas é comum que as correntes sejam representadas seguindo um fluxo da esquerda para a direita e sejam identificadas por um número. Ademais, os equipamentos também são identificados por um número e por um nome específico, normalmente como descrito na Tabela 2.1 e na Tabela 2.2 (TURTON et al., 2008). A representação de algumas válvulas, compressores e bombas pode ser omitida caso o desenvolvedor julgue aceitável.

**Tabela 2.1 - Identificação de equipamentos no PFD.**

Representação no processo XX-YYY A/B	
XX	Letras que designam o equipamento
Y	Número que designa área do processo
ZZ	Número do equipamento da área
A/B	Indicam a presença de equipamentos idênticos em paralelo (não representados no PFD)

Fonte: Adaptado de (TURTON et al., 2008).

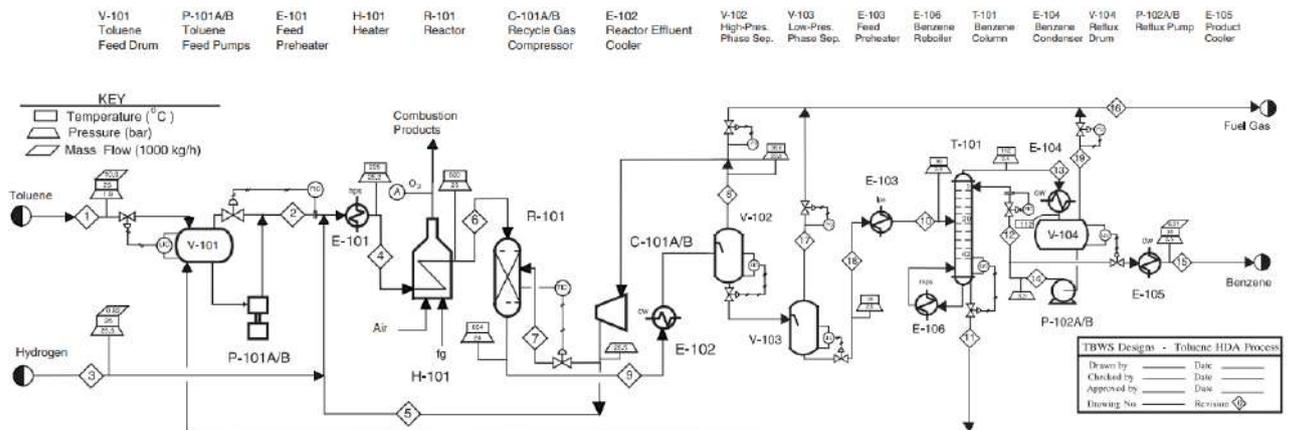
**Tabela 2.2 - Letras que designam cada tipo de equipamento no PFD.**

XX	Nome do equipamento
C	Compressor / Soprador / Ventilador / Turbina
E	Trocador de calor
F	Filtro
H	Forno / Caldeira
P	Bomba
R	Reator
T	Torre / Coluna
CH	Chaminé
TQ	Tanque

Fonte: Adaptado de (TURTON et al., 2008).

O PFD acaba sendo, portanto, o primeiro fluxograma desenhado capaz de promover um entendimento completo dos balanços mássicos e energéticos que compõem determinado processo químico, permitindo estimativas de custos de operação e estudos de viabilidade do processo (TURTON et al., 2008). A Figura 2.8 ilustra um exemplo de fluxograma de processo.

**Figura 2.8 - Fluxograma de processo para produção de benzeno a partir do tolueno.**



Fonte: (TURTON et al., 2008).

### 2.2.3 Layout de plantas

Quando se fala em layout de planta, o principal objetivo é fornecer um fluxo seguro e econômico de materiais e pessoas ao redor de uma fábrica, de modo a permitir uma produção confiável, lucrativa e socialmente aceitável de determinado produto (MORAN, 2017).

Esses layouts consistem no entendimento das restrições físicas de um local e, portanto, no entendimento das reais possibilidades de arranjo dos equipamentos da planta, considerando seu tamanho e suas interconexões, tais como tubulações, dutos, e outras conexões com e sem fio. Para tal, podem ser utilizados desenhos bidimensionais, além de modelos tridimensionais (MORAN, 2017).

Inicialmente, o layout de uma planta se baseia no fluxograma de processo (PFD) desenhado para determinado processo, sendo retrabalhado para garantir alguns critérios essenciais: (MORAN, 2017).

- Operação/construção eficiente e segura;
- Controle rápido e eficiente de materiais perigosos, se liberados;
- Uso adequado das instalações externas, como gás e eletricidade;
- Acesso e seguro e conveniente para manutenção dos equipamentos;
- Menor custo com movimentação dos materiais;
- Níveis aceitáveis de perigo e ruído para o público e meio ambiente;
- Níveis suficientes de segurança para evitar atos de vandalismo;
- Conformidade com todas as regulações pertinentes.

Dessa forma, fica evidente que um layout bem-feito tem participação fundamental no sucesso do projeto, uma vez que permite que o espaço disponível seja utilizado de maneira inteligente, tornando a planta segura de construir e operar. A disposição de todo *site* produtivo acaba sendo levada em consideração, junto com as instalações em seu entorno e o transporte de pessoas e substâncias (MORAN, 2017).

## 2.3 FERRAMENTAS DE GERAÇÃO DE REPRESENTAÇÕES DE PROCESSOS QUÍMICOS

Para elaborar os tipos de fluxograma abordados na Seção 2.2, algumas ferramentas podem ser utilizadas. Para representações uni e bidimensionais, ferramentas bastante utilizadas são o Microsoft Visio, o Draw.io. e o Lucidchart. Já para representações tridimensionais, o AutoCAD ganha destaque para plantas de menor porte e o Aveva e3D para plantas de maior porte.

### 2.3.1 Microsoft Visio

O Microsoft Visio é um software comercial para criação de diagramas de diversos tipos, como fluxogramas, organogramas, linhas do tempo, plantas baixas e diagramas de rede, permitindo a organização visual de ideias mais complexas. Neste aplicativo é possível adicionar e conectar formas, textos e imagens, além criar diagramas dinâmicos e vincular dados do Excel ou Sharepoint (MICROSOFT, 2023).

### 2.3.2 Draw.io

O Draw.io é um site gratuito *open source* que permite a criação de diagramas simples e complexos, atuando como uma alternativa aos programas pagos como o Microsoft Visio. Essa ferramenta dispõe de uma enorme variedade de bibliotecas de formas, com diversos elementos visuais, permitindo inclusive a criação de bibliotecas personalizadas. Os diagramas do Draw.io são feitos diretamente na Internet, sem a necessidade de instalar qualquer aplicativo e, para salvar os arquivos, é possível conectar o site com alguma conta do Google Drive, Dropbox, One Drive, ou ainda especificar um lugar no próprio computador (SOFTONIC, 2023).

Algumas das bibliotecas disponíveis no Draw.io são: engenharia de processos, elétrica, plantas e diagramas (SOFTONIC, 2023).

### 2.3.3 Lucidchart

O Lucidchat, assim como o Draw.io, é uma alternativa gratuita e online a programas comerciais, como o Microsoft Visio, para criação de fluxogramas. Possui diversas bibliotecas à disposição do usuário, cada qual com elementos específicos, além de permitir a integração com contas do Google, Microsoft e Azure (LUCID, 2023).

Algumas das bibliotecas disponíveis no Lucidchart são: arquitetura, engenharia de processos, equações e diagramas de circuitos.

Apesar de, no geral, ser similar ao Draw.io, apresentado na Seção 2.3.2, a biblioteca de engenharia de processos disponível no Lucidchart contém uma variedade menor de elementos, sendo limitada para elaboração de fluxogramas complexos.

### 2.3.4 AutoCAD

O AutoCAD é um software tipo CAD, do inglês *computer aided design*, amplamente utilizado em áreas como arquitetura e engenharia. É considerado um dos softwares mais completos para desenhos técnicos e projetos diversos, uma vez que a tecnologia bi ou tridimensional permite a representação fiel de especificações e medidas de plantas residenciais e industriais, além de máquinas e equipamentos, entre outros objetos (RAZOR, 2020).

Uma grande vantagem do AutoCAD consiste no fato de ser um programa universal, isto é, de ser um programa compatível com a maioria dos outros softwares existentes no mercado, o que facilita a importação e exportação de arquivos, de modo a permitir a edição de arquivos de origem variada (AMARAL, 2023).

Por outro lado, o AutoCAD produz desenhos e formas utilizando de curvas, arcos e linhas retas, os quais não podem ser editados e posicionados tão livremente quanto em outros programas de ilustração especializados (e.g., o Aveva e3D). A sobreposição de linhas e suas espessuras acabam sendo limitadas, bem como os efeitos da geometria 3D (ACERVO LIMA, 2023).

### 2.3.5 Aveva E3D

O Aveva e3D é um software comercial que apresenta uma tecnologia avançada de design tridimensional para as indústrias naval, de plantas de processo e de energia, permitindo um design 3D multidisciplinar e livre de interferências e gerando rapidamente desenhos e relatórios precisos. Uma grande vantagem é que pode ser rapidamente implementado para atender aos requisitos específicos da empresa ou projeto (AVEVA, 2023).

Mesmo sendo um software especializado no desenho de plantas, o Aveva E3D não foi escolhido para desenvolvimento do presente trabalho por exigir um conhecimento mais aprofundado em relação à modelagem tridimensional, em comparação com o conhecimento exigido pelo AutoCAD, por exemplo.

## 2.4 OS MODELOS TRIDIMENSIONAIS

Na Seção 2.3 foram apresentados dois softwares capazes de auxiliar na modelagem 3D, a qual se caracteriza por ser o processo de desenvolvimento de representações de objetos em três dimensões (SAGA, 2023). Na indústria pode ser aplicada tanto para prototipagem quanto para fabricação de peças finais e apresenta as vantagens de ter um alto nível de detalhamento, agilidade, versatilidade e personalização, além de um custo menor quando comparada a outras técnicas (KANEHIRA, 2023).

Ao pensar, por exemplo, nas formas de representação de processos, os modelos 3D podem atuar como uma representação intermediária entre o fluxograma de processos e o layout de plantas, uma vez que permitem a visualização e análise da planta no espaço tridimensional, o que, por sua vez, auxilia no desenvolvimento e na otimização de um projeto antes da fabricação de qualquer protótipo físico, ideia que vai de encontro às tendências da indústria 4.0.

### 2.4.1 A indústria 4.0 e os modelos tridimensionais

A indústria 4.0 é um conceito que engloba a automação e a integração de diversas tecnologias aplicadas à manufatura, ou seja, aplicadas à transformação de matérias-primas em produtos de valor agregado, tendo como objetivo o aumento da eficiência e produtividade. Dentre suas tecnologias encontram-se a realidade virtual, os gêmeos digitais e a manufatura digital e aditiva (BARBOSA, 2022).

A realidade virtual representa um ambiente virtual criado a partir de sistemas computacionais com o objeto de desenvolver o design de produtos sem a necessidade de prototipagem física. Já os gêmeos digitais é o nome que se dá à versão digital de um objeto físico, a qual permite uma visualização prévia e mais assertiva do funcionamento de um produto (BARBOSA, 2022).

Quando se fala de manufatura digital, este conceito se relaciona com um sistema integrado baseado também em computador, o qual envolve simulações e análises, de modo a possibilitar a previsão do processo de manufatura e sua alteração rápida conforme o necessário. A manufatura aditiva, por sua vez, consiste em fabricar peças a partir de um modelo virtual através de uma impressora 3D, por exemplo (BARBOSA, 2022).

As quatro tecnologias apresentadas, portanto, precisam da modelagem 3D para se tornarem factíveis, o que reforça o quanto esse conhecimento tende a se tornar cada vez mais essencial na indústria, seja no desenvolvimento de novas plantas ou no aprimoramento daquelas já existentes.

### 3 METODOLOGIA

Dois processos amplamente conhecidos e difundidos na literatura foram escolhidos como base para geração de modelos no AutoCAD. O entendimento dos processos, por sua vez, foi norteado pelos diagramas de blocos e PFDs já estabelecidos para cada um deles.

O processo de produção do formaldeído foi escolhido para representar um caso mais simples, importante para familiarização com o software, enquanto o processo de produção de ácido sulfúrico foi escolhido como um caso mais complexo, importante para aprofundamento do básico inicialmente modelado.

#### 3.1 ESTUDO DE CASO: PROCESSO DE PRODUÇÃO DO FORMALDEÍDO

O metanal, de fórmula química  $\text{CH}_2\text{O}$  e conhecido como formaldeído, é o composto mais simples da família dos aldeídos. Trata-se de um aldeído alifático e importante intermediário orgânico que foi descoberto por A. Butlerov em 1859 (MOREIRA, 2015).

Dentre suas principais aplicações se encontram as resinas de formaldeído, produzidas com fenol, ureia ou alguns poliacetatos. Essas resinas podem ser utilizadas como “adesivos” na fabricação de produtos de madeira e ainda na produção de produtos moldados, como as bolas de bilhar (CETESB, 2023). Além disso, o metanal também pode ser empregado para embalsamar cadáveres, na produção de pesticidas e alisantes capilares, como desinfetante e como antisséptico (VIEIRA et al., 2013).

##### 3.1.1 Propriedades físico-químicas do formaldeído

O aldeído fórmico é incolor e possui baixo peso molecular, sendo encontrado na forma gasosa à temperatura ambiente. Por ser solúvel em água, entretanto, também é comum de ser comercializado na forma de líquido aquoso, conhecido como formol ou formalina, nos quais a proporção do composto costuma variar de 30% a 50% por peso (CETESB, 2023a).

Outras características incluem a facilidade de polimerização, o odor irritante, além de altas inflamabilidade, reatividade e toxicidade, podendo provocar irritações na pele, defeitos genéticos, câncer e até a morte, se inalado. Uma curiosidade é que esse seu odor característico permite que a presença do formaldeído seja identificada rapidamente, mesmo em baixas

concentrações (CETESB, 2023a). A Tabela 3.1 resume o valor das principais propriedades físico-químicas do formaldeído, bem como ilustra seus pictogramas de perigo:

**Tabela 3.1 - Propriedades físico-químicas do formaldeído e seus pictogramas de perigo.**

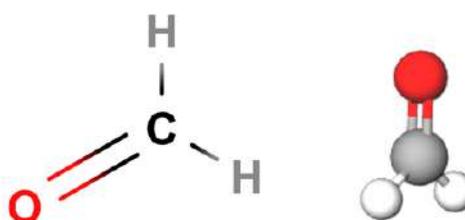
Peso molecular	30 g/mol
Ponto de Fusão	-92 °C
Ponto de Ebulição	-19,5 °C
Ponto de Fulgor	60 °C (solução a 40%)
Temperatura de ignição	430 °C
Limite Inferior de Inflamabilidade (no ar)	7 % (V)
Limite Superior de Inflamabilidade (no ar)	73% (V)
Densidade relativa do líquido ou sólido	1,1 a 25 °C
Densidade relativa do gás ou da mistura vapor-ar	1,04



Fonte: Adaptado de (CETESB, 2023a).

A estrutura molecular do formaldeído é apresentada na Figura 3.1 e, a partir de sua análise, é possível entender a origem da sua alta reatividade. O oxigênio, por ser mais eletronegativo que o carbono, é capaz de atrair para si os elétrons da ligação C = O, gerando um dipolo permanente. Dessa forma, o carbono passa a apresentar uma carga parcial positiva, reagindo facilmente frente a nucleófilos. Além disso, como o hidrogênio é um grupo pouco volumoso, o ataque ao carbono da carbonila acaba sendo ainda mais facilitado (MOREIRA, 2015).

**Figura 3.1 – Estrutura molecular do formaldeído.**



Fonte: Adaptado de (MOLVIEW, 2023).

### 3.1.2 Rotas de produção

O formaldeído foi identificado pela primeira vez por A.W.Hofmann, em 1867, através da passagem de uma corrente de ar carregada de metanol com uma base de platina. Sua produção industrial, por sua vez, se iniciou em 1882, quando B.Tollens e O.Loew aperfeiçoaram esse processo obtendo rendimentos mais significativos (MOREIRA, 2015). Atualmente, existem duas linhas principais para obtenção do metanal industrialmente; ambas envolvem a oxidação do metanol, mas se diferenciam pelo tipo de catalisador utilizado no processo, o qual pode ser um catalisador a base de prata ou um óxido metálico (LIMBERGER, 2011).

