

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PAULO HENRIQUE AMORIM SANTOS

**AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA NO PROJETO DE UMA INDÚSTRIA  
PRODUTORA DE CLORETO DE ALILA NO BRASIL**

CURITIBA

2017

PAULO HENRIQUE AMORIM SANTOS

**AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA NO PROJETO DE UMA INDÚSTRIA  
PRODUTORA DE CLORETO DE ALILA NO BRASIL**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Especialista em Engenharia de Produção, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Marcell Mariano Corrêa Maceno

CURITIBA

2017

## TERMO DE APROVAÇÃO

PAULO HENRIQUE AMORIM SANTOS

### AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA NO PROJETO DE UMA INDÚSTRIA PRODUTORA DE CLORETO DE ALILA NO BRASIL

Monografia apresentada como requisito parcial à para obtenção do grau de Especialista no Curso de Engenharia de Produção, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Marcell Mariano Corrêa Maceno  
Departamento de Engenharia de Produção, UFPR

Co-orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Izabel Cristina Zattar  
Departamento de Engenharia de Produção, UFPR

Curitiba, 15 de dezembro de 2017.

## RESUMO

Apresenta-se o projeto de uma unidade de produção de cloreto de alila no Brasil, a partir da rota de cloração do propeno. Esse produto é aplicado principalmente nas indústrias como um intermediário da epicloridrina e de clorossilanos. Dado que o país não produz epicloridrina, a unidade foi projetada com capacidade de produção anual de 9.576 toneladas de cloreto de alila, destinadas à fabricação de epicloridrina suficiente para suprir a demanda nacional. O artigo objetiva identificar a possibilidade de redução de impactos ambientais ao incluir a avaliação de ciclo de vida durante o projeto preliminar de uma indústria química. A investigação compreende a pesquisa de mercado, o dimensionamento da planta de produção, e as análises ambiental e econômica do projeto. O projeto foi considerado economicamente viável. A aplicação da avaliação do ciclo de vida durante o projeto diminuiu possíveis impactos ambientais e mostrou oportunidade de reduzir custos através de integração energética.

**Palavras-chave:** Cloreto de Alila. Custos. Gestão Ambiental; Avaliação de Ciclo de Vida. Projeto Industrial.

## ABSTRACT

The project of a Brazilian allyl chloride production unit, from the chlorination route of propene, is presented. This product is mainly applied in industries as an intermediary of epichlorohydrin and chlorosilanes. Since the country does not produce epichlorohydrin, a unit with annual production capacity of 9,576 tons of allyl chloride is projected, designated for manufacturing enough epichlorohydrin to supply the national demand. This article objective is to identify the possibility of reducing environmental impact by including life cycle analysis on a chemical industry preliminary project. The investigation includes market research, the design of the production plant, and the environmental and economic analysis of the project. The project is considered economically viable. The life cycle assessment application during the project decreased possible environmental damages and showed the opportunity for reducing costs by energetic integration.

**Key-words:** Allyl Chloride. Costs. Environmental Management. Life Cycle Assessment. Industrial Project.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – ETAPAS DA METODOLOGIA DE PESQUISA.....	15
FIGURA 2 - DIAGRAMA DE BLOCOS DA SÍNTESE E PURIFICAÇÃO DO CLORETO DE ALILA .....	20

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – DADOS NACIONAIS DE IMPORTAÇÃO DA EPICLORIDRINA ENTRE 2011 E 2016.....	19
TABELA 2 – DADOS DIMENSIONAIS DOS TANQUES DE ARMAZENAMENTO ...	24
TABELA 3 - DADOS DIMENSIONAIS DO FORNO DE PRÉ-AQUECIMENTO DO PROPENO .....	25
TABELA 4 - DADOS DIMENSIONAIS DO REATOR-01 .....	27
TABELA 5 - PARÂMETROS SHORT CUT PARA AS DESTILAFORAS PF-01, D-01 E D-02 .....	28
TABELA 6 - PARÂMETROS RATE BASED PARA AS DESTILADORAS PF-01, D-01 E D-02.....	28
TABELA 7 – PARÂMETROS RATE BASED PARA A ABSORVEDORA AB-01. ....	29
TABELA 8 - PARÂMETROS RATE BASED PARA AS ADSORVEDORAS AD-01 A/B. ....	30
TABELA 9 - ESPECIFICAÇÕES INSERIDAS NO ASPEN EXCHANGER DESIGN AND RATING®.....	31
TABELA 10 - SUMÁRIO DO BALANÇO DE MASSA DA UNIDADE.....	33
TABELA 11 – SUMÁRIO DO CAPITAL DE GIRO DA UNIDADE.....	35
TABELA 12 - SUMÁRIO DO BALANÇO DE MASSA DA UNIDADE.....	36
TABELA 13 – DADOS DIMENSIONAIS DOS TANQUES DE ARMAZENAMENTO .	37
TABELA 14 – REDUÇÕES DE IMPACTOS MEDIDAS PELAS SIMULAÇÕES DO PROCESSO ADAPTADO .....	38

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	13
1.2	OBJETIVOS .....	13
1.2.1	Objetivo Geral.....	14
1.2.2	Objetivos Específicos .....	14
1.3	METODOLOGIA .....	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>17</b>
2.1	ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA .....	18
2.2	AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA .....	18
<b>3</b>	<b>PROJETO DA FÁBRICA .....</b>	<b>19</b>
3.1	DESCRIÇÃO DO PROCESSO.....	21
3.2	UTILIDADES .....	22
3.3	DIMENSIONAMENTOS.....	23
3.3.1	Tanques.....	23
3.3.2	Forno .....	24
3.3.3	Reator.....	25
3.3.4	Destiladoras.....	27
3.3.5	Absorvedora .....	29
3.3.6	Adsorvedora .....	30
3.3.7	Trocadores de Calor .....	31
<b>4</b>	<b>ANÁLISES ECONÔMICA E AMBIENTAL.....</b>	<b>32</b>
4.1	ANÁLISE ECONÔMICA .....	32
4.2	ANÁLISE AMBIENTAL .....	35
4.3	ADAPTAÇÃO DO PROJETO .....	38
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>39</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>40</b>
	<b>ANEXO 1 – RESULTADOS DA ACV .....</b>	<b>43</b>
	<b>ANEXO 2 – BALANÇO DE MASSA DAS UTILIDADES .....</b>	<b>44</b>
	<b>ANEXO 3 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO .....</b>	<b>45</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico é objetivo de grande parte das atividades humanas, sendo um processo irreversível que está vinculado a uma série de mudanças sociais, tecnológicas e ambientais (ASSIS, 2009). Porém, o processo de forte industrialização verificado a partir de meados do século XX vem provocando impacto no meio ambiente e afetando a saúde da sociedade (ITANI e VILELA, 2007). As crescentes emissões de resíduos e poluentes no ar, no solo e na água exigem da prática industrial adequações em seus processos, minimizando essa contaminação. A conscientização do setor industrial não somente é um requisito legal, mas também é resultado de exigências do mercado consumidor, que impõe normas de controle ambiental (ASSIS, 2009).

### 1.1 JUSTIFICATIVA

A crescente tendência de se evitar danos ambientais associados à manufatura em larga escala e a valorização da proteção ambiental tem aumentado o interesse no desenvolvimento de métodos de identificação e quantificação das fontes de impactos (ALTAMIRANO, 2013). Uma das técnicas em desenvolvimento com este propósito é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). A ACV corresponde ao balanço dos potenciais impactos ambientais consequentes de um processo de manufatura ao longo do ciclo de vida de seus produtos. Como ciclo de vida, entende-se a história do produto, desde a fase de extração das matérias primas, passando pela fase de produção, distribuição, consumo, uso e até sua transformação em lixo ou resíduo (RIBEIRO et. al.) . Esta técnica de gestão ambiental funciona como ferramenta para auxiliar na escolha de recursos naturais a serem consumidos e no controle da emissão de poluentes, orientando o projeto para minimizar o dano ao meio ambiente.

Neste contexto, surge a seguinte questão de pesquisa: “Quais os benefícios da utilização da ACV ainda durante o projeto de implantação de uma indústria?”

### 1.2 OBJETIVOS

Este trabalho é estruturado sob um objetivo geral, apresentado na sequência, bem como os objetivos específicos necessários para atingir ao objetivo geral proposto.

### 1.2.1 Objetivo Geral

Esse artigo objetiva analisar os benefícios da utilização da ACV durante o projeto de implantação de uma unidade produtora de cloreto de alila no Brasil, em uma perspectiva econômica e ambiental.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

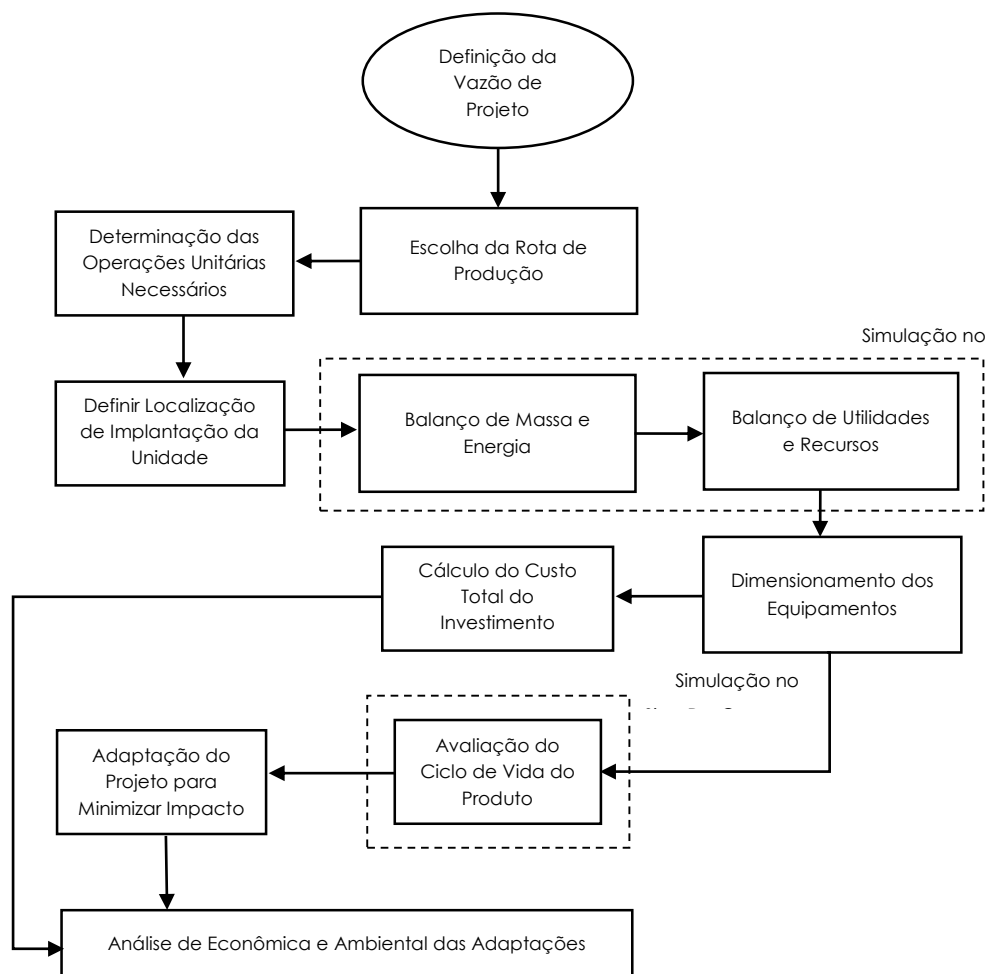
Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Pesquisa de Mercado;
- b) Dimensionamento da Planta de Produção;
- c) Análise Econômica;
- d) Análise Ambiental.

## 1.3 METODOLOGIA

As etapas do desenvolvimento foram adaptadas do método proposto por Gohr et al. (2013) e estão demonstradas na Figura 1:

FIGURA 1 – ETAPAS DA METODOLOGIA DE PESQUISA



FONTE: adaptado de Gohr et al. (2013).

Inicialmente determinou-se a vazão de projeto, de acordo com o “Sistema de Análise das Informações de Comércio Exterior” (Alice Web), que divulga estatísticas brasileiras de exportações e importações. A definição da rota de produção e a escolha das operações foram fundamentadas na ampla bibliografia já existente sobre o processo de produção do Cloreto de Alila.