#### 3.1.2.1 Via catalisador a base de prata

Os processos que utilizam catalisadores a base de prata são caracterizados pela oxidação parcial e desidrogenação do metanol, sendo realizados numa faixa de temperatura entre 600 °C e 700 °C, à pressão atmosférica e com excesso de metanol. Os principais subprodutos obtidos nesse caso são monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido fórmico e metanoato de metila (REUSS et al., 2000).

Esse grupo pode ainda ser subdividido em duas variantes, a depender se água é adicionada ou não ao processo. No primeiro caso, o processo é denominado BASF e ocorre a conversão completa do metanol. Já no segundo, o metanol não é completamente convertido, sendo necessária uma destilação ao final para permitir sua recuperação e recirculação ao processo (REUSS et al., 2000).

No caso específico do processo BASF, a ideia é que a água alimentada seja capaz remover calor da reação, por ter alta capacidade calorífica, prevenindo o superaquecimento do meio reacional e a sinterização do catalisador (FILHO, 2007). Além disso, a água é capaz de auxiliar na queima do coque na superfície do catalisador, expondo seus sítios ativos e reduzindo a formação de subprodutos. A seletividade do processo é, portanto, aumentada, o que possibilita que maiores conversões sejam alcançadas (COSTA, 2020).

#### 3.1.2.2 Via catalisador de óxidos metálicos

O processo que utiliza um óxido metálico como catalisador é denominado Formox e se caracteriza por uma única reação do metanol com gás oxigênio, sendo realizado numa faixa

de temperatura entre 250 °C e 400 °C, à pressão atmosférica e com ar em excesso (LIMBERGER, 2011). Os óxidos metálicos utilizados são, normalmente, de vanádio, ferro ou molibdênio (SOARES & MARCOLAN, 2019) e os subprodutos formados são monóxido de carbono, dimetil éter, dióxido de carbono e ácido fórmico (LIMBERGER, 2011).

### 3.1.2.3 Comparativo entre as rotas de produção

A grande vantagem do processo Formox em relação aos outros apresentados na Seção 3.1.2.1 é sua conversão em termos de metanol consumido, podendo alcançar até 99% (SOARES & MARCOLAN, 2019). Ademais, sua temperatura de reação é mais baixa, o que permite, por exemplo, uma boa seletividade do catalisador, além da utilização de métodos simples para geração de vapor (REUSS et al., 2000).

Por outro lado, o processo Formox necessita de equipamentos e investimentos maiores, uma vez que trabalha com vazões de gás maiores (BRANCO, 2014). Outra desvantagem do processo Formox é o fato do gás residual ser não combustível não queimando com facilidade e demandando alta quantidade de energia para controlar sua liberação ao ambiente, o que onera o custo do processo (SOARES & MARCOLAN, 2019).

Mesmo considerando os pontos acima apresentados, o processo Formox ainda é amplamente aplicado ao redor do mundo por ser facilmente controlado, fato que se deve principalmente às baixas temperaturas (REUSS et al., 2000). O estudo de caso da produção de formaldeído será baseado, portanto, nesse processo.

### 3.1.3 Processo Formox

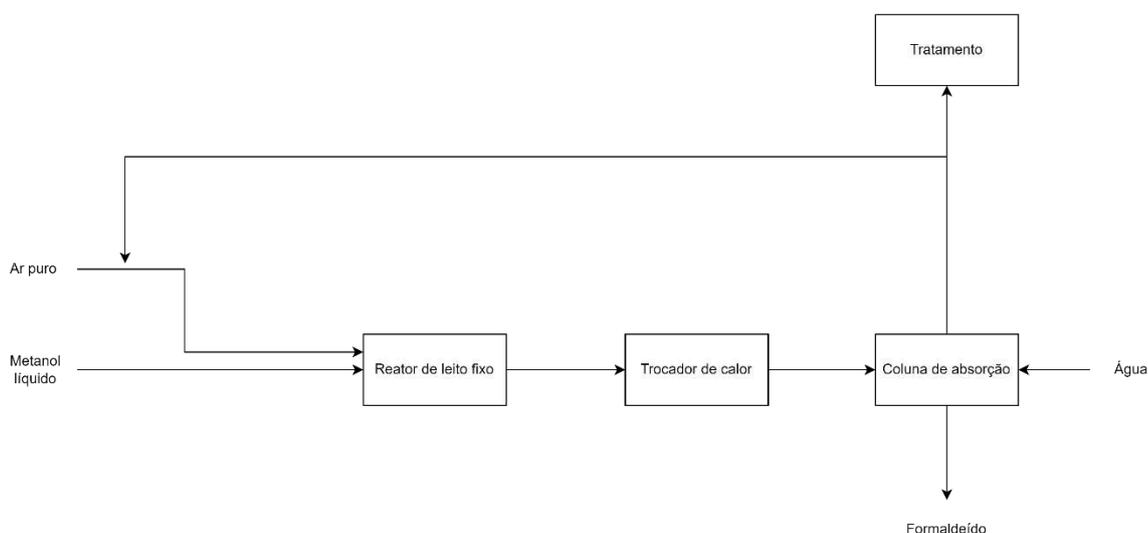
As reações químicas envolvidas nesse processo ocorrem em meio gasoso são apresentadas abaixo (SANTOS, 2019b):



### 3.1.3.1 Diagrama de blocos (BDF)

Pensando de maneira simplificada, o processo Formox consiste na alimentação de metanol e ar em um reator recheado de catalisador de óxido metálico, no qual ocorre a formação do formaldeído. Essa etapa, por sua vez, é sucedida de uma etapa de separação em um absorvedor, de modo que formaldeído possa ser obtido na forma de solução aquosa e o gás residual possa ser recirculado ao processo (REUSS et al., 2000).

**Figura 3.2 - Diagrama de blocos do processo Formox.**



Fonte: Elaboração própria, 2023.

### 3.1.3.2 Fluxograma de processo (PFD)

Agora pensando de maneira mais detalhada, uma corrente contendo metanol líquido é alimentada ao processo e levada para um vaporizador (E1), de modo a vaporizar o álcool. Em paralelo, uma corrente de ar atmosférico é filtrada em F1, para remoção do material particulado, e misturada a uma corrente de ar recirculado. A corrente resultante, por sua vez, é direcionada a um trocador de calor (E2), de modo que suas condições sejam ajustadas às condições de reação (BRANCO, 2014).

Posteriormente, a carga segue para um reator de leito fixo (R1). Nele, o catalisador compõe um leito imóvel sobre o qual os reagentes escoam sendo convertidos em produtos (PONTES, 2018). As reações que ocorrem dentro do reator foram descritas na seção 3.1.3 e, em se tratando de reações exotérmicas, o calor liberado no processo é utilizado para evaporar

o fluido de transferência de calor, o qual é condensado, fechando um ciclo que permite o controle da temperatura do reator através de E3 (MOREIRA, 2015).

Ao sair do reator, a corrente composta por produtos, subprodutos e reagentes não consumidos é resfriada por E4 para atingir a temperatura ótima de entrada no absorvedor (T1), equipamento no qual ocorrerá a absorção em água do formaldeído. Esse processo de absorção também é bastante exotérmico, tornando necessária a existência de um sistema de resfriamento acoplado (E5). Outro ponto importante é que a concentração final do formaldeído será controlada pelo fluxo de água que entra na parte superior do absorvedor, em contracorrente com os gases. Por fim, o formaldeído produzido é retirado da corrente já resfriada, o que é importante para evitar a decomposição por altas temperaturas do produto formado. Este se encontra na forma de solução aquosa e pode conter alguns subprodutos como ácido fórmico e dimetil éter (REUSS et al., 2000).

O gás residual, por sua vez, é composto majoritariamente de  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$  e baixa porcentagem de componentes combustíveis, como CO e metanol, não queimando com facilidade e sendo de difícil tratamento. Parte desse gás pode ser direcionada, por exemplo, para um incinerador catalítico, enquanto outra parte é recirculada ao início do processo e misturada à corrente de ar puro (REUSS et al., 2000). Isso é essencial porque permite que a fração de metanol seja aumentada, sem que se forme uma mistura inflamável, uma vez que a presença de inertes acaba por diminuir a proporção de oxigênio da mistura (BRANCO, 2014).

Bombas e compressores são utilizados para compensar a perda de carga inerente ao processo (C1, C2, C3, C4, C5, C6, P1, P2, P3).

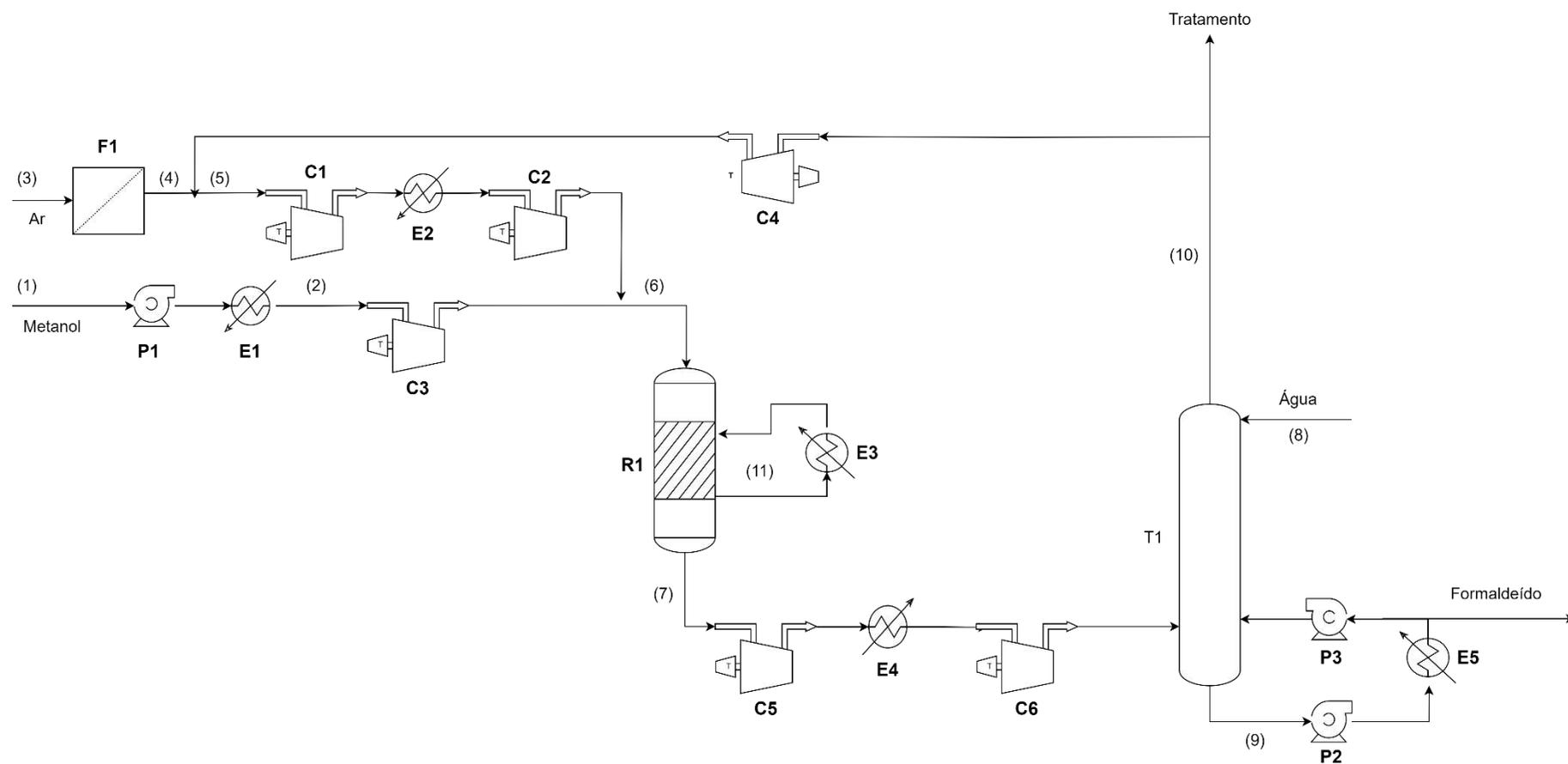
Na Tabela 3.2 estão especificados os principais componentes de cada corrente do PFD, lembrando que o foco do trabalho não inclui a definição específica das composições e vazões de cada uma delas.

**Tabela 3.2 - Principais componentes de cada corrente do PFD do processo Formox.**

Corrente	Componente (s)
(1)	$\text{CH}_3\text{OH}(l)$
(2)	$\text{CH}_3\text{OH}(g)$
(3)	Ar atmosférico ( $\text{N}_2 + \text{O}_2$ )
(4)	Ar atmosférico sem partículas sólidas ( $\text{N}_2 + \text{O}_2$ )
(5)	Ar atmosférico fresco e purificado, gases residuais de processo
(6)	$\text{CH}_3\text{OH}(g)$ , $\text{N}_2(g)$ , $\text{O}_2(g)$
(7)	$\text{HCHO}(g)$ , $\text{H}_2\text{O}(g)$ , $\text{CO}(g)$ , $\text{CO}_2(g)$ , $\text{CH}_3\text{OCH}_3(g)$ , $\text{HCOOH}(g)$ , $\text{N}_2(g)$ , $\text{O}_2(g)$
(8)	$\text{H}_2\text{O}(l)$
(9)	$\text{HCHO}(g)$ , $\text{CH}_3\text{OCH}_3(g)$ , $\text{HCOOH}(g)$ , $\text{H}_2\text{O}(l)$
(10)	$\text{N}_2(g)$ , $\text{O}_2(g)$ , $\text{CO}_2(g)$ , $\text{CO}(g)$
(11)	Fluido de refrigeração

Fonte: Elaboração própria, 2023.

Figura 3.3 - PFD do processo Formox.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

### 3.2 ESTUDO DE CASO: PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ÁCIDO SULFÚRICO

O ácido sulfúrico, de fórmula química  $H_2SO_4$ , é um potente ácido inorgânico utilizado direta ou indiretamente na produção de uma enorme variedade de produtos. A maior parte da sua produção é destinada para indústria de fertilizantes, podendo também ser direcionada para indústria de produtos químicos, metalurgia ou outros setores (SANTOS et al., 2021). Algumas aplicações do ácido sulfúrico são: produção de ácido fosfórico, fabricação de sulfato de alumínio (importante intermediário orgânico), produção de nylon, refino do petróleo, produção de pigmentos e fármacos, catalisador de reações, fabricação de baterias, fabricação de explosivos, oxidante e desidratante (WYKROTA, 2016):

Um ponto interessante é que o consumo *per capita* de ácido sulfúrico é um dos indicadores utilizados para medir desenvolvimento industrial de um país, deixando ainda mais clara a relevância desse produto como um intermediário (SANTOS, 2019).

#### 3.2.1 Propriedades físico-químicas do ácido sulfúrico

O ácido sulfúrico é um líquido incolor e inodoro que apresenta aspecto oleoso em condições normais de temperatura e pressão. É altamente corrosivo para compostos orgânicos e abrasivo para maioria dos metais, além de produzir uma névoa irritante sob condições normais e vapores nocivos quando aquecido. Trata-se de um composto de elevada toxicidade, podendo ser fatal se inalado e provocar queimaduras severas à pele e dano aos olhos (CETESB, 2023b).

Ademais, esse ácido não se polimeriza, mas é capaz de reagir violentamente com a água, liberando calor, e com outros produtos químicos, como materiais combustíveis, redutores, bases, cloratos e carbetos. Outras características incluem a não inflamabilidade e a não combustibilidade (CETESB, 2023b). A Tabela 3.3 resume o valor das principais propriedades físico-químicas do ácido sulfúrico, bem como ilustra seus pictogramas de perigo:

**Tabela 3.3 - Propriedades físico-químicas do ácido sulfúrico e seus pictogramas de perigo.**

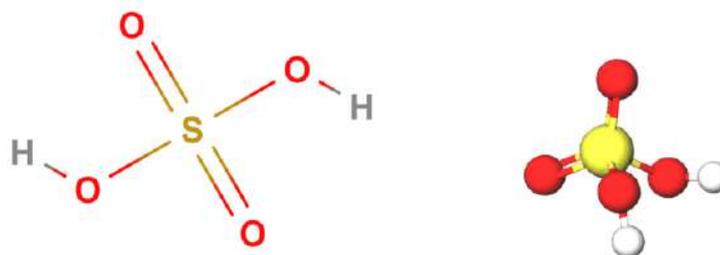
Peso molecular	98,08 g/mol
Ponto de Fusão	10,4 °C
Ponto de Ebulição	340 °C
Ponto de Fulgor	Não pertinente
Temperatura de ignição	Não pertinente
Limite Inferior de Inflamabilidade (no ar)	Não pertinente
Limite Superior de Inflamabilidade (no ar)	Não pertinente
Densidade relativa do líquido ou sólido	1,84 a 20 °C
Densidade relativa do gás ou da mistura vapor-ar	1



Fonte: Adaptado de (CETESB, 2023b).

A estrutura molecular do ácido sulfúrico é apresentada na Figura 3.4 e, a partir de sua análise, é possível perceber que se trata de um diácido, por possuir dois hidrogênios ionizáveis. A primeira etapa dessa ionização apresenta um caráter fortemente ácido e é responsável pela formação do ânion  $\text{HSO}_4^-$ , enquanto a segunda apresenta um caráter ácido mais fraco e tem como consequência a formação do ânion  $\text{SO}_4^{2-}$ . Dessa forma, após a adição de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  em água, nenhuma quantidade apreciável dessa molécula permanece em solução (CAMPOS, 2011).

**Figura 3.4 - Estrutura molecular do ácido sulfúrico.**



Fonte: Adaptado de (MOLVIEW, 2023).

### 3.2.2 Óleum

Quando o ácido sulfúrico não está diluído em água, mas sim misturado ao trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>), este é denominado óleum ou ácido sulfúrico fumegante. Sua caracterização é baseada na porcentagem mássica de SO<sub>3</sub> na mistura. Portanto, um óleum 28% equivale a 28% de SO<sub>3</sub> e 72% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Quando adicionado de água, entretanto, o SO<sub>3</sub> contido na solução é capaz de reagir, formando o ácido sulfúrico, conforme a reação abaixo:



### 3.2.3 Rotas de produção

Ainda no século XV, a queima de enxofre com salitre (nitrato de potássio) foi utilizada para produção de ácido sulfúrico. Mas foi apenas em 1746 que essa produção teve sua industrialização efetiva, quando John Roebuck introduziu ao processo as câmaras recobertas de chumbo, resistentes ao ácido, permitindo o aumento de escala. A concentração do ácido formado, entretanto, ficava entre 35% e 40%, e foi por isso que Louis Gay-Lussac e John Glover otimizaram esse processo posteriormente, obtendo concentrações de até 78% (CAMPOS, 2011).

Os processos mencionados acima tinham uma grande limitação no que diz respeito à concentração de ácido sulfúrico, não possibilitando a obtenção do ácido muito concentrado e dificultando sua aplicação. Portanto, em 1831, Peregrine Philips patenteia um processo bem mais econômico, denominado processo de contato (CAMPOS, 2011). Este é o mais utilizado atualmente e produz um ácido com concentrações que podem chegar a 99% (SANTOS et al., 2021).

### 3.2.4 Processo de contato

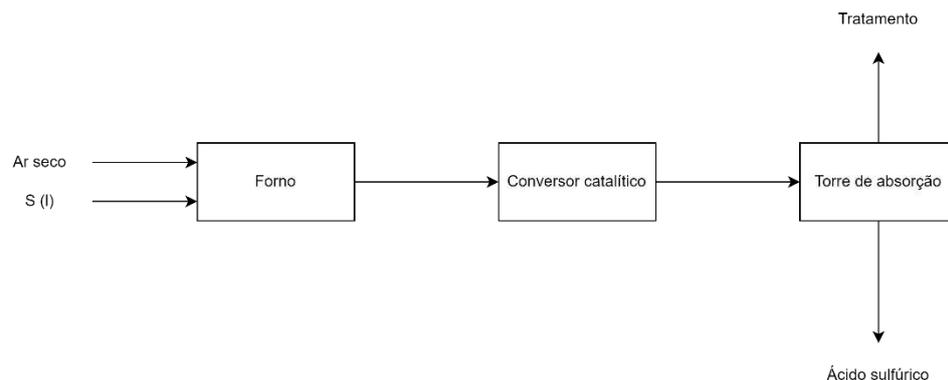
A produção do ácido sulfúrico a partir de enxofre elementar, pelo processo de contato, é realizada em três principais etapas: obtenção do dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), conversão catalítica do dióxido de enxofre em trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>) e absorção do trióxido de enxofre pelo ácido sulfúrico. As reações que caracterizam cada etapa são apresentadas no abaixo (CAMPOS, 2011):

Etapa 1Etapa 2Etapa 3

## 3.2.4.1 Diagrama de blocos (BDF)

Pensando de maneira simplificada, o processo de contato para formação de ácido sulfúrico consiste na alimentação de ar seco e enxofre fundido em um forno, de modo a obter  $SO_2$ . A corrente resultante, por sua vez, é direcionada a um conversor catalítico, o qual é responsável por formar  $SO_3$ . Por fim, esse gás tem sua temperatura reduzida e ajustada para entrada em uma torre de absorção para ser absorvido em água, formando  $H_2SO_4$ . Gases não absorvidos são purificados e eliminados à atmosfera (SANTOS et al., 2021).

**Figura 3.5 - Diagrama de blocos do processo de contato.**



Fonte: Elaboração próprio, 2023.

### 3.2.4.2 Fluxograma de processo (PFD)

Agora pensando de maneira mais detalhada, o ar alimentado ao processo é filtrado em F1, para remoção do material particulado, e direcionado para uma torre de secagem (T1). Esta torre, por sua vez, utiliza ácido sulfúrico como agente dessecante e tem por objetivo eliminar a umidade da corrente para evitar a formação de ácido no forno, provocando corrosão (CUNHA, 2020).

Paralelamente, o enxofre sólido estocado é direcionado a um tanque de fusão e neutralização (TQ1), no qual é fundido e tratado. A neutralização é realizada por cal virgem e tem como objetivo neutralizar o enxofre possivelmente reduzido por bactérias na alimentação, evitando a corrosão. Já a fusão, por sua vez, ocorre para promover uma queima mais eficiente do enxofre, uma vez que a área superficial do líquido é maior em relação ao sólido. Em seguida, essa corrente passa por um filtro (F2), responsável por eliminar o sulfeto de cálcio oriundo da neutralização (CUNHA, 2020).

Tanto a corrente filtrada de enxofre quanto a corrente seca de ar são alimentadas a um forno (H1), o qual possui bicos aspersores para pulverização do enxofre fundido. Neste ocorre a queima do enxofre e formação do  $\text{SO}_2$ , com ar em excesso. Uma possível formação de  $\text{SO}_3$ , o que aumentaria o risco de corrosão, é evitada pela alta vazão/velocidade espacial e consequente baixo tempo de residência no forno. Uma vez que essa combustão se trata de uma reação altamente exotérmica, a corrente de saída deve ser resfriada antes de entrar no conversor, o que ocorre através de uma caldeira (H2), gerando vapor útil (CUNHA, 2020).

Com a sua temperatura ajustada, a corrente de  $\text{SO}_2$  com ar é direcionada ao leito catalítico (R1), conversor no qual o  $\text{SO}_2$  é transformado em  $\text{SO}_3$ . Em se tratando de uma reação reversível e exotérmica, alguns pontos se tornam relevantes. Primeiramente, é possível perceber que baixas temperaturas favorecem o equilíbrio químico, apesar de provocarem perda cinética. O conversor atua, portanto, dentro de uma faixa adequada de temperatura, balanceando os dois efeitos e, uma vez que altas temperaturas não são toleradas, o catalisador se mostra fundamental para aumentar a velocidade de reação. Além disso, a concentração de  $\text{SO}_3$  aumenta conforme a passagem pelos leitos catalíticos, o que pode fazer com que o sistema atinja as condições de equilíbrio químico, diminuindo a conversão. Dessa forma, existe uma torre de absorção intermediária (T2) desse composto entre um determinado leito catalítico, levando a um deslocamento do equilíbrio (CAMPOS, 2011).

Industrialmente, o conversor mencionado possui de três a cinco leitos catalíticos de pentóxido de vanádio ( $V_2O_5$ ), de modo a potencializar a conversão de  $SO_2$ . A passagem da corrente de gás de um leito para o outro envolve seu resfriamento por trocadores de calor para melhor adequação das condições de entrada no próximo leito, já que a corrente se encontra aquecida pelo calor liberado na reação (SANTOS, 2019).

A corrente resultante do conversor passa por um trocador de calor (E5), de modo que sua temperatura seja ajustada para entrada na torre absorvedora (T3). Em seguida, essa corrente é borbulhada em contracorrente com ácido sulfúrico diluído, através de uma torre recheada, por exemplo com um leito de selas cerâmicas (SANTOS, 2019a). Nesta etapa o  $SO_3$  reage com a água de diluição do ácido, formando  $H_2SO_4$ . É importante pontuar que a água utilizada precisa estar nessas condições porque água pura poderia levar à formação de uma névoa de ácido sulfúrico (a reação é muito exotérmica) e à corrosão, dificultando o processo (FERNANDES, 2020).

As plantas industriais que apresentam dupla absorção não apresentam altos níveis de emissão, pois atuam com altos níveis de conversão, além de possuírem eliminadores de névoa no topo das torres de absorção. Na torre de absorção intermediária esse eliminador funciona de modo a evitar que névoa ácida chegue aos leitos seguintes e a permitir que  $SO_2$  retorne ao processo. Já a torre de absorção final evita tanto a passagem de  $SO_2$  quanto de  $SO_3$ , evitando a liberação de ambos os compostos ao ambiente (CUNHA, 2020). Por fim, gases residuais são liberados à atmosfera através de uma chaminé (CH1) (SANTOS, 2019).

Bombas e compressores são utilizados para compensar a perda de carga inerente ao processo (C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9, C10, P1, P2).

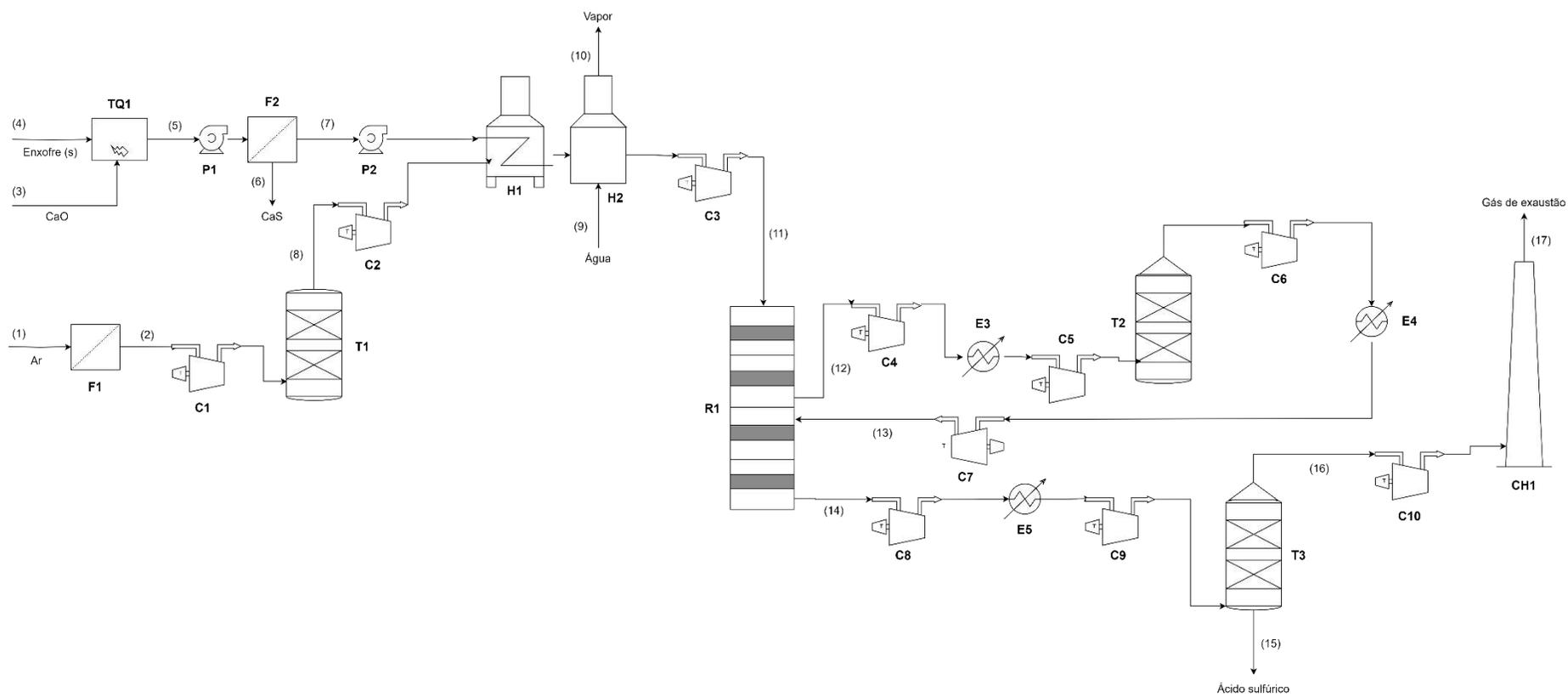
Na Tabela 3.4 estão especificados os principais componentes de cada corrente do PFD, lembrando que o foco do trabalho não inclui a definição específica das composições e vazões de cada uma delas.

**Tabela 3.4 - Principais componentes de cada corrente do PFD do processo de contato.**

Corrente	Componente (s)
(1)	Ar atmosférico ( $N_2 + O_2$ )
(2)	Ar atmosférico sem partículas sólidas ( $N_2 + O_2$ )
(3)	$CaO(s)$
(4)	$S(s)$
(5)	$S(l)$ , $CaS(s)$
(6)	$CaS(s)$
(7)	$S(l)$
(8)	Ar atmosférico sem partículas sólidas e sem umidade ( $N_2 + O_2$ )
(9)	$H_2O(l)$
(10)	$H_2O(g)$
(11)	$SO_2(g)$ , $N_2(g)$ , $O_2(g)$
(12)	$SO_3(g)$ , $SO_2(g)$ , $N_2(g)$ , $O_2(g)$
(13)	$SO_2(g)$ , $N_2(g)$ , $O_2(g)$
(14)	$SO_3(g)$ , $SO_2(g)$ , $N_2(g)$ , $O_2(g)$
(15)	$H_2SO_4(c)$
(16)	$SO_3(g)$ , $SO_2(g)$ , $N_2(g)$ , $O_2(g)$
(17)	Gás de exaustão

Fonte: Elaboração própria, 2023.

Figura 3.6 - PFD do processo de contato.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

### 3.3 O USO DO AUTOCAD PARA MODELAGEM 3D DE PROCESSOS

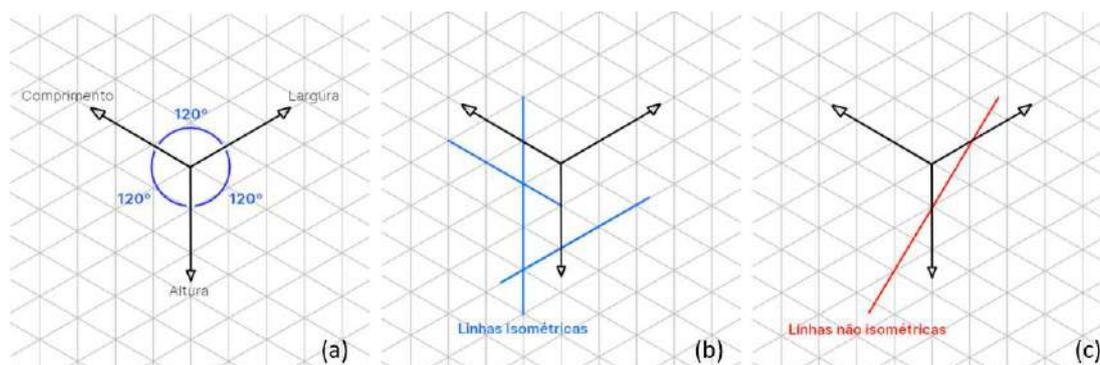
Para que modelos 3D simplificados das plantas ilustradas na Figura 3.3 e na Figura 3.6 fossem criados no AutoCAD, foi necessário entender como os objetos se comportam no espaço, trabalhando com construções em diferentes planos, além de desenvolver uma noção primária em relação à dimensão e à disposição desses equipamentos na planta.