Para a realização dos balanços de massa e energia da unidade utilizou-se o software de uso comercial Aspen Plus® 8.4. O software é uma ferramenta de modelagem de processos químicos, e através de simulação, permite a otimização de processos, fornecendo os parâmetros fundamentais para o dimensionamento de equipamentos industriais (SILVA et. al; 2013). O programa considera os modelos termodinâmicos selecionados, calcula as propriedades físico-químicas dos compostos presentes e, com os dados inseridos sobre as condições de operação e considerações

de cada equipamento, calcula as vazões e entalpias correspondentes a todas as correntes do processo (SANTOS et. al; 2015).

Para a simulação do processo no Aspen Plus® adotou-se como modelo termodinâmico global o NRTL. Como os equipamentos operam a pressões abaixo de 10 bar, a aproximação de gás ideal dada pelo modelo NRTL é válida, pois há baixa interação entre os pares binários. Para a fase líquida, tratada como incompressível, os coeficientes de atividade são calculados baseando-se na energia livre de Gibbs, e dependendo exclusivamente da temperatura e da composição de cada volume de controle. Como exceção, para a simulação da coluna de absorção faz-se necessário a aplicação de um modelo termodinâmico que considere a presença de eletrólitos. Assim, para a obtenção dos parâmetros físico químicos, o modelo ELECNRTL foi escolhido.

Através da simulação do Aspen Plus ® também obtém-se o inventário de emissões e recursos naturais utilizados no processo produtivo, o que permite a realização da avaliação do ciclo de vida. A ACV foi realizada com o auxílio do software Simapro ® 7.3 que utiliza-se de bancos de dados de sistemas produtivos dos EUA e Europa, e permite estimar a viabilidade ecológica a partir da análise dos impactos ambientais consequentes (CAVALETT, 2008).

Para a ACV, foram seccionadas as 6 principais áreas da planta. Foram atribuídos a cada uma dessas unidades funcionais o consumo de água, energia elétrica, a ocupação do terreno e o inventário de emissões nocivas. Foram utilizados três modelos de avaliação de impactos, seguindo a classificação proposta por Carvalho et. al (2014):

- Ecological Scarcity 2006: análise de impactos ecológicos e fatores humanos;
- EPS 2000: mensuração do consumo de recursos naturais e energéticos;
- Berger et. al. 2014: avaliação do consumo e contaminação de água.

Os resultados do inventário de emissões e de potencial impacto foi utilizado para identificar as atividades que são as maiores causas dos impactos ambientais. As opções para reduzir o impacto ambiental foram pesquisadas e implementadas. O efeito potencial das opções de redução sobre o impacto ambiental foram quantificadas em relação ao caso de referência.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

O cloreto de alila, ou 3-cloropropeno, é o único cloropropeno de importância industrial, sendo muito reativo quando submetido à adição e a polimerização, o que possibilita a síntese de uma ampla gama de derivados de alila (ULLMANN, 2007). A produção em larga escala foi possibilitada no final dos anos 1930, pela IG Farben e a Shell Development Co; que desenvolveram a cloração com propeno a alta temperatura com bom rendimento. Uma parte significativa do processo foi desenvolvido pela Shell Chemical Co. nos anos posteriores (ULLMANN, 2007). O cloreto de alila não é um composto amplamente fabricado (IPCS INCHEM, 1996), sendo que, para a indústria química, é uma substância usada como intermediária em muitas aplicações, destacando-se na fabricação de polímeros, resinas, materiais plásticos, preparação e modificação de catalisadores, manufatura de pesticidas, adesivos, agentes quelantes, detergentes, perfumes, fármacos e uretanos (DOW, 2015).

Aproximadamente 90% de toda a produção mundial de cloreto de alila é consumida na produção de epícloridrina que, por sua vez, é utilizada na fabricação de resinas epóxi (ULLMANN, 2007). O consumo mundial de epícloridrina é próximo a 1,5 milhão de toneladas por ano, e expansão anual média de 4% (INERIS, 2006), aproximando-se à 5% nos últimos 5 anos (MARKETSANDMARKETS, 2017). A síntese da epícloridrina normalmente é feita na mesma unidade de produção, evitando assim o transporte dessa substância. Ainda que existam outras rotas de produção de epícloridrina, a produção de cloreto de alila ainda cresce mundialmente, tanto para continuar a alimentar as unidades de produção já existentes que operam pelo processo clássico quanto para outras aplicações que este composto apresenta. Segundo o site Markets and Markets (2017), o maior mercado consumidor de epícloridrina é o asiático, (seguido dos mercados europeu e americano) apresentando maior tendência de expansão prevista para os próximos cinco anos. Os maiores fabricantes deste produto, atualmente são a Dow Chemical Company (EUA), Shandong Haili Chemical Industry Co. Ltd (China), e a Solvay SA (Bélgica). No Brasil, não existe produção de cloreto de alila, e a epícloridrina é importada a 10.000 a 12.700 toneladas por ano.

## 2.1 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

A análise econômica indica qual o tamanho do capital a ser investido, para que um empreendimento transforme-se de ideia em realidade, e opere da maneira que se deseja. Assim, o projeto de uma indústria avança simultaneamente à sua análise econômica, dentro das limitações técnicas e ambientais.

A análise econômica em um dado empreendimento só é possível uma vez que a viabilidade técnica de um projeto é documentada. Ainda que se trate de uma estimativa preliminar, a análise econômica fornece uma ideia da viabilidade de um projeto, e é a partir dela que tem-se uma projeção do retorno de investimento esperado (CAMARGO, 2017).

## 2.2 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

Em 1972, o “Midwest Research Institute” (MRI) iniciou um estudo de reciclagem em embalagens de cervejas e sumos, o qual marcou o início do desenvolvimento da ACV (FERREIRA, 2004). Porém, foi só a partir de 1990 em que notou-se um crescimento das atividades de ACV na Europa e nos EUA (SANTOS, 2009). A Análise do Ciclo de Vida dos produtos tem geralmente sua aplicação mais intensa na área industrial, tendo como objetivos frequentes a identificação de pontos críticos e a otimização dos processos produtivos (SANTOS, 2009).

A ACV é uma técnica que, a partir da compilação de um inventário de entradas e saídas pertinentes ao sistema de produção, avalia aspectos ambientais e impactos potenciais associados a um produto (RIBEIRO, 2003). Como resultado, facilitam-se as tomadas de decisão na seleção de produtos ou processos, visando a preservação do meio ambiente.

A importância de considerar a sustentabilidade ainda no estágio de projeto atende à necessidade de encontrar soluções que minimizem emissões de resíduos e necessidades de recursos naturais. Se um projeto estiver bem planejado e os critérios sustentáveis estiverem incluídos em sua abordagem precoce, a possibilidade de reduzir os impactos negativos é maior e o custo da implementação dos critérios é bastante reduzido.