Não foi preciso, entretanto, um conhecimento avançado do AutoCAD para que isso fosse feito. Aprendeu-se a utilizar no software ao longo do processo de criação e a combinação inteligente de alguns comandos básicos disponíveis já permite o desenho de objetos tridimensionais que remetem à realidade.

#### 3.3.1 O desenho isométrico

A perspectiva isométrica é a que representa os objetos de forma menos deformada, permitindo que suas proporções de comprimento, largura e altura sejam mantidas. Esses três eixos espaciais são necessariamente representados na mesma escala, formando um ângulo de  $120^\circ$  entre si. Linhas que não sejam paralelas ao eixo isométrico causam uma “deformidade” ao objeto, não mais permitindo nas proporções corretas (JONAS, 2022).

**Figura 3.7 - Eixo isométrico, linhas isométricas e linhas não isométricas.**



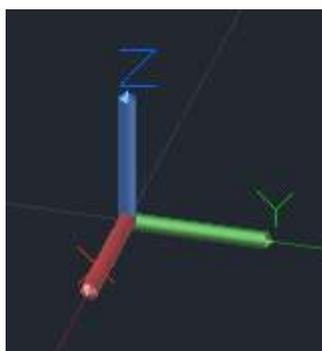
Fonte: (GD ARTES, 2022).

Os desenhos de equipamentos e tubulações no AutoCAD foram feitos no plano isométrico, permitindo o trabalho em qualquer um dos três planos, cada um deles com um par de eixos associados.

### 3.3.2 O uso de diferentes coordenadas

Um dos pontos mais relevantes sobre o uso do AutoCAD é que, no seu modo padrão, todos objetos são definidos por suas coordenadas no sistema de coordenadas universal (WCS). Esses objetos, por sua vez, são manipulados no plano XY, também conhecido como plano de trabalho (AUTODESK, 2023).

**Figura 3.8 - Sistema de coordenadas universal (WCS)**



Fonte: Elaboração própria, 2023.

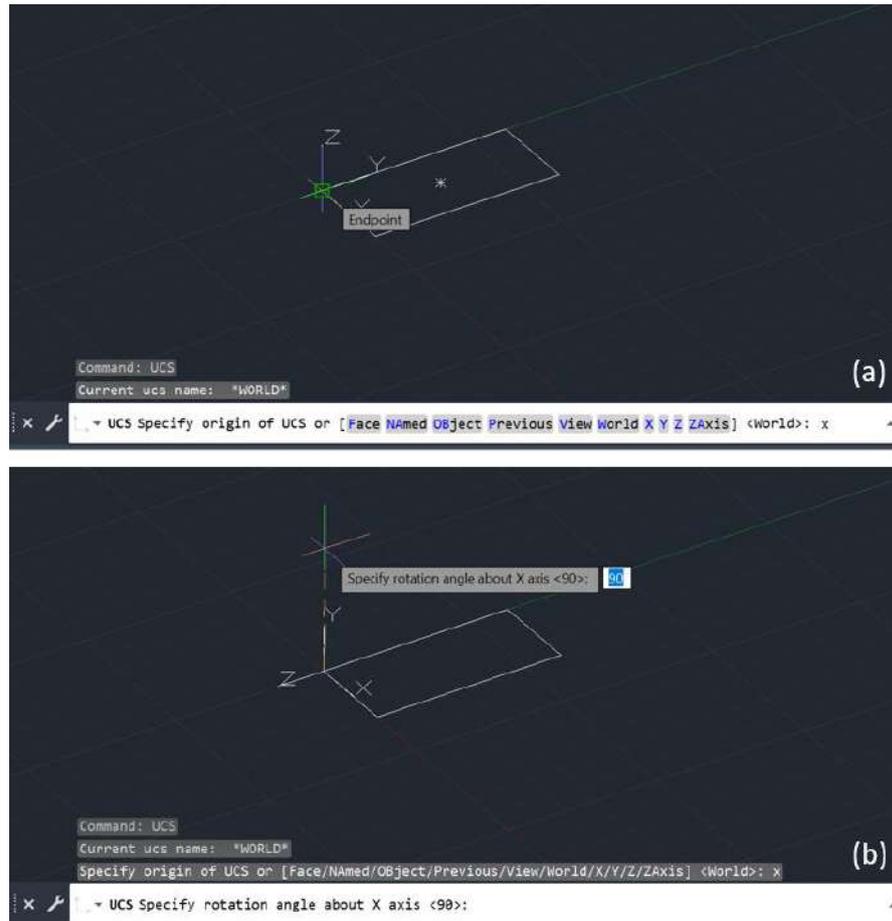
A dificuldade surge, entretanto, quando se deseja criar e modificar objetos em planos diferentes do XY, já que o AutoCAD não permite que isso seja feito tendo o WCS como sistema de coordenadas base. Por isso, é preciso que um novo sistema de coordenadas seja definido com o auxílio do comando UCS. Esse comando significa “sistema de coordenadas do usuário” e tem como função estabelecer a orientação de um sistema de coordenadas cartesianas móvel, seguindo a regra tradicional da mão direita para determinar as orientações positivas dos eixos e as direções de rotação (AUTODESK, 2023).

Para criação dos equipamentos, é interessante que sejam criadas as orientações XZ e YZ, permitindo que objetos sejam também modificados sobre esses planos, facilitando seu manuseio e detalhamento.

#### 3.3.2.1 Construindo a orientação XZ

Nessa nova orientação, o eixo Z é posicionado sobre o eixo Y, mantendo fixo o eixo X e fazendo uma rotação de 90 graus, como ilustrado na Figura 3.9.

**Figura 3.9 - Criando a orientação XZ no AutoCAD.**

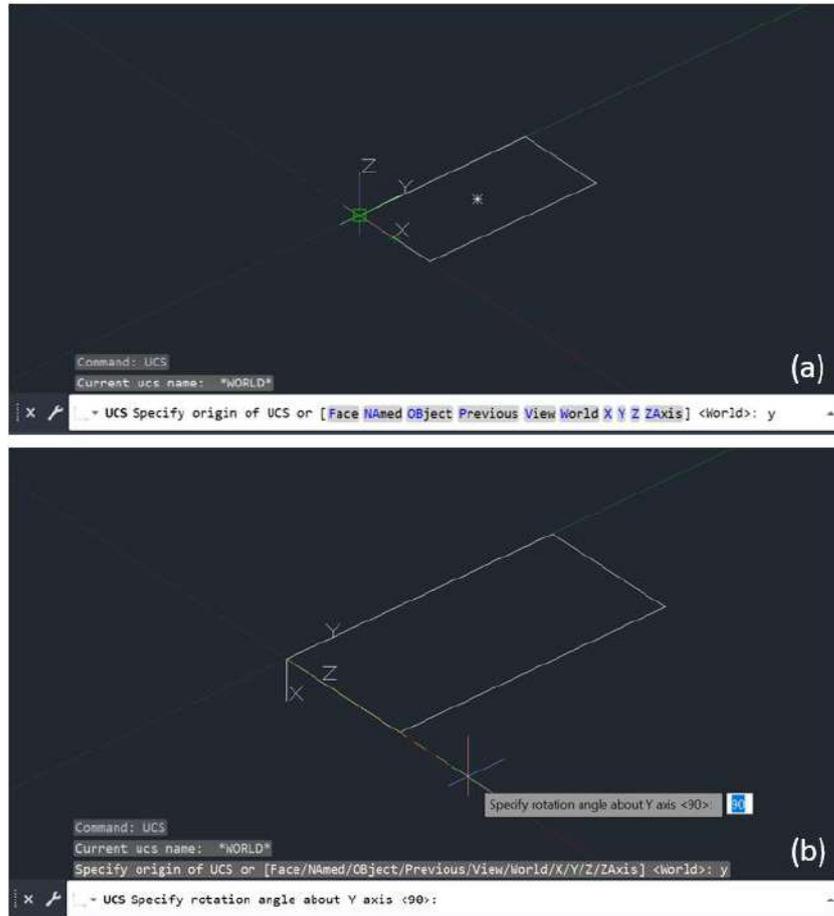


Fonte: Elaboração própria, 2023.

### 3.3.2.2 Construindo a orientação YZ

Nessa nova orientação, o eixo Z é posicionado sobre o eixo X, mantendo fixo o eixo Y e fazendo uma rotação de 90 graus, como ilustrado na Figura 3.10.

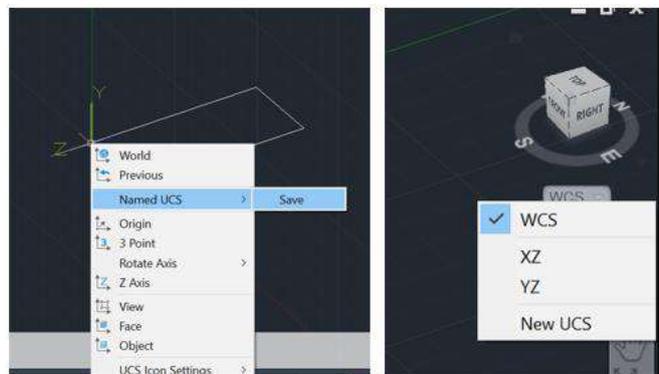
**Figura 3.10 - Criando a orientação YZ no AutoCAD.**



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Todas as novas orientações criadas podem ser salvas e acessadas como ilustrado na Figura 3.11.

**Figura 3.11 - Salvamento e acesso das coordenadas do usuário em AutoCAD.**



Fonte: Elaboração própria, 2023.

### 3.4 CONSTRUÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Cada equipamento pertencente às plantas de formaldeído e ácido sulfúrico foi criado no AutoCAD utilizando uma estratégia diferente, sendo importante lembrar que estes se tratam de objetos construídos no plano 2D e que recursos disponíveis no AutoCAD permitem que sejam transformados em 3D. Algumas figuras mais comuns, como cilindros, cones e retângulos, já possuem um atalho de criação no software.

Os equipamentos são desenhados sem muitos detalhes de construção do ponto de vista mecânico, se resumindo a formas geométricas que remetem ao seu formato real. As referências utilizadas como base para sua criação podem ser retiradas de imagens disponíveis em livros ou de uma biblioteca online de designs em CAD denominada *GrabCAD Community Library*, a qual fornece modelos de diversos objetos formato CAD.

Ao longo dessa seção, o eixo Y é tido como a altura dos equipamentos. Dessa forma, fica mais simples obter a vista frontal (plano ZX do WCS) dos objetos criados, facilitando o entendimento do leitor de cada etapa. É importante ressaltar, entretanto, que caso o intuito seja usar o eixo Z ou o eixo X como altura, a criação dos objetos pode ser feita usando uma lógica análoga ao aqui ilustrado.

Além disso, o ponto (0,0,0) é adotado como origem de todos os equipamentos ao longo dessa seção, mas estes podem facilmente ser movidos para a coordenada (x,y,z) desejada com o uso do comando *move*.

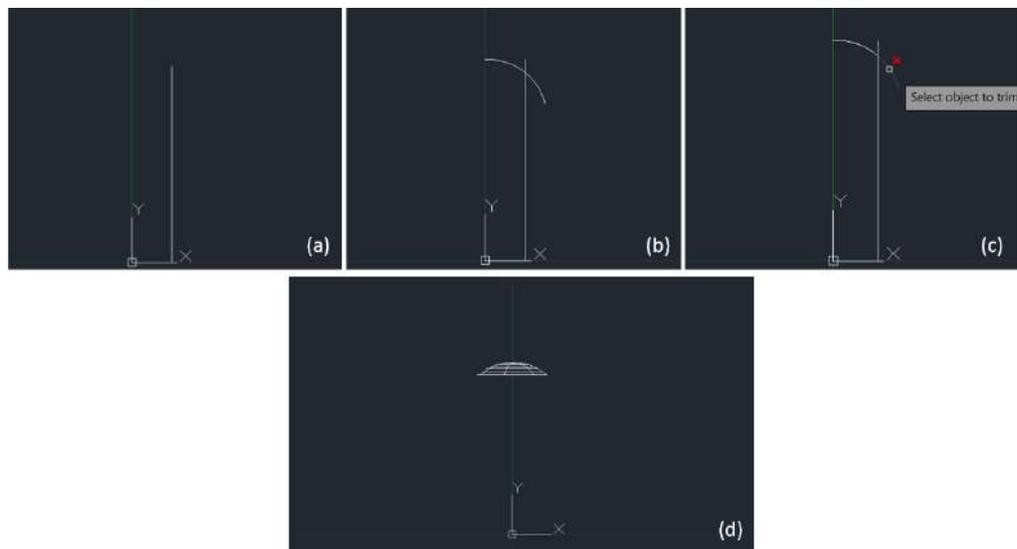
#### 3.4.1 Reator de leito fixo

Supondo um equipamento de  $2R$  de diâmetro e  $H$  de altura, o reator de leito fixo é criado da seguinte forma:

- Usando o comando *line*, cria-se uma linha de ponto inicial  $(R,0)$  e ponto final  $(R,H)$ , como apresentado no item (a) da Figura 3.12.
- Usando o comando *arc*, cria-se um arco centrado em  $(0,H)$ , como apresentado no item (b) da Figura 3.12.
- Usando o comando *trim*, cortam-se as linhas que excedem após a interseção do arco, como apresentado no item (c) da Figura 3.12..

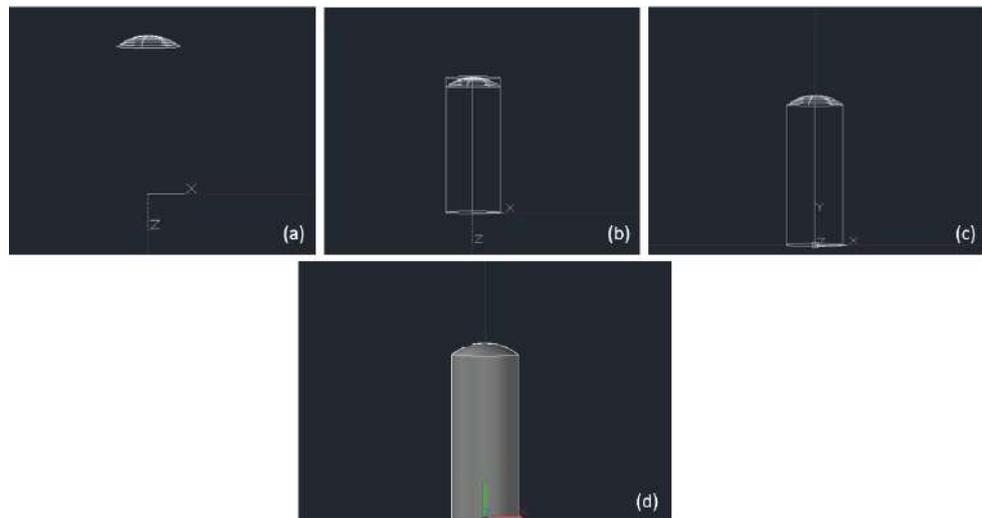
- Deleta-se a linha auxílio e, usando o comando *revolve*, o arco criado é revolvido 360 graus ao redor do eixo y, como apresentado no item (d) da Figura 3.12.
- Modifica-se o sistema de coordenadas para orientação XZ já salva, como apresentado no item (a) da Figura 3.13.
- Usando o comando *cylinder*, cria-se um cilindro centrado em (0,0,0) de raio R e altura H, como apresentado no item (b) Figura 3.13.
- Novamente no WCS, usando o comando *move*, move-se o centro do tampo do reator para o ponto (0,H,0), como apresentado no item (c) da Figura 3.13.
- O objeto final em 3D pode ser visualizado no item (d) da Figura 3.13.

**Figura 3.12 - Construindo o tampo do reator no AutoCAD.**



Fonte: Elaboração própria, 2023.

**Figura 3.13 - Construindo o corpo do reator no AutoCAD.**



Fonte: Elaboração própria, 2023.

### 3.4.2 Absorvedor

O processo de criação do absorvedor foi análogo ao de criação do reator de leito fixo, modificando apenas as dimensões do equipamento.

### 3.4.3 Tanque e conversor

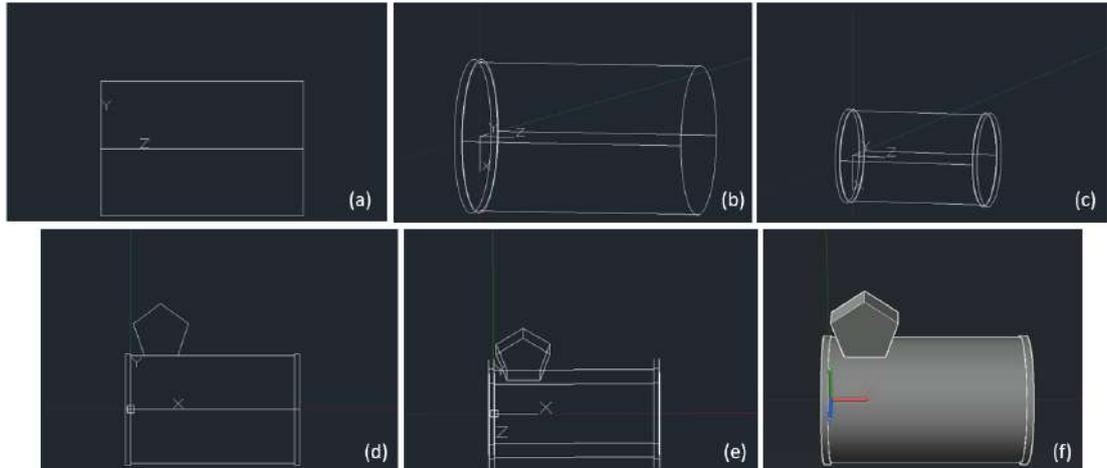
O tanque e o conversor foram desenhados apenas como um cilindro de raio e altura desejados. O comando disponível no AutoCAD para criação do cilindro direto em 3D já foi apresentado na seção 3.4.1.

### 3.4.4 Compressor

Supondo um equipamento de  $2R$  de diâmetro e  $L$  de comprimento, o compressor é criado da seguinte forma:

- Modifica-se o sistema de coordenadas para orientação YZ já salva e, usando o comando *cylinder*, cria-se um cilindro centrado em  $(0,0,0)$  de raio  $R$  e altura  $L$ , como apresentado no item (a) da Figura 3.14.
- Usando o comando *cylinder*, cria-se dois cilindros de raio um pouco maior que  $R$  e altura bem menor que  $L$ , sendo um centrado em  $(0,0,0)$  e outro centrado em  $(0,0,L)$ , como apresentado nos itens (b) e (c) da Figura 3.14.
- Novamente no WCS e, usando o comando *polygon*, desenha-se um pentágono como apresentado no item (d) da Figura 3.14.
- Usando o comando *extrude*, o pentágono é extrusado na direção  $z$ , como apresentado no item (e) da Figura 3.14.
- O objeto final em 3D pode ser visualizado no item (f) da Figura 3.14.

**Figura 3.14 - Construindo o compressor no AutoCAD.**



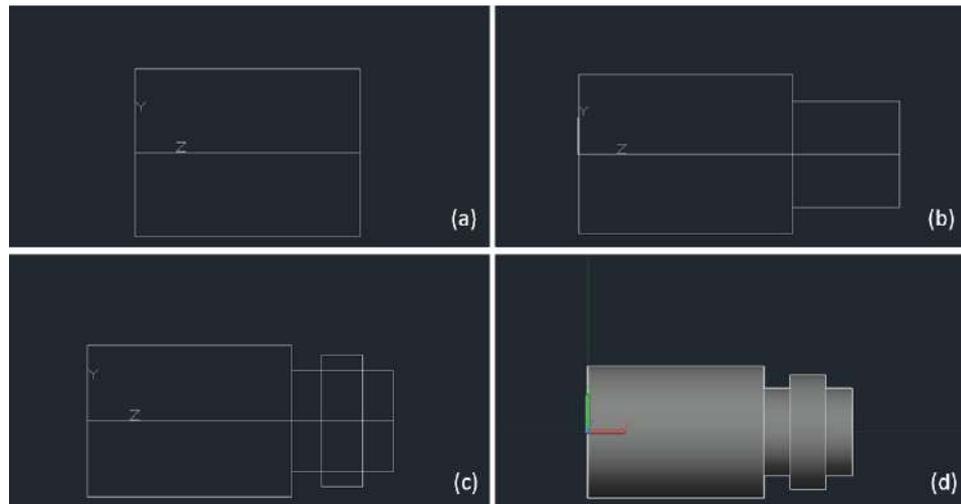
Fonte: Elaboração própria, 2023.

### 3.4.5 Bomba

Supondo um equipamento de  $2R$  de diâmetro e  $L$  de comprimento, a bomba é criada da seguinte forma:

- Modifica-se o sistema de coordenadas para orientação YZ já salva e, usando o comando *cylinder*, cria-se um cilindro centrado em  $(0,0,0)$  de raio  $R$  e altura  $0.7L$ , como apresentado no item (a) da Figura 3.15.
- Usando o comando *cylinder*, cria-se um cilindro centrado em  $(0,0,0.7L)$  de raio  $R/2$  e altura  $0.3L$ , como apresentado no item (b) da Figura 3.15.
- Usando o comando *cylinder*, cria-se um cilindro centrado no meio do cilindro menor, de raio e altura intermediários, como apresentado no item (c) da Figura 3.15.
- O objeto final em 3D pode ser visualizado no item (d) da Figura 3.15.

**Figura 3.15 - Construindo a bomba no AutoCAD.**



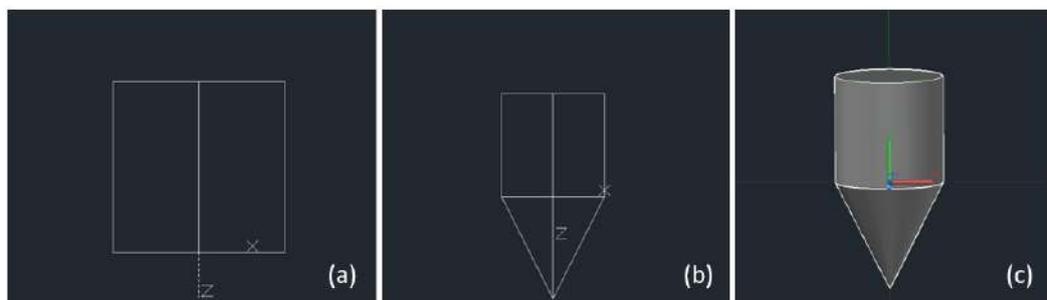
Fonte: Elaboração própria, 2023.

### 3.4.6 Filtro

Supondo um equipamento de  $2R$  de diâmetro e  $L$  de comprimento, o filtro é criado da seguinte forma:

- Modifica-se o sistema de coordenada para orientação XZ já salva e, usando o comando *cylinder*, cria-se um cilindro centrado em  $(0,0,0)$  de raio  $R$  e altura  $L/2$ , como apresentado no item (a) da Figura 3.16.
- Usando o comando *cone*, cria-se um cone centrado em  $(0,0,0)$  de raio da base  $R$  e altura  $L/2$ , como apresentado no item (b) da Figura 3.16.
- O objeto final em 3D pode ser visualizado no item (c) da Figura 3.16.

**Figura 3.16 - Construindo o filtro no AutoCAD.**



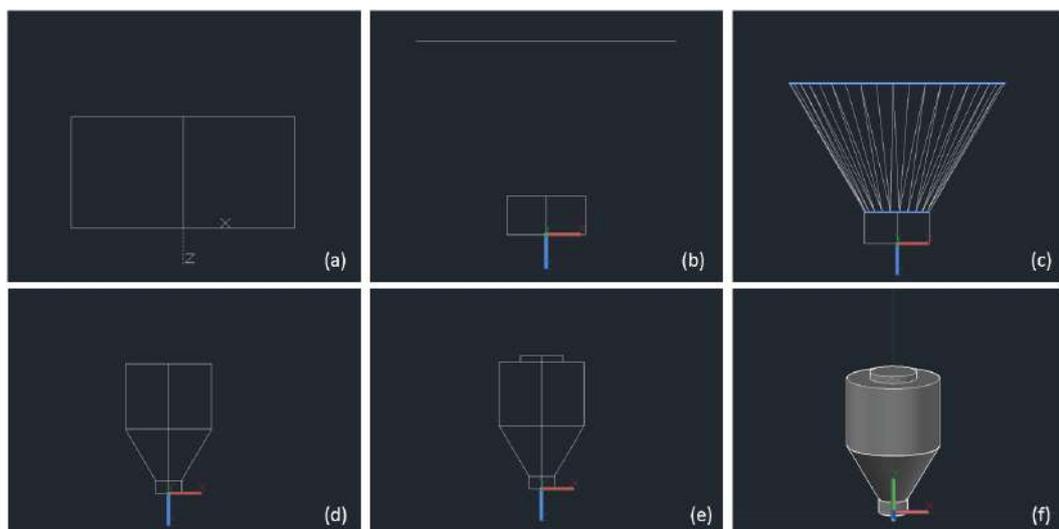
Fonte: Elaboração própria, 2023.

### 3.4.7 Torre de secagem

Supondo um equipamento de  $2R$  de diâmetro e  $H$  de altura, a torre de secagem é criada da seguinte forma:

- Modifica-se o sistema de coordenadas para orientação XZ já salva e, usando o comando *cylinder*, cria-se um cilindro centrado em  $(0,0,0)$  de raio  $0.3R$  e altura  $0.1H$ , como apresentado no item (a) da Figura 3.17.
- Usando o comando *circle*, cria-se dois círculos, sendo um deles centrado em  $(0,0,0.1H)$  de raio  $0.3R$  e outro centrado em  $(0,0,0.5H)$  de raio  $R$ , como apresentado no item (b) da Figura 3.17.
- Usando o comando *loft*, junta-se os dois círculos criados, como apresentado no item (c) da Figura 3.17.
- Usando o comando *cylinder*, cria-se um cilindro centrado em  $(0,0,0.5H)$  de raio  $R$  e altura  $0.5H$ , como apresentado no item (d) da Figura 3.17.
- Usando o comando *cylinder*, cria-se um cilindro centrado em  $(0,0,H)$  de raio  $R/2$  e altura bem menor que  $H$ , como apresentado no item (e) da Figura 3.17.
- O objeto final em 3D pode ser visualizado no item (f) Figura 3.17.

**Figura 3.17 - Construindo a torre de secagem no AutoCAD.**



Fonte: Elaboração própria, 2023.

### 3.4.8 Forno e caldeira

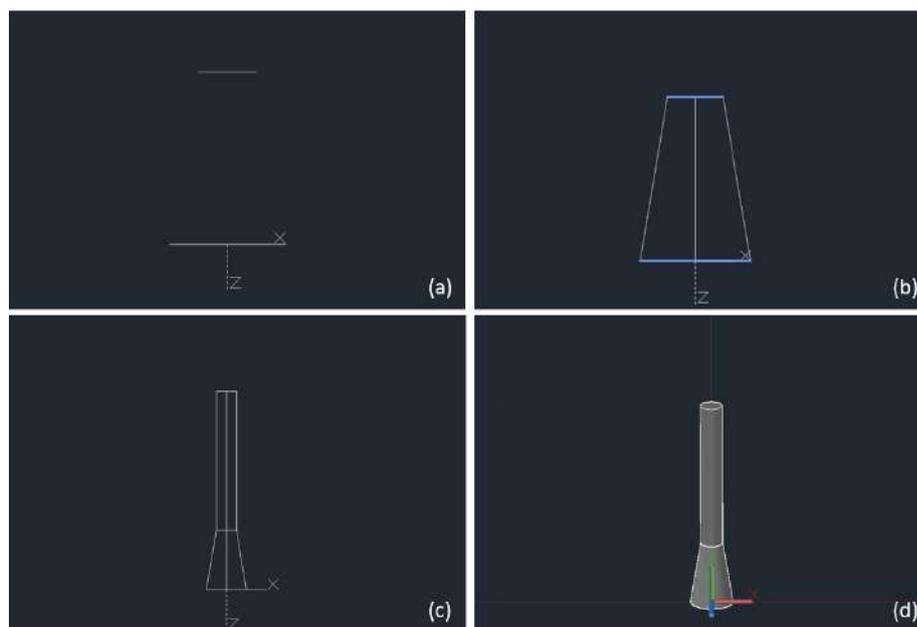
O forno e a caldeira foram desenhados apenas como uma caixa de largura, comprimento e altura desejados. O detalhamento de aspectos reais destes equipamentos apresenta complexidade e não estava no foco deste trabalho. O comando disponível no AutoCAD para criação do cilindro direto em 3D se chama *box*.

### 3.4.9 Chaminé

Supondo um equipamento de  $2R$  de diâmetro e  $H$  de altura, a chaminé é criada da seguinte forma:

- Modifica-se o sistema de coordenada para orientação XZ já salva e, usando o comando *circle*, cria-se dois círculos, sendo um deles centrado em  $(0,0,0)$  de raio  $R$  e o outro centrado em  $(0,0,0.3H)$  de raio  $R/2$ , como apresentado no item (a) da Figura 3.18.
- Usando o comando *loft*, junta-se os dois círculos criados, como apresentado no item (b) da Figura 3.18.
- Usando o comando *cylinder*, cria-se um cilindro centrado em  $(0,0,0.3H)$  de raio  $R/2$  e altura  $0.7H$ , como apresentado no item (c) da Figura 3.18.
- O objeto final em 3D pode ser visualizado no item (d) da Figura 3.18.

**Figura 3.18 - Construindo a chaminé no AutoCAD.**



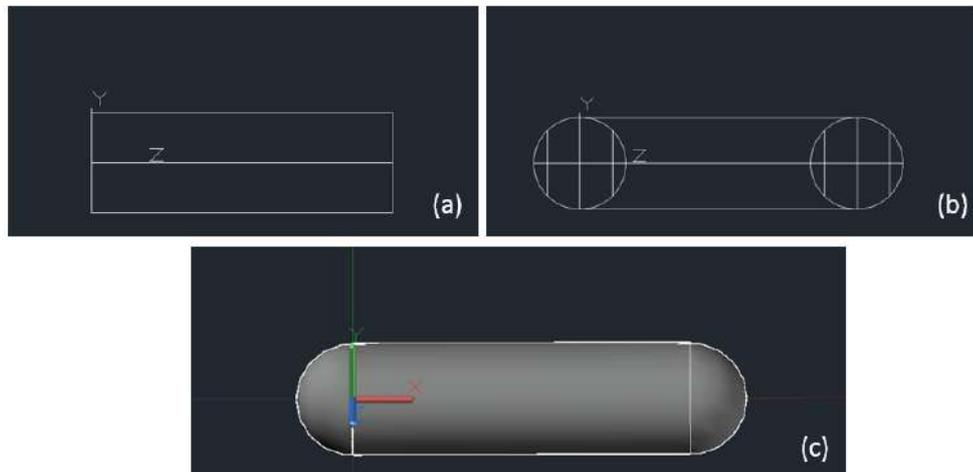
Fonte: Elaboração própria, 2023.

### 3.4.10 Trocador de calor

Supondo um equipamento de  $2R$  de diâmetro e  $L$  de comprimento, o trocador de calor é criado da seguinte forma:

- Modifica-se o sistema de coordenada para orientação YZ já salva e, usando o comando *cylinder*, cria-se um cilindro centrado em  $(0,0,0)$  de raio  $R$  e altura  $L$ , como apresentado no item (a) da Figura 3.19.
- Usando o comando *sphere*, cria-se duas esferas de raio  $R$ , sendo uma centrada em  $(0,0,0)$  e a outra em  $(0,0,L)$ , como apresentado no item (b) da Figura 3.19.
- O objeto final em 3D pode ser visualizado no item (c) da Figura 3.19.

**Figura 3.19 - Criando o trocador de calor no AutoCAD.**

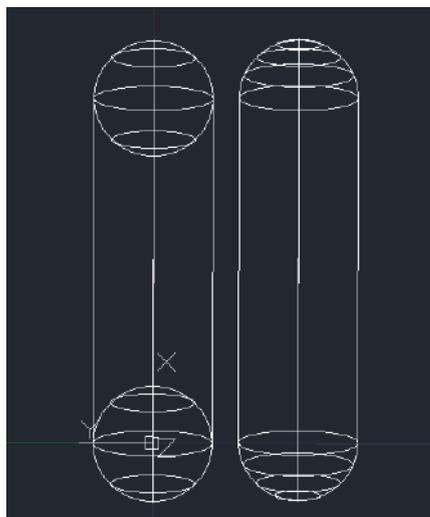


Fonte: Elaboração própria, 2023.