### 3 PROJETO DA FÁBRICA

A vazão de projeto foi determinada através da média de importação de epicloridrina entre 2011 e 2016, como mostra a Tabela 1. Visando uma produção de cloreto de alila em quantidade e pureza suficiente para suprir a demanda nacional de epicloridrina, determinou-se como capacidade anual de produção 9.576 toneladas de cloreto de alila (GRIFFING e OVERCASH, 1999). A operação ocorre em um período de 24 horas por dia, 330 dias por ano, com uma parada pré-fixada para manutenção.

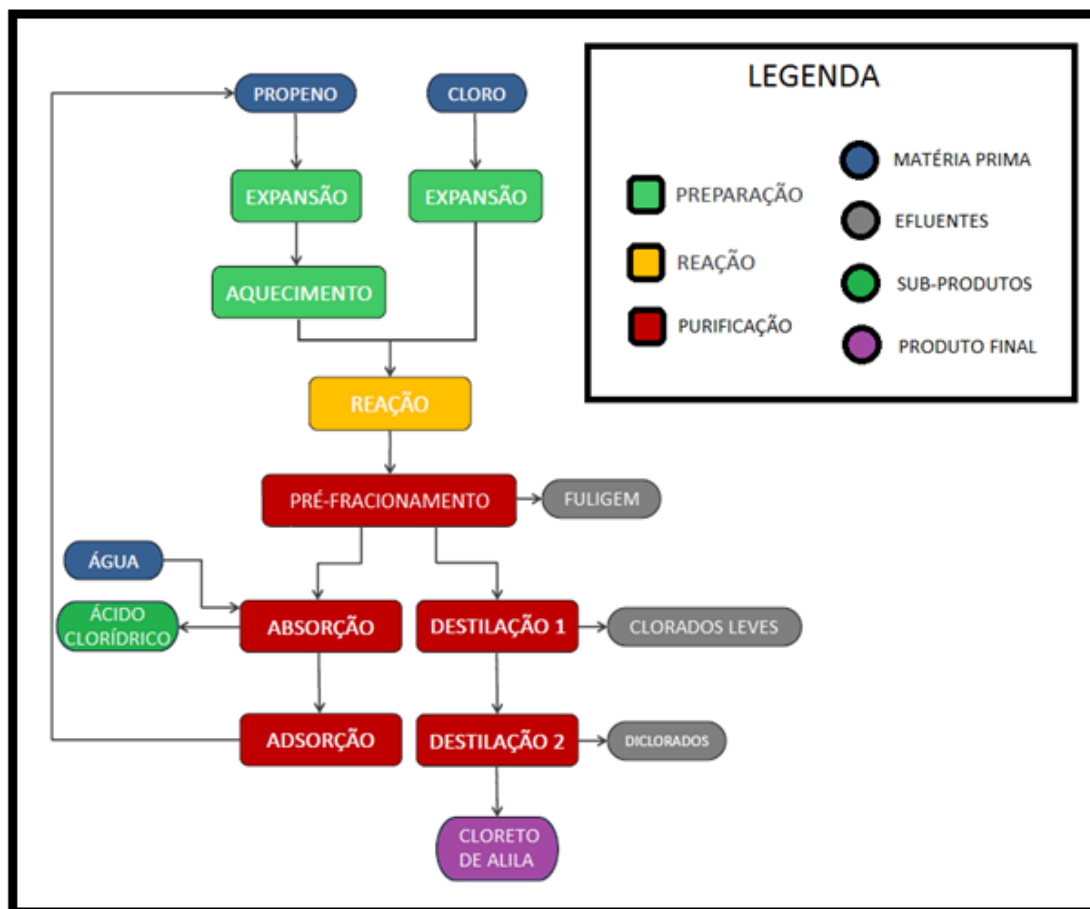
TABELA 1 – DADOS NACIONAIS DE IMPORTAÇÃO DA EPICLORIDRINA ENTRE 2011 E 2016

Ano	Custo de Importação (US\$, FOB)	Peso Líquido (kg)	Preço Específico (US\$/kg)
2016	14.933.057,00	10.331.758,00	1,45
2015	22.344.037,00	10.863.562,00	2,06
2014	18.266.829,00	10.356.913,00	1,76
2013	19.829.574,00	11.253.019,00	1,76
2012	21.792.372,00	11.462.231,00	1,9
2011	22.239.439,00	10.950.205,00	2,03
Média	19.900.884,67	10.869.614,67	1,83

FONTE: Alice Web (2017).

A cloração do propeno foi escolhida por ser a rota que apresenta maior histórico de informações, cinética conhecida e um bom rendimento (ULLMANN 2007). O processo é antigo e bem detalhado pela literatura, existindo uma concordância sobre as etapas necessárias para a síntese e a purificação do cloreto de alila. Pela rota escolhida, o cloreto de alila é produzido pela reação de propileno e cloro gasosos a temperatura ótima de 510 °C (ULLMANN, 2007). A Figura 2 apresenta o diagrama de blocos para o presente projeto, denotando suas operações unitárias e fluxos mássicos.

FIGURA 2 - DIAGRAMA DE BLOCOS DA SÍNTESE E PURIFICAÇÃO DO CLORETO DE ALILA



FONTE: o autor (2017).

A literatura existente sobre o processo permite estimativas dos parâmetros produtivos dos processos de síntese e purificação do produto. Ullmann (2007) fornece dados de conversão e seletividade para a reação. De forma análoga, Griffing e Overcash (1999) e Turton (1998) colaboram com dados dos processos de reação e da separação do produto final. A partir disso, a simulação no software Aspen Plus® fornece os balanços de massa e de energia, tornando possível o dimensionamento dos equipamentos de transformação, armazenamento e deslocamento positivo da unidade.

Dada a proximidade dos fornecedores de matéria prima e a possibilidade de venda dos subprodutos, o Polo Industrial de Camaçari, Bahia, foi escolhido estrategicamente para a implantação da indústria. Quanto à logística de transportes, o polo está muito bem estruturado, uma vez que é alimentado por três rodovias estaduais e duas federais, e ainda pela localização privilegiada devido à proximidade de portos (COFICPOLO, 2014).



### 3.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO

O processo tem início com os reagentes, propileno e cloro puros, armazenados liquefeitos em tanques pressurizados à temperatura ambiente. A corrente de reposição de propileno que entra no processo sofre expansão até atingir 2 Atm (62,21 °C) e é misturada com uma corrente de reciclo de propeno não reagido, que contém traços de água. A mistura entra em uma coluna adsorvedora (AD-01) onde a água residual é removida. O propileno seco é pré-aquecido em um forno (F-01) a 425 °C antes de alimentar o reator (R-01).

O cloro deixa o tanque de armazenamento e entra no processo a 25 °C, sendo expandido até 3 atm e 149,51 °C. A mistura dos reagentes deve ser eficiente e rápida, de forma a minimizar a formação de subprodutos. Assim, utilizam-se bocais que promovam o aumento da turbulência ou acessórios que possibilitem a distribuição de gases (ULLMANN, 2007). Todo o cloro é convertido no reator R-01 em cloreto de alila, cloreto de hidrogênio e pequenas quantidades de outros hidrocarbonetos clorados. Além disso, é necessária a remoção periódica da fuligem acumulada nas paredes do reator (GRIFFING e OVERCASH, 1999).

O cloreto de alila bruto procede então a uma série de operações de purificação, primeiramente sendo resfriado em um conjunto de trocadores de calor (TC-02 e TC-03) até 25° C. A mistura é pré-fracionada, onde o propileno e o cloreto de hidrogênio são separados dos orgânicos halogenados. A mistura gasosa que deixa o pré-fracionador é preaquecida a 25°C antes de ser submetido a uma coluna absorvedora (AB-01).

A absorção utiliza água como solvente para produzir cloreto de hidrogênio em concentração mássica de 36%, sendo vendido como subproduto do processo. O propileno com água residual é reciclado ao início do processo.

Os orgânicos halogenados da vazão inferior do pré-fracionador entram em uma coluna de destilação (D-01), onde o topo fornece 2-cloropropeno, cloreto isopropílico e uma pequena fração de cloreto de alila, efluentes do processo. A corrente de interesse deixa o equipamento pelo fundo, contendo o a maior massa de cloreto de alila, 1,2-dicloropropano, 1,3-dicloropropeno e os compostos chave-pesados. Essa corrente é submetida a uma segunda coluna de destilação (D-02) onde o topo fornece o cloreto de alila com pureza 99,90% mássica, que é resfriado e

armazenado. O fundo da destiladora D-02 é uma corrente efluente, que é resfriada antes de deixar o sistema produtivo.

### 3.2 UTILIDADES

O combustível utilizado no forno F-01 para pré-aquecimento do propeno é o gás natural, por ser mais uma alternativa ecológica em comparação ao carvão. Uma corrente de ar é necessária para realizar a combustão do gás na câmara do forno.

O fluido de resfriamento do trocador de calor TC-02, localizado na saída do reator é água de refervedor. Nele, a mistura gasosa que deixa o meio reativo é resfriada de 510°C a 200 °C. Neste caso, a água é pressurizada a 5,9 atm. Ao longo da troca de calor, esta água será vaporizada, e sua energia é aproveitada em outras operações da planta.

Para as correntes de processo com temperatura inferior a 35° C utiliza-se um ciclo de refrigeração de propileno, escolhido pela conveniente disponibilidade e eficiência de troca térmica. O fluido de refrigeração é utilizado nos trocadores de calor TC-04, TC-08, TC-09 e na serpentina SAB-01, que proporciona o resfriamento da absorvedora. Como o ciclo é fechado, não há gastos com make-up de propileno, apenas energia empregada em um compressor (C-04) e gastos com água de resfriamento. Outro fluido refrigerante utilizado é o Dowtherm A ®, óleo que proporciona a isotermicidade do reator através da serpentina SR-01.

Os demais resfriamentos da planta são proporcionados por água (1 atm, 27°C), disponível através de um sistema de resfriamento por torre, e água gelada (1atm, 7,2°C), resultante do ciclo de refrigeração do propeno. Considera-se que a temperatura da água aquecida é de 50 °C, tendo um salto térmico de 23 °C.

O vapor utilizado na fábrica é de 17,9 atm de pressão, resultando em uma temperatura de 207 °C, sendo aplicado nos refervedores e demais sistemas de aquecimento. A caldeira é o equipamento utilizado para produção deste vapor pressurizado para aplicação como fluido de aquecimento no processo. O modelo escolhido é do tipo flamatubular e gás natural para produção de vapor, garantindo baixo nível de emissões atmosféricas.

### 3.3 DIMENSIONAMENTOS

Os equipamentos foram dimensionados sob adequações de segurança, contabilizado a presença de compostos tóxicos, perigosos, inflamáveis e corrosivos. Ao longo do processo não se trabalha fora dos limites de inflamabilidade ou explosividade, eliminando a possibilidade de condições críticas e acidentes.

O material das tubulações foi escolhido com base nos compostos sendo transportados e nas temperaturas de operação. O material de utilização majoritária da unidade de produção de cloreto de alila é o aço-liga ASTM A335 Gr. P5. Este aço suporta altas temperaturas, como aquelas encontradas na parte inicial do processo, no forno e no reator. Nas linhas em que existe a presença de ácido clorídrico, os equipamentos terão um revestimento de ECTFE (etileno clorotrifluoretileno), comercializado pela Solvay com o nome de Halar ECTFE. Este copolímero é recomendado para compostos altamente corrosivos ou ultrapuros, como bases inorgânicas e ácidos fortes.

Todos os tubos serão sem costura. Este cuidado é necessário pois diversos gases perigosos e tóxicos estão envolvidos na operação e deve-se garantir que não existam regiões das tubulações suscetíveis a vazamentos. O dimensionamento dos compressores foi feito a partir do método ASME para gases não ideais. Os equipamentos foram simulados no software como politrópicos e centrífugos. A potência de cada bomba foi simulada pela equação de Bernouille, garantindo apenas vencer a perda de carga intrínseca da tubulação.

#### 3.3.1 Tanques

Para a planta de produção de cloreto de alila foram dimensionados sete vasos cilíndricos, destinados ao armazenamento das matérias primas (cloro e propeno), efluentes (dicloroados e clorados leves), água e produtos (cloreto de hidrogênio e cloreto de alila). Os tanques foram dimensionados segundo a metodologia indicada por Seider (2009), que propõe o cálculo da espessura de vasos segundo parâmetros de temperatura, pressão, corrosão e a influência da força de arraste do vento.