### 3.4.11 Comando *Union*

Como foi mostrado anteriormente, muitos equipamentos se resumem à junção de um ou mais sólidos geométricos. Por isso, ao final da criação desses equipamentos, é preciso que o comando *union* seja utilizado para unificar todos os sólidos gerando um único objeto.

**Figura 3.20 - À esquerda os sólidos antes de estarem agrupados. À direita o objeto formado após utilização do comando *union*.**



Fonte: Elaboração própria, 2023.

### 3.5 CONSTRUÇÃO DAS TUBULAÇÕES

Uma vez que os equipamentos tenham sido modelados em 3D, o objetivo passa a ser ordená-los no espaço tridimensional, de modo que seja possível desenvolver a percepção de arranjos fisicamente factíveis e a noção de como ocorrem as ligações entre esses equipamentos por meio de tubulações.

A ideia principal da construção dessas tubulações no AutoCAD é que seja desenhada uma linha base no espaço tridimensional, conectando cada par de equipamentos. Os tópicos desta seção especificam os passos adotados no processo, sendo importante reforçar que o foco do trabalho não foi otimizar esse desenho para que as tubulações ficassem em posições ótimas, mas sim permitir que um esboço simplificado, porém condizente, da planta seja feito e visualizado em 3D.

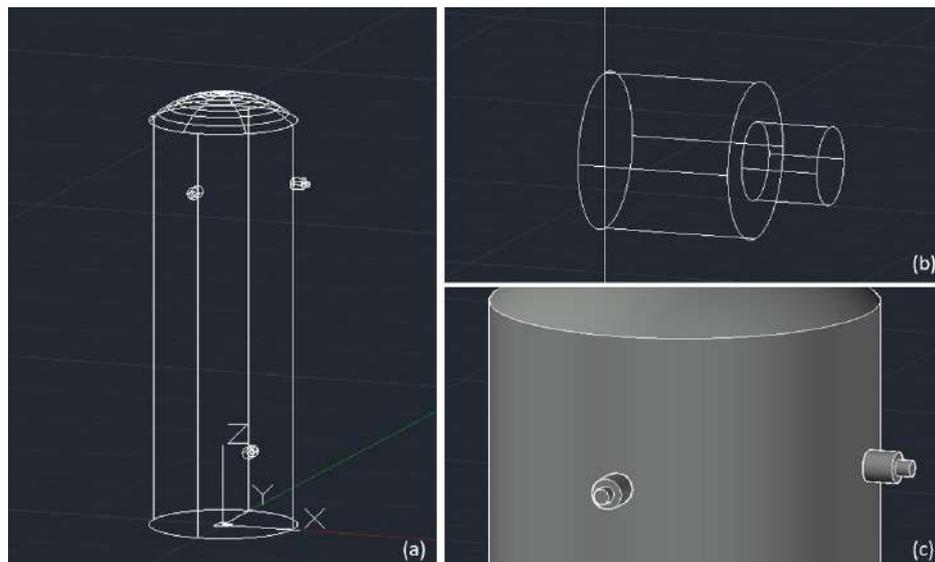
#### 3.5.1 Criação dos bocais

Para determinar mais facilmente o ponto do qual irão sair e entrar as tubulações nos equipamentos, utilizou-se a adição de bocais como recurso. Os bocais nada mais são do que dois cilindros, desenhados como ilustrado na Figura 3.21, na posição desejada para cada equipamento. A dimensão adotada para os bocais, neste trabalho, variou de 2 a 10 cm de raio

para o cilindro maior e de 1 a 5 cm de raio para o cilindro maior. Em relação às alturas, para o cilindro maior seu valor variou de 4 a 20 cm e para o menor de 2 a 10 cm.

Além dos dois cilindros, também são desenhados dois círculos nos bocais, sendo um deles de mesma dimensão e na mesma posição da base do cilindro maior e o outro de mesma dimensão e na mesma posição do topo do cilindro menor. Esses círculos, posteriormente, serão utilizados para determinar a localização  $(x,y,z)$  dos bocais criados.

**Figura 3.21 - Exemplo de bocais no reator.**

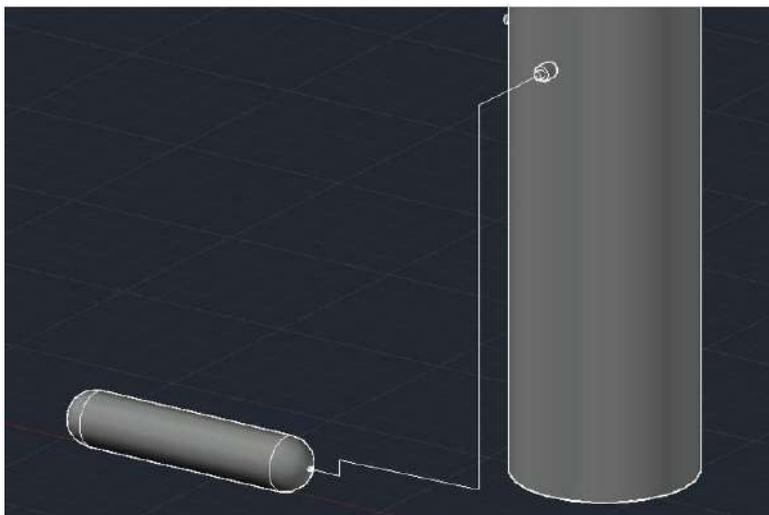


Fonte: Elaboração própria, 2023.

### 3.5.2 Determinação das coordenadas da linha base

A linha base usada no desenho das tubulações é algo como apresentado na Figura 3.22 e, para sua construção, é usado o comando *3dpoly*. Esse comando do AutoCAD é capaz de desenhar uma polilinha no espaço tridimensional, dadas as coordenadas do caminho que esta deve percorrer. A ideia, portanto, é que essa linha ligue o centro de um bocal ao centro de outro.

**Figura 3.22 - Exemplo de polilinha base conectando dois equipamentos.**



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Para determinar as coordenadas  $(x,y,z)$  do caminho a ser percorrido é usado um código já construído em Scilab (anexo A). A função que de fato determina essas coordenadas precisa de três principais entradas: raio do equipamento, coordenada  $(x,y,z)$  do centro do círculo da base do cilindro maior, coordenada  $(x,y,z)$  do centro do círculo de topo do cilindro menor.

As coordenadas dos círculos podem ser encontradas no próprio AutoCAD, com o auxílio do comando *properties* e, uma vez que os inputs sejam preenchidos corretamente, o código pode ser executado, gerando como resultado um conjunto de coordenadas  $(x,y,z)$ .

### **3.5.3 Uso do comando *3dpoly***

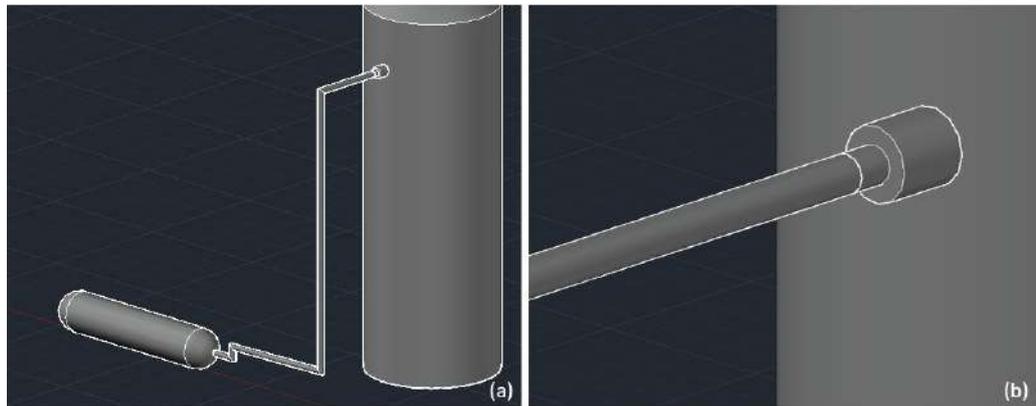
As coordenadas obtidas no Scilab servem como input para o comando *3dpoly* e, dessa forma, a polilinha base da tubulação é gerada. Para que o método funcione, entretanto, o eixo Z deve ser obrigatoriamente a altura, uma vez que o código foi programado considerando essa premissa.

Caso o usuário queira desenhar a linha base da tubulação na mão, sem digitar as coordenadas, também é possível, mas mais complexo. Se isso for feito, é essencial que o comando *ortho* seja ativado no AutoCAD, porque este permite que o movimento do cursor fique restrito à direção horizontal e vertical em relação ao UCS, garantindo que o desenho da tubulação seja feito no plano isométrico e, conseqüentemente, garantindo a fluidez de material no processo.

### 3.5.4 Uso do comando *sweep*

Com a polilinha de base desenhada, o comando *sweep* pode ser usado para fazer com que o círculo “varra” nessa direção, formando o desenho 3D da tubulação propriamente dito.

**Figura 3.23 - Tubulação após o uso do comando *sweep*.**



Fonte: Elaboração própria, 2023.

## 3.6 CONSTRUÇÃO DA PLANTA INDUSTRIAL EM 3D

As plantas desenhadas em AutoCAD para esse trabalho são versões iniciais, construídas para iniciar uma discussão sobre a importância da representação tridimensional, mas sem se preocupar em ser uma representação rigorosa da realidade. Por isso, algumas simplificações são feitas no modelo, como, por exemplo:

- Omissão da instrumentação;
- Omissão das utilidades;
- Representação apenas das tubulações principais, responsáveis por conectar os equipamentos e transportar as matérias-primas e produtos;
- Distância entre os equipamentos não seguindo normas específicas;
- Tamanho padrão para os equipamentos, sem dimensionamento específico para o processo;
- Disposição dos equipamentos seguindo uma lógica simplificada, não seguindo normas de delimitação de regiões;

Essa lógica de disposição simplificada dos equipamentos, por sua vez, foi baseada em alguns vídeos e imagens disponíveis na internet. Para o processo Formox, o principal vídeo utilizado como guia foi (CHEMICAL... 2015). Já para o processo de contato, não foi encontrado um vídeo igualmente explicativo. Para construção dessa planta, portanto, utilizou-

se uma lógica um pouco similar à planta de formaldeído, no que diz respeito ao “preparo” dos reagentes e sua alimentação na parte principal do processo, além de imagens encontradas em (KAPSOM, 2023).

É importante mencionar que, ao longo da criação dos modelos 3D, o eixo Z é tido como altura. Isso tanto para facilitar a obtenção de uma vista superior do arranjo geral da planta (plano XY do WCS), quanto para permitir o uso do código em Scilab mencionado na seção 3.5.2.

Por fim, mesmo que nem sempre o todo seja representado no PFD, é preciso levar alguns pontos em consideração ao desenvolver os modelos 3D, como por exemplo locais para estocagem de matéria-prima e estocagem de produtos, além de um caminho para as tubulações que garanta a fluidez do processo (painel de tubulações, do inglês, *pipe rack*), junto com as bombas e os compressores necessários.

### 3.6.1 Tamanho padrão dos equipamentos

A tabela abaixo mostra as dimensões adotadas como padrão para cada um dos equipamentos presentes em ambas as plantas.

**Tabela 3.5 - Dimensões padrão dos equipamentos desenhados.**

Equipamento	Largura (metro)	Comprimento (metro)	Altura (metro)	Diâmetro (metro)
Filtro	-	-	2	1
Compressor	-	2.5	-	1.5
Bomba	-	2.5	-	1.5
Trocador de calor	-	3	-	0.75
Reator de leito fixo	-	-	7	2.5
Absorvedor	-	-	10	1.75
Tanque	-	-	4	4
Torre de secagem	-	-	3	2
Forno	2	2.5	4	-
Caldeira	2	2.5	4	-
Conversor	-	-	8	2
Chaminé	-	-	10	1

Fonte: Elaboração própria, 2023

Essas dimensões foram definidas em pesquisas sobre tamanhos típicos de equipamentos vendidos por fornecedores, além de livros como (COUPER et al., 2005; TOWLER & SINNOTT, 2008; MORAN, 2017).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

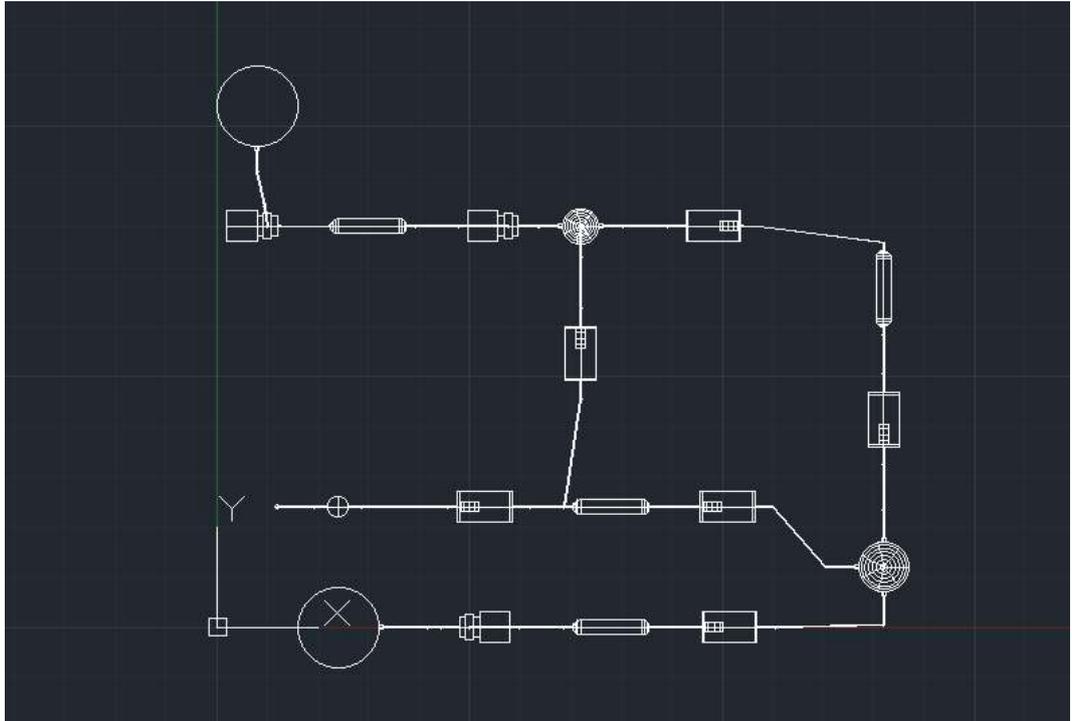
Como já mencionado anteriormente, em plantas industriais a disposição espacial de equipamentos e da ligação entre estes, as tubulações, corresponde ao layout de plantas. É essencial notar, entretanto, que o desenvolvimento desse layout é uma atividade que reúne vários conhecimentos de disciplinas de engenharia, sendo uma tarefa multiobjetivo de elevada complexidade, pois questões de logística e operabilidade devem estar em harmonia com a segurança de processos. Em plantas industriais de médio e grande porte, no layout define-se a espinha dorsal de um processo que é o *pipe rack* ou estante de tubulações e cabos que abastecem equipamentos; em plantas de baixo porte, além da comum falta de espaço disponível para estabelecer esta estrutura, seu custo pode onerar muito sobre os custos de instalação do processo não sendo viável economicamente (MORAN, 2015).

Reconhecendo isso, o objetivo do trabalho não foi fazer um layout completo das plantas de formaldeído e de ácido sulfúrico, mas sim gerar uma representação tridimensional dessas plantas que fornecesse ao leitor uma ideia inicial de distribuição espacial, além da noção de dimensão dos equipamentos presentes em ambas as plantas. Diversas simplificações foram feitas ao longo do esboço dos modelos, mas é importante notar que pouco se tem disponível na literatura hoje sobre modelos tridimensionais de plantas específicas, o que confere relevância ao trabalho.