O tempo de residência dos fluídos foi estimado como 6 horas, garantindo uma capacidade suficiente para o processo para uma gestão de redução de estoques. Os tanques foram determinados como verticais, pois além de serem mais econômicos,

garantem maior segurança no armazenamento de compostos inflamáveis ou perigosos, uma vez que é mais fácil controlar o nível de fluido (WALLAS, 1990). Os parâmetros necessários para dimensionamento dos tanques estão descritos na Tabela 2.

TABELA 2 – DADOS DIMENSIONAIS DOS TANQUES DE ARMAZENAMENTO

Tanque	TQ-01	TQ-02	TQ-03	TQ-04	TQ-05	TQ-06	TQ-07
Fluido	Propileno	Cl <sub>2</sub>	Cloreto de Alila	Diclorados	Clorados Leves	Água	HCl
Pressão (bar)	13,08	8,9	1,4	1,4	1,4	1,4	2,15
Vazão (m <sup>3</sup> /h)	1,04	1,04	1,36	0,23	0,06	1,94	2,25
Volume (m <sup>3</sup> )	9,90	6,23	8,16	1,38	0,33	1,94	13,49
Altura (m)	5,86	5,02	5,50	3,04	1,89	3,41	6,50
Diâmetro (m)	1,47	1,26	1,37	0,76	0,47	0,85	1,63
Espessura (in)	0,38	0,375	0,1875	0,1875	0,1875	0,1875	0,25

FONTE: O autor (2017).

Os dois reagentes serão submetidos a válvulas de expansão ao deixarem o tanque de armazenamento. Utilizam-se válvulas globo lineares e, a partir da queda de pressão necessária para a mudança de fase, foi possível determinar para a linha de propileno a válvula do fabricante Masoneilan, série 21.000, com Cv de 5,9 e 1,5 in de diâmetro. Já para a linha de cloro, a válvula escolhida é Masoneilan, série 28.000, com Cv de 1,7 e 0,5 in de diâmetro.

### 3.3.2 Forno

O forno é uma alternativa mais econômica para o aquecimento do propeno do que um trocador de tipo casco e tubo. O tipo escolhido é o de caixa e foi projetado considerando-se uma eficiência de 70%, segundo o método de cálculo desenvolvido por Lobo & Evans, cuja metodologia é descrita por Kern (1965). O forno projetado utiliza gás natural como combustível, uma vez que é uma opção menos nociva ao meio ambiente e pela abundância do combustível no estado da Bahia. Considera-se que metano e o oxigênio reagem em uma queima completa. Os parâmetros dimensionais do forno F-01 são apresentados na Tabela 3.

TABELA 3 - DADOS DIMENSIONAIS DO FORNO DE PRÉ-AQUECIMENTO DO PROPENO

Forno	F-01
Temperatura (°C)	425
Pressão (atm)	3
Perda de Carga (atm)	0,3
Vazão volumétrica (m <sup>3</sup> /h)	609,6
Volume da área Radioativa (m <sup>3</sup> )	16,2
Altura (m)	1,8
Largura (m)	1,8
Comprimento (m)	5

FONTE: O autor (2017).

### 3.3.3 Reator

As condições ótimas de operação do reator são descritas por Ullmann (2007), que afirma que a temperatura de reação deve ser de 510°C, utilizando excesso de propeno para evitar a dupla cloração. Além da temperatura de reação, a razão entre os reagentes, a qual está relacionada à temperatura de pré-aquecimento do propeno, é fundamental para garantir um bom rendimento da reação. (ULLMANN, 2007). Pode-se atingir um rendimento superior a 80% e seletividade de 80% para a produção de cloreto de alila (ASINGER, 2013). A pressão e o tempo de residência no reator têm pouco efeito na formação dos produtos, uma vez que a reação é rápida, ocorrendo em poucos segundos, e justificando a não utilização de catalisadores.

As reações consideradas no reator R-01 são apresentadas na Tabela 4. Além das reações descritas, para propósito de coerência do balanço energético, adotou-se a formação de compostos chaves-pesados o (representativamente, o 1 – Deceno foi considerado nas simulações). Ainda, fuligem é formada a uma taxa que não influi os balanços material e energético. Para o dimensionamento do reator, considerou-se apenas as reações mais significativas (reações 1, 2, 4 e 6), cujos dados cinéticos estão disponíveis na literatura (CARBERRY, 1976).

QUADRO 1 – REAÇÕES DE SÍNTESE CONSIDERADAS NO BALANÇO DE MASSA: CLORETO DE ALILA (1), 2-CLORÓPROPENO (2), CLORETO ISOPROPÍLICO (3), 1,3-DICLOROPROPENO (4), 2,3-DICLOROPROPENO (5) E 1,2-DICLOROPROPANO (6).

$CH_2 = CH - CH_3 + Cl_2 \rightarrow CH_2 = CH - CH_2Cl + HCl$	(1)
$CH_2 = CH - CH_3 + Cl_2 \rightarrow CH_2 = CCl - CH_3 + HCl$	(2)
$CH_2 = CH - CH_3 + HCl \rightarrow CH_3 - CHCl - CH_3$	(3)
$CH_2 = CH - CH_3 + Cl_2 \rightarrow CHCl = CH - CH_2Cl + 2 HCl$	(4)
$CH_2 = CH - CH_3 + Cl_2 \rightarrow CH_2 = CCl - CH_2Cl + 2 HCl$	(5)
$CH_2 = CH - CH_3 + Cl_2 \rightarrow CH_2Cl - CHCl - CH_3$	(6)

FONTE: o autor (2017).

O reator foi dimensionado segundo TURTON et. al. (2009) sendo do tipo leito fluidizado com sólido inerte (areia) e com um sistema de regeneração. A refrigeração necessária devido à exotermia é calculada segundo o descrito pelo autor, e considerada como trocador de calor do tipo duplo tubo (serpentina SR-01). Como forma de não perder energia para o meio ambiente e também como critério de segurança, devido à alta temperatura, o reator deverá ser isolado termicamente. O rendimento encontrado pela simulação foi de 79,5% e a seletividade de 71,4%, condizentes ao esperado. Os parâmetros construtivos do reator são expostos na Tabela 4.

TABELA 4 - DADOS DIMENSIONAIS DO REATOR-01

Reator	R-01
Carga Térmica (MJ/h)	2217,42
Pressão (atm)	3
Perda de Carga (atm)	0,2
Vazão volumétrica (m <sup>3</sup> /s)	0,58
Volume (m <sup>3</sup> )	5,11
Altura (m)	0,68
Diâmetro (m)	1,55
Espessura (in)	0,25
Número de Tubos	27
Tempo de residência (s)	8,9

FONTE: O autor (2017).