### 4.1 REPRESENTAÇÃO 3D DA PLANTA DO PROCESSO FORMOX

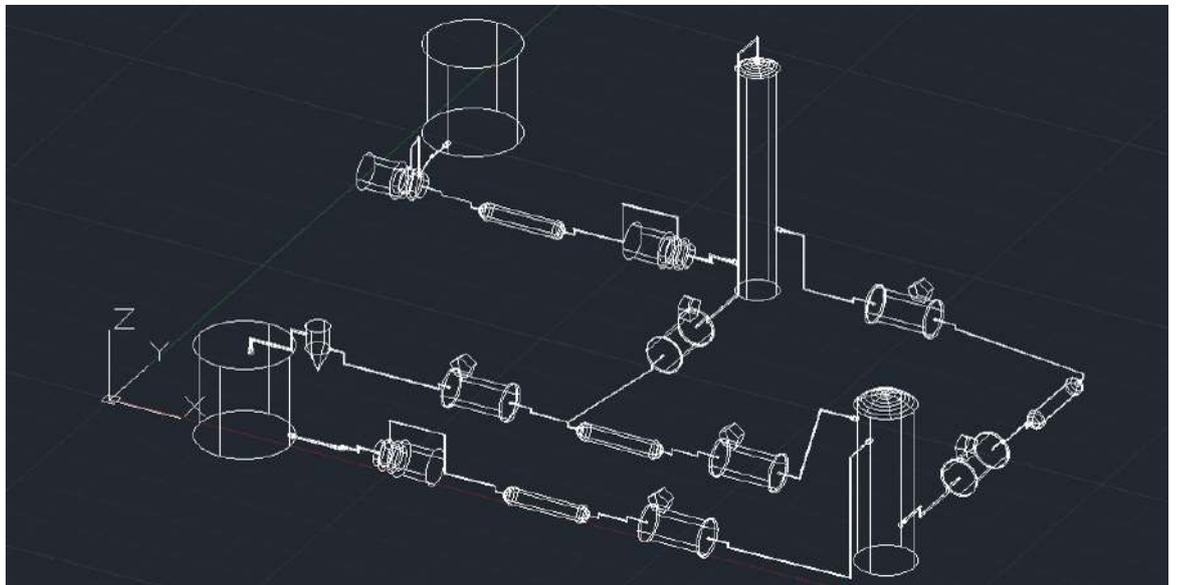
O modelo em 3D obtido para a planta do processo Formox é ilustrado abaixo em diferentes perspectivas.

**Figura 4.1 - Vista superior da planta de formaldeído.**



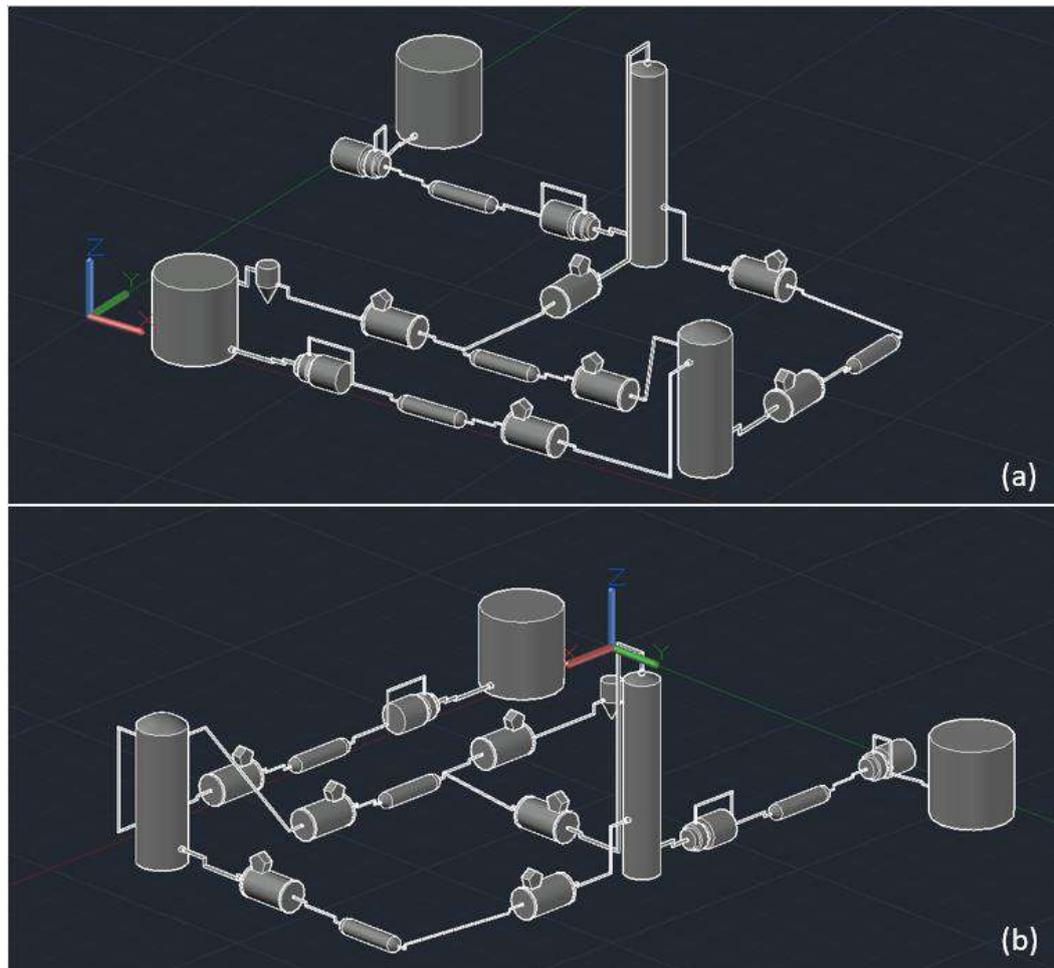
Fonte: Elaboração própria, 2023.

**Figura 4.2 - Planta de formaldeído no modo de visualização 2D Wireframe do AutoCAD.**



Fonte: Elaboração própria, 2023.

**Figura 4.3 - Planta de formaldeído no modo de visualização *Shades of Gray* do AutoCAD.**



Fonte: Elaboração própria, 2023.

O modelo construído busca representar o fluxo principal do processo, ou seja, as correntes de reagentes e de produtos, uma vez que muita informação, nesse primeiro momento, poderia gerar uma visualização confusa. Além disso, o AutoCAD, ao longo do desenvolvimento do trabalho, apresentou diversas limitações para que uma modelagem 3D mais complexa desta planta fosse elaborada.

Dentre essas limitações, a que mais tornou a construção do modelo demorada foi a dificuldade de desenhar a linha base das tubulações sem auxílio de programação. Mesmo com o modo ortogonal ativado no AutoCAD, não foi possível encontrar uma maneira de conectar os equipamentos sem o uso do algoritmo em Scilab. O uso desse algoritmo, por sua vez, exigiu que mais de 300 coordenadas fossem recolhidas, uma a uma, simulando o código individualmente para cada tubulação. Ademais, o uso do algoritmo também não permitiu que

as tubulações fossem desenhadas no formato ótimo ou ideal, podendo ser observado alguns desníveis e “zigue-zagues” cujo caminho não foi otimizado.

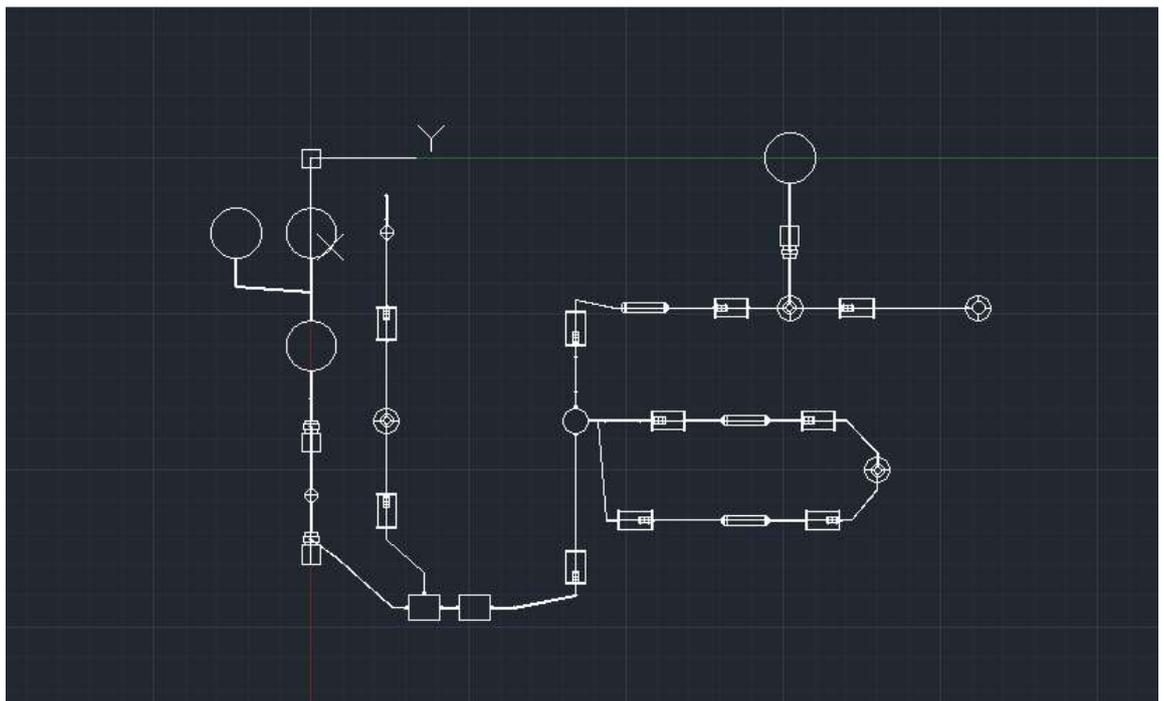
Outro ponto importante a ser observado no modelo, é que a falta dos desenhos das conexões, como luvas, joelhos e Tês (misturadores e divisores de correntes), dificultou a conexão, mistura e divisão das correntes, dificultando, por exemplo, a representação das correntes de reciclo. Além disso, a falta das conexões fez com que as tubulações sejam representadas nos pontos de mudança de altitude com “quinas retas”.

Falando especificamente do processo Formox, não se conseguiu representar com o sucesso desejado, por exemplo, a corrente de reciclo de formaldeído no absorvedor sem que essa corrente passasse por dentro dos equipamentos. O ar atmosférico alimentado ao processo, por sua vez, é ilustrado como se fosse uma corrente vinda do chão, já que na prática existiria uma tubulação central na planta responsável pelo transporte desse ar.

#### 4.2 REPRESENTAÇÃO 3D DA PLANTA DO PROCESSO DE CONTATO

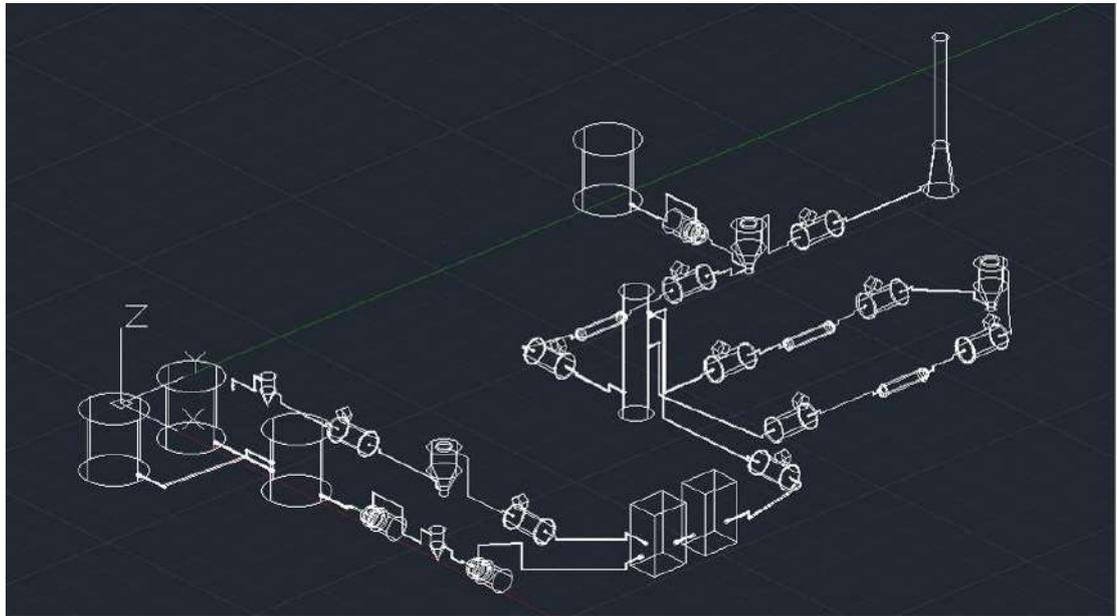
O modelo em 3D obtido para a planta do processo de contato é ilustrado abaixo em diferentes perspectivas.

**Figura 4.4 - Vista superior da planta de ácido sulfúrico.**



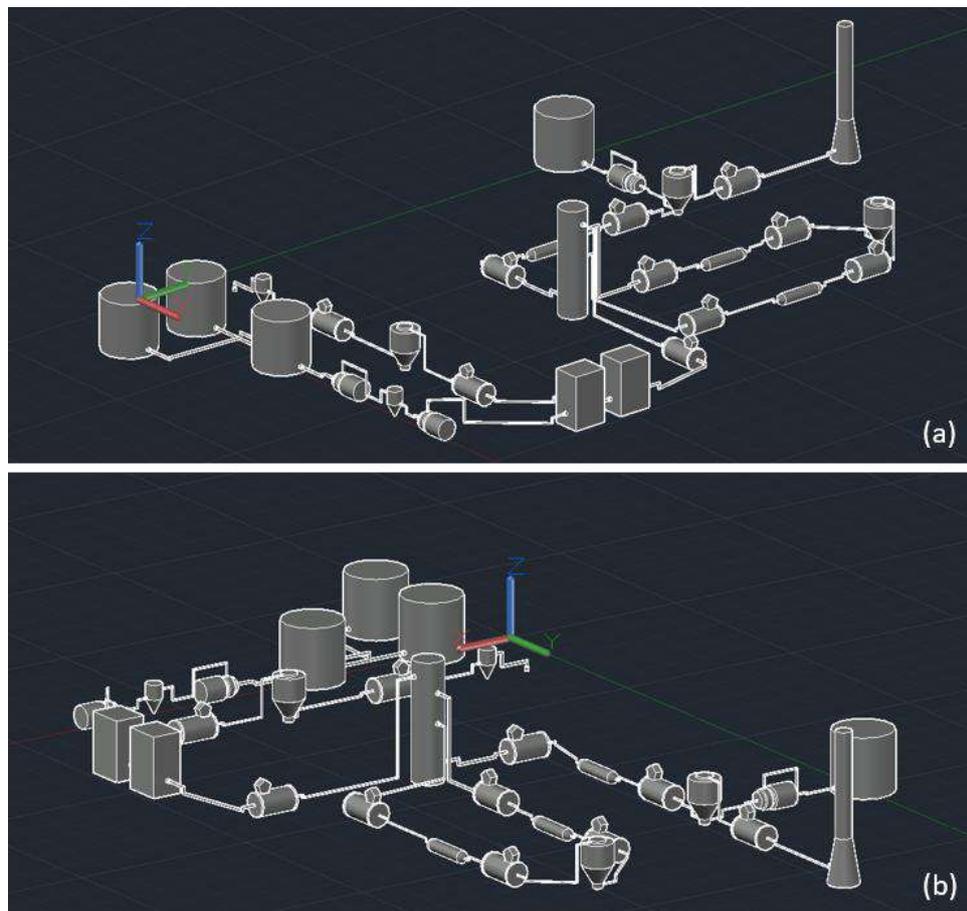
Fonte: Elaboração própria, 2023.

**Figura 4.5 - Planta de ácido sulfúrico no modo de visualização 2D Wireframe do AutoCAD.**



Fonte: Elaboração própria, 2023.

**Figura 4.6 - Planta de ácido sulfúrico no modo de visualização *Shades of Gray* do AutoCAD.**



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Os pontos de dificuldade mencionados em relação à construção das tubulações para a planta de formaldeído também se aplicam à planta de ácido sulfúrico, tornando a criação dessa planta extremamente morosa. Falando especificamente do processo de contato, não se conseguiu, por exemplo, representar as esteiras de transportes de sólidos que seriam usadas, na prática, para transportar o enxofre sólido e a cal virgem. Também não foi possível fazer uma diferenciação rápida entre forno e caldeira, o que pode dificultar o entendimento do processo sem o auxílio do PFD.

Por fim, para o processo de contato, foi especificamente difícil encontrar imagens e vídeos na literatura que fornecessem uma noção da disposição espacial dos equipamentos na planta, o que pode ter gerado um resultado menos condizente com a realidade. Essa dificuldade, por sua vez, evidencia o quanto existe uma carência de conhecimento em temas relacionados à criação de modelos tridimensionais de plantas. Tanto o Formox quanto o

processo de contato são processos bem estabelecidos na literatura, com diversos trabalhos detalhando esses processos e diversos PFDs disponíveis para consulta, mas nenhum deles apresentou representação ou biblioteca de modelos 3D já desenvolvidas.