### 3.3.4 Destiladoras

Após a produção do cloreto de alila bruto, utilizam-se três destiladoras para purificar o produto (PF-01, D-01 e D-02). A destilação foi escolhida como processo de separação pelo fato de esses compostos terem diferentes pontos de ebulição e volatilidade relativa. As destiladoras foram dimensionadas por meio do método Short Cut do simulador Aspen Plus V8.4, para uma primeira estimativa de seus parâmetros. As especificações de projeto baseiam-se neste modelo, e são: fração de destilado/alimentação, número mínimo de estágio, razão de refluxo mínima, estágio de alimentação e pressão no topo da coluna, que foi escolhido como a menor que ainda atinja as especificações de separação. O resultado da simulação Short Cut para as três colunas é apresentado na Tabela 5.

TABELA 5 - PARÂMETROS SHORT CUT PARA AS DESTILAFORAS PF-01, D-01 E D-02

Destiladora	PF-01	D-01	D-02
Número de Estágios	10	35	18
Pressão (atm)	2,9	1,4	1,4
Estágio de Alimentação	10	17	11
Razão de Refluxo	5	112	0,42

FONTE: O autor (2017).

O dimensionamento no modelo Rate Based considera o equilíbrio de transferência de matéria e energia por estágio de destilação, e fornece o diâmetro e altura da coluna dada a especificação dos pratos ou recheios. As três colunas são de recheio randômico cerâmico Intalox Saddle (1,0 in), definido a partir da necessidade do material devido à corrosão. Tal alternativa é seguida por Caldas (2007) para processos de fluidos corrosivos, e espera-se como resultado do dimensionamento baixo diâmetro da coluna (menor que 1 m). Para a simulação dessas colunas, o HETP utilizado foi uma estimativa relacionada ao diâmetro da coluna (KISTER, 1976), visto que não é disponível o dado pelos fornecedores, resultando em um valor de 0,457 m. Para estas colunas considera-se um distanciamento de aproximadamente 3 m entre os distribuidores, optando-se por colocar um no topo. Assim, a partir deste parâmetro e da área superficial do recheio conhecido, é possível definir os demais parâmetros construtivos das colunas, resumidos na Tabela 6.

TABELA 6 - PARÂMETROS RATE BASED PARA AS DESTILADORAS PF-01, D-01 E D-02.

Destiladora	PF-01	D-01	D-02
Perda de Carga por Estágio (atm)	0,02	0,02	0,06
Altura Total (m)	9,96	22,31	13,62
Diâmetro (m)	1,5	0,74	0,42
Espessura (in)	0,25	0,31	0,25

FONTE: O autor (2017).



### 3.3.5 Absorvedora

O produto de topo da primeira coluna de destilação é uma corrente de propeno e cloreto de hidrogênio gasoso, destinada a separação em uma coluna de absorção. O solvente empregado na absorção do cloreto de hidrogênio é a água, devido a sua facilidade de obtenção e eficiência como solvente. Assim, há uma vazão de saída de ácido clorídrico diluído e outra com propeno e água residual. A vazão de solvente é definida para resultar em uma concentração mássica de saída do HCl de 36%.

Na absorção de HCl em água, espera-se uma liberação de energia de 60 kJ/mol de HCl absorvido, acarretando em uma alta geração de energia e, conseqüentemente, necessitando de uma serpentina para remoção do calor.

O interno escolhido mais uma vez é o Intalox Saddle cerâmico de 1 polegada. A altura equivalente ao prato teórico (HETP), para este recheio, é de 0,457 m (KISTER, 1976). A liga metálica escolhida para o equipamento foi a Hastelloy, uma marca registrada da Haynes International, que é altamente resistente à corrosão. Os parâmetros da absorvedora são apresentados na Tabela 7.

TABELA 7 – PARÂMETROS RATE BASED PARA A ABSORVEDORA AB-01.

Absorvedora	AB-01
Número de Estágios	10
Pressão (atm)	2
Estágio de Alimentação	10
Razão de Refluxo	1,6
Perda de Carga por Estágio (atm)	0,02
Altura Total (m)	9,96
Diâmetro (m)	0,66
Espessura (in)	0,19

FONTE: O autor (2017).

### 3.3.6 Adsorvedora

A remoção de água residual da corrente de reciclo de propeno é realizada por peneiramento molecular, em um par de colunas de adsorção que operam em paralelo. Como base para o dimensionamento do equipamento, foi realizado o “scale-up” de um sistema de adsorção de escala laboratorial (YUDINSON, 1965), mantendo-se constante a pressão do projeto e a velocidade de escoamento linear, bem como o material adsorvente (Zeólita NaA 4A, 2 mm).

A água adsorvida nas zeólitas é então removida no processo de regeneração do adsorvente. Como a regeneração da zeólita é um processo lento, faz-se necessário duas colunas para operação alternada. A regeneração das zeólitas se dá pelo fluxo ascendente de ar após o escoamento da coluna, utilizando-se de um pequeno compressor (C-01). O propileno puro retorna para o início do processo e se junta à corrente de make-up para alimentar o reator.

A coluna necessita de um distribuidor em seu topo e uma grade de suporte para as pequenas esferas de zeólita, sendo escolhido o fluxo descendente para evitar arraste e fluidização das mesmas. A Tabela 8 apresenta os principais parâmetros construtivos dos equipamentos.

TABELA 8 - PARÂMETROS RATE BASED PARA AS ADSORVEDORAS AD-01 A/B.

Adsorvedora	AD-01 A/B
Número de Estágios	10
Pressão (atm)	12
Estágio de Alimentação	1
Perda de Carga por Estágio (atm)	0,17
Altura Total (m)	4,50
Diâmetro (m)	0,92
Espessura (in)	0,375
Massa de Zeólita (kg)	930
Tempo de Ciclo (min)	30

FONTE: O autor (2017).

### 3.3.7 Trocadores de Calor

Os trocadores de calor são do tipo casco e tubos horizontal e o arranjo escolhido para os tubos foi o triangular. Esta configuração foi definida por permitir a obtenção de uma maior área de troca térmica por volume. Priorizou-se em manter o fluido de processo no interior dos tubos, dado a sua corrosividade. Em segunda instância, os tubos foram destinados aos fluídos quentes ou pressurizados, visando proporcionar maior segurança na fábrica.

O dimensionamento final desses equipamentos foi feito no software Aspen Exchanger Design and Rating V8.4, pois este programa realiza a otimização dos parâmetros construtivos de trocadores de calor, escolhendo aquele de menor custo. Para estas simulações, alguns parâmetros foram definidos como padrão para a alimentação de dados no software, expressos na Tabela 9.

TABELA 9 - ESPECIFICAÇÕES INSERIDAS NO ASPEN EXCHANGER DESIGN AND RATING®.

Parâmetro	Valor ou intervalo especificado
Overdesign	20%
Fator de correção da temperatura (FT)	Mínimo de 0,85
Turbulência dos Bocais	$\rho v^2 < 3000 \text{ lb/ft s}^2$
Corte de chicanas	Mínimo de 25% e máximo de 45%
Fator de incrustação	Especificado para cada fluido de acordo com intervalos e recomendações do Kakaç (2002).

FONTE: O autor (2017).

A lista utilidades utilizadas nos trocadores de calor, as áreas de troca térmica e as especificações de seu serviços são listados no Anexo 2.

## 4 ANÁLISES ECONÔMICA E AMBIENTAL

Partindo do dimensionamento dos equipamentos, avalia-se qual o capital total a ser investido para construir a unidade industrial. Com esse valor, calcula-se qual será o preço mínimo de venda do produto. Esta etapa determina se o projeto atende aos objetivos dos investidores e, portanto prossegue, ou então se encerra por não ser lucrativo ao nível desejado.

Sendo o projeto viável, o inventário de emissões e recursos naturais utilizados no processo produtivo é analisado pela metodologia ACV. A análise do ciclo de vida objetiva identificar os pontos críticos e minimizar possíveis impactos ambientais.

As modificações no processo foram analisadas pelas perspectivas econômica e ambiental, para investigar os benefícios da utilização da ferramenta ainda na etapa de projeto.

### 4.1 ANÁLISE ECONÔMICA

A análise econômica é apresentada como uma estimativa inicial da rentabilidade do negócio. Uma vez dimensionados os equipamentos e estabelecido o processo, foi possível estimar o custo de sua implantação e o retorno financeiro que o investimento pode gerar. Para que a indústria seja instalada, foram considerados os custos fixos, que incluem os depreciáveis e os não depreciáveis.

A equação para a estimativa do capital total investido (CTI), segundo o método de Guthrie (1974) é apresentada pela Equação 1:

$$CTI = \underbrace{1,18 (C_{TM} + C_{\text{área}} + C_{\text{instalações}} + C_{\text{utilidades}})} + C_{\text{giro}} + C_{\text{partida}} + C_{\text{terreno}} \quad \text{EQ (1)}$$

O fator 1,18 que aparece na equação considera a reserva de contingência (15%) e despesas de contrato (3%), e multiplica somente os valores que compõem a parcela depreciável do CTI. O primeiro destes valores é custo total do módulo (CTM) é o custo instalado de todos os módulos que compõem a planta. Levam-se em conta o dispêndio com tubulações, acessórios, concreto e ferro para as bases, estruturas de suporte, instrumentos e controladores, cabos e materiais elétricos, além da mão de obra envolvida em todas as etapas da instalação. As equações específicas para a estimativa de cada equipamento foram obtidas através das correlações e valores

sugeridas por Guthrie (1974) e Seider et. al. (1999). Todos os cálculos referentes aos custos dos módulos dos equipamentos foram atualizados para o primeiro semestre de 2017 (CE = 541,7). Para converter esses valores para reais, foi fixada uma conversão de R\$ 3,20 para cada US\$ 1,00. A Tabela 10 resume os valores obtidos.

TABELA 10 - SUMÁRIO DO BALANÇO DE MASSA DA UNIDADE.

<i>Equipamentos</i>	<i>Preço</i>	<i>Trocadores de Calor</i>	<i>Preço</i>
R-01	R\$ 406.186,14	TC-01	R\$ 5.883,08
PF-01	R\$ 1.618.545,44	TC-02	R\$ 159.130,10
AB-01	R\$ 802.388,56	TC-03	R\$ 312.049,11
AD-01 A/B	R\$ 1.920.629,61	TC -04	R\$ 340.912,27
D-01	R\$ 1.808.564,83	TC-05	R\$ 41.886,38
D-02	R\$ 827.965,63	TC-06	R\$ 29.406,78
F-01	R\$ 1.118.891,53	TC-07	R\$ 14.349,43
Deslocamento Positivo		TC-08	R\$ 31.681,63
Bombas	R\$ 673.106,04	TC-09	R\$ 254.149,29
C-01	R\$ 616.579,26	TC-10	R\$ 48.306,54
C-02	R\$ 801.126,43	TC-11	R\$ 15.393,59
C-03	R\$ 952.394,74	TC-12	R\$ 265.332,45
C-04	R\$ 988.587,48	TC-13	R\$ 266.776,63
Serpentinas		TC-14	R\$ 6.767,66
SR-01	R\$ 278.428,70	TC-15	R\$ 50.800,10
SAD-01	R\$ 146.774,3595	TC-16	R\$ 393.974,72
SAB-01	R\$ 216.025,63	TC-17	R\$ 10.293,14
Efluentes			
ETE	R\$ 1.542.328,73	CTM	R\$ 16.965.615,98

Fonte: O autor, 2017.

Além do  $C_{TM}$  outros três valores incluem-se no capital total depreciável ( $C_{TD}$ ):

$C_{\text{área}}$  - O dispêndio na preparação da área, considerando terraplanagem, construção de ruas, cercas e muros, galerias de águas pluviais, etc. Para planta nova, é comum adotar-se o valor de 15% do  $C_{TM}$  (R\$ 2.544.842,40).

$C_{\text{instalações}}$  - Compreende construções e prédios tanto da área de processo como fora dela. Para unidades instaladas no interior de prédios, o custo das instalações na área de processo pode ser estimado também em 15% do  $C_{\text{TM}}$ .

$C_{\text{utilidades}}$  - Deve considerar todo o capital previsto para a aquisição e instalação de todas as unidades que compõem as utilidades. A essas estimativas, deve-se somar ainda a área de tancagem, recebimento e embarque de materiais. A estes valores é conveniente somar-se 5% do  $C_{\text{TM}}$  para cobrir custos de serviços não previstos enquanto o projeto não se completa