#### 4.3 POR QUE DESENVOLVER MODELOS 3D?

Como mostrado ao longo da seção 4, reproduzir tridimensionalmente uma planta não é algo trivial, envolvendo o aprendizado em termos do uso de algum software, noções de dimensão, formato e disposição dos equipamentos e tubulações, além da capacidade de trabalhar com diferentes coordenadas do espaço. A construção de um modelo 3D, até mesmo pouco rigoroso, exige que o interessado estude o PFD de um processo já existente, por exemplo, e comece a se fazer perguntas como: “na prática, de onde vem essa corrente que aparece solta no diagrama?”, “aqui não tem uma bomba representada, será que existe um arranjo no qual o líquido se desloque pela ação da gravidade ou a bomba só foi omitida?”, “essa corrente entra por cima ou por baixo do equipamento?”, e assim em diante. Perguntas essas que também são válidas se um processo ainda está em fase de desenvolvimento e otimização, antes da construção da planta de fato.

O ponto é: ao longo da trajetória acadêmica muitos engenheiros e químicos industriais não desenvolvem esse tipo de pensamento crítico em relação às formas de representações de um processo. Muito se sabe sobre os balanços de massa e de energia, sobre os cálculos específicos que levam ao dimensionamento de cada equipamento e sobre a simulação e otimização de resultados, mas pouco se aprofunda em relação ao arranjo espacial da planta e suas proporções atingidas, ou seja, ao que é a planta na prática. Esse *gap* de conhecimento pode tornar ainda mais complicada a compreensão e o desenvolvimento de um processo e não vai de encontro ao caminho que vem sendo trilhado pela indústria nos últimos anos, com o desenvolvimento da indústria 4.0.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo a modelagem 3D de plantas de processos químicos baseando-se em dois estudos de caso: (i) a planta de formaldeído via processo Formox e (ii) a planta de ácido sulfúrico via processo de contato.

Analisando os PFDs de cada um dos processos e os modelos 3D obtidos no AutoCAD, percebe-se que eles podem ser facilmente relacionados. Foi possível, portanto, representar os equipamentos com tamanhos típicos, bem como as tubulações principais, de forma satisfatória, permitindo que o leitor tivesse uma visão inicial de como seria o esqueleto principal de ambas as plantas na prática. Na modelagem 3D dos processos foi necessário a utilização de mais de um plano, com definições de coordenadas do usuário, e com representações no plano isométrico.

Apesar de atingir os objetivos pleiteados neste trabalho com sucesso, o esboço 3D dessas plantas com distribuição e dimensões “reais” de equipamentos e seus fluxos principais, é interessante que alguns pontos chave fossem aprimorados, principalmente no que diz respeito ao desenho das tubulações. Conexões tubulares, como flanges e luvas, são de difícil representação no AutoCAD e, por isso, foram omitidas, o que tornou a representação dessas tubulações mais distante da realidade, dificultando também a inclusão de correntes de reciclo no desenho.

Outros pontos de dor observados ao longo do desenvolvimento dos modelos incluem a dificuldade de representar detalhadamente cada equipamento, bem como o *gap* de conhecimento existente no campo das representações tridimensionais, não havendo grande quantidade de material disponível que pudesse ser utilizado como referência. Por outro lado, esse *gap* existente deixa clara a necessidade e a relevância do presente trabalho.

Por fim, a modelagem 3D de processos mais complexos utilizando o AutoCAD tende a ser extremamente morosa e mais complexa.

### 5.1 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em trabalhos futuros sugere-se trabalhar acerca das simplificações já apresentadas na seção 3.6. Um estudo mais detalhado de cada processo permitiria através de simuladores de processos o dimensionamento adequado de seus equipamentos no lugar do uso de dimensões padrão, por exemplo. Além disso, recomenda-se uma pesquisa mais aprofundada acerca da

disposição ótima desses equipamentos também poderia ser feita, bem como o desenvolvimento de um desenho mais real das tubulações. São inúmeras as possibilidades diante da complexidade apresentada por uma planta industrial, mas sempre levando em consideração a necessidade de desenvolver a capacidade de pensar em 3D. Assim alguns possíveis tópicos para exploração do tema são:

- Estudo e elaboração de layouts de plantas considerando aspectos logísticos e operacionais em acordo com a segurança do processo. A distribuição espacial da planta deve ser dividida em áreas de distribuição, armazenamento, reação, separação e demais estruturas como alojamento, refeitórios, sala de controle, e vias de movimentação de funcionários e veículos na planta. Áreas de trabalho a quente, XP (área de explosão) e outras mais específicas em termos de segurança do processo também devem ser observadas.
- Uso de ferramentas especializadas no desenvolvimento de representações 3D de processos como o Aveva E3D, licenciado pela Escola de Química/UFRJ, levando em consideração as conexões tubulares e representações mais fiéis das tubulações presentes na planta.
- Simulação e dimensionamento dos equipamentos usando softwares como o Hysys, licenciado pela Escola de Química/UFRJ, visando ter dimensões mais apropriadas para uma dada produção de interesse.
- Estudo de segurança de processos por meio de simulações utilizando softwares como o Aloha para fins de avaliar áreas críticas e distâncias seguras na disposição de equipamentos e estruturas de pessoal.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACERVO LIMA. **Vantagens e desvantagens do AutoCAD**. Disponível em: <https://acervolima.com/vantagens-e-desvantagens-do-auto-cad/>. Acesso em: 16 jun. 2023.

ALBERTON, K. **Introdução ao Cálculo de Processos**. Escola de Química, UFRJ, 2023.

AMARAL, E. A. L. **AutoCAD: O que é, o que faz e para que serve**. Arquiteto Leandro Amaral, 4 jan. 2023. Disponível em: <<https://arquitetoleandroamaral.com/autocad-o-que-e-o-que-faz-e-para-que-serve/>>. Acesso em: 27 maio. 2023

ANDRADE, G. M. **Turbogeradores (turbinas a vapor, a gás), turbinas hidráulicas e turbinas eólicas**. Monografia—São Paulo: Universidade de Taubaté, 2015.

AUTODESK. **Sobre o sistema de coordenadas do usuário (UCS)**. Disponível em: <https://help.autodesk.com/view/ACD/2024/PTB/?guid=GUID-E658D5E7-EE5C-4A06-BF34-F71CDB363A71>. Acesso em: 07 jul. 2023.

AVEVA. **Aveva E3D Design**. Disponível em: <https://www.aveva.com/pt-br/products/e3d-design/#:~:text=O%20AVEVA%20E3D%20Design%20%C3%A9,processos%2C%20naval%20e%20de%20energia..> Acesso em: 25 jul. 2023.

BARBOSA, E. F. **Indústria 4.0**, 2022. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7662557/mod\\_resource/content/1/Aula02-Industria4.0.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7662557/mod_resource/content/1/Aula02-Industria4.0.pdf).

BRANCO, N. F. M. **Aumento da rentabilidade da fábrica de formaldeído**. Dissertação—Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2014.

CAMPOS, V. R. Ácido Sulfúrico (CAS No. 7664-93-9). **Revista Virtual de Química**, v. 3, n. 3, p. 210–214, 17 ago. 2011.

CETESB. **Formaldeído**. Disponível em: <https://produtosquimicos.cetesb.sp.gov.br/ficha/produto/69>. Acesso em: 17 abr. 2023.

CETESB. **Ácido sulfúrico**. Disponível em: <https://produtosquimicos.cetesb.sp.gov.br/ficha/produto/18>. Acesso em: 17 abr. 2023.

CHEMICAL Plant for Formaldehyde production (Animation Design). [S.I.]: Cobradesigns, 2015. Color. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=edBiF43mqz8>. Acesso em: 14 jul. 2023.

COSTA, A. F. DA. **Análise e estudos de segurança e ambiental do processo de produção de formaldeído por oxidação de metanol em excesso de ar.** Trabalho de Conclusão de Curso—Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2020.

COUPER, J. R. et al. **Chemical Process Equipment: Selection and Design.** [s.l.] Gulf Professional Publishing, 2005.

CUNHA, A. **Ácido sulfúrico.** Escola de Química, UFRJ, 2020.

FERNANDES, M. **Da produção à aplicação de ácidos fortes.** Trabalho de Conclusão de Curso—São Paulo: Universidade Federal de São Carlos, 2020.

FILHO, A. C. P. **Simulação e otimização de reator de formaldeído, processo prata, usando técnicas de inteligência artificial.** Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2007.

FOGLER, H. S. **Elementos de Engenharia das Reações Químicas.** 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

GD ARTES. **Como desenhar em perspectiva isométrica (passo a passo).** Disponível em: <<https://gdartes.com.br/como-desenhar-em-perspectiva-isometrica-passo-a-passo/>>. Acesso em: 9 jul. 2023.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

KANEHIRA, C. **Modelagem 3D: Por que realizar?** Disponível em: <https://eescjr.com.br/blog/modelagem-3d-por-que-realizar/>. Acesso em: 25 jul. 2023.

KAPSOM. **Sulfuric Acid Plant.** Disponível em: [https://www.kapsom.com/portfolio\\_category/sulfuric-acid-plant/#](https://www.kapsom.com/portfolio_category/sulfuric-acid-plant/#). Acesso em: 14 jul. 2023.

LIMBERGER, D. C. H. **Processos de recuperação, reuso e destinação do formol em laboratório de anatomia.** Dissertação—Rio Grande do Sul: Universidade Federal de Santa Maria, 2011.

LUCID. **Lucidchart.** Disponível em: <https://www.lucidchart.com/pages/pt>. Acesso em: 27 mai. 2023.

MICROSOFT. **O que é o Visio?** Disponível em: <https://support.microsoft.com/pt-br/office/v%3ADdeo-o-que-%3%A9-o-visio-421b0c94-7ecf-4e62-8072-d27e04d24fe6>. Acesso em: 27 mai. 2023.

**MolView**. Disponível em: <<https://molview.org/>>. Acesso em: 31 maio. 2023.

MORAN, S. **An applied guide to process and plant design**. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2015.

MORAN, S. **Process plant layout**. Second edition ed. Kidlington, Oxford, United Kingdom ; Cambridge, MA, United States: Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, 2017.

MOREIRA, C. DOS S. Formaldeído (CAS 50-00-0). **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 4, p. 1594–1601, 8 maio 2015.

PONTE, M. S. R. **Prevenção e minimização do impacto de falhas em bombas e compressores nos processos industriais**. Monografia—Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2018.

PONTES, A. H. **Modelagem bidimensional de um reator de leito fixo para a desidratação catalítica de etanol a eteno**. Dissertação—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

RAZOR. **Entenda o que é Autocad e qual a sua importância! - Blog da Razor**. Disponível em: <<https://razor.com.br/blog/tecnologia/o-que-e-autocad/>>. Acesso em: 27 maio. 2023.

REUSS, G. et al. Formaldehyde. Em: WILEY-VCH VERLAG GMBH & CO. KGAA (Ed.). **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2000. p. a11\_619.

SAGA. **O que é modelagem 3D?**. Disponível em: <https://blog.saga.art.br/o-que-e-modelagem-3d/>. Acesso em: 25 jul. 2023.

SANTOS, A. G. **Simulação e avaliação econômica da produção de ácido sulfúrico via processo de contato**. Monografia—Minas Gerais: Universidade Federal de Uberlândia, 2019a.

SANTOS, A. G. DOS et al. **Produção industrial de ácido sulfúrico a partir do dissulfeto de ferro**. Trabalho de Conclusão de Curso—Rio Grande do Sul: Universidade Federal de Santa Maria, 2021.

SANTOS, O. S. **Conversão catalítica de metanol assistida por óxido nitroso sobre catalisadores ácidos e básicos.** Tese—Salvador: Universidade Federal da Bahia, 2019b.

SHREVE, R. N.; BRINK JR, J. A. **Indústria de Processos Químicos.** 4. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2012.

SILVA, W. C. et al. **SÍNTESE ENZIMÁTICA DE BIODIESEL A PARTIR DO ÓLEO DE COCO EM REATORES DE LEITO FIXO, DOIS ESTÁGIOS, INCORPORANDO UMA COLUNA EXTRATORA DE GLICEROL.** Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química. **Anais...** Em: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA. Florianópolis, Brasil: Editora Edgard Blücher, fev. 2015. Disponível em: <<http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/16831>>. Acesso em: 10 abr. 2023

SOARES, M. C. G. M.; MARCOLAN, M. L. DE A. **Aprimoramento e avaliação técnico-econômica do processo produtivo de formalina com base em simulação computacional.** Projeto Final—Niterói: Universidade Federal Fluminense, 2019.

SOFTONIC. **Draw.io.** Disponível em: <https://draw-io.softonic.com.br/>. Acesso em: 27 mai. 2023.

SOUZA, R. DE. **Uso de válvulas redutoras de pressão na otimização de rede setorizada de distribuição de água.** Dissertação—João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2017.

SUTTON, I. S. **Process risk and reliability management.** 2. ed ed. Amsterdam [u.a.]: Elsevier, 2015.

TOWLER, G. P.; SINNOTT, R. K. **Chemical engineering design: principles, practice and economics of plant and process design.** Amsterdam; Boston: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2008.

TURTON, R. et al. **Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes.** [s.l.] Pearson Education, 2008.

VIEIRA, I. Í. F. et al. Efeitos da utilização do formaldeído em laboratórios de anatomia. 2013.

WANKAT, P. C. **Separation process engineering: includes mass transfer analysis.** 3rd ed ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2012.

WYKROTA, R. **Produção de ácido sulfúrico.** Trabalho de Conclusão de Curso—Curitiba: Centro Estadual de Educação Profissional de Curitiba, 2016.

ANEXO A – Código em Scilab utilizado para obtenção das coordenadas da linha base usada no desenho das tubulações

```
clear;clc;close;
```

```
boctopo=struct("tipo","topo","base",[],"ponta",[],"altura",[],"raio",[],"alturasolo",[])
```

```
boclal=struct("tipo","lateral","base",[],"ponta",[],"raio",[],"alturasolo",[])
```

```
// Bocal de Topo
```

```
b1 = boctopo
```

```
b1.base = [x y z]
```

```
b1.ponta =[x y z]´
```

```
b1.altura = H
```

```
b1.raio = R
```

```
b1.solo = h
```

```
// Bocal lateral
```

```
b2 = boclat
```

```
b2.base = [x y z]´´
```

```
b2.ponta =[x y z]´´´
```

```
b2.raio = R´
```

```
b2.solo = h´
```

```
// Bocal lateral
```

```
b3 = boclat
```

```
b3.base = [x y z]´´´´
```

```
b3.ponta =[x y z]´´´´´
```

```
b3.raio = R''
```

```
b3.solo = h''
```

```
function txt = trajetoria(b1,b2)
```

```
function P = pontos(b)
```

```
if b.tipo=="topo" then
```

```
    p = b.ponta
```

```
    P = [p]
```

```
    p = p + [0,0,b.altura]
```

```
    P = [P;p]
```

```
    p = p + [direcao(1),direcao(2),0]*b.raio
```

```
    P = [P;p]
```

```
    p = p + [0,0,b.solo-p(3)]
```

```
    P = [P;p]
```

```
elseif b.tipo=="lateral" then
```

```
    p = b.ponta
```

```
    P = p
```

```
    p = p + (b.ponta-b.base)/norm(b.ponta-b.base)*b.raio
```

```
    P = [P;p]
```

```
    p = p + [0,0,b.solo-p(3)]
```

```
    P = [P;p]
```

```
end
```

```
endfunction
```

```
if b1.tipo=="topo" & b2.tipo=="lateral" then
```

```
b0 = b1
bf = b2
elseif b2.tipo=="topo" & b1.tipo=="lateral" then
    b0 = b2
    bf = b1
elseif b1.tipo=="lateral" & b2.tipo=="lateral" then
    b0 = b1
    bf = b2
end

direcao = (bf.ponta - b0.ponta)
direcao = direcao/norm(direcao)
P = pontos(b0)
P2 = pontos(bf)
Pf = [P;P2($:-1:1,:)]
txt = strcat(string(Pf),",","c')

endfunction

// Função para um bocal de topo e um bocal lateral
txt = trajetoria(b1,b2)

// Função para dois bocais laterais
txt = trajetoria(b2,b3)
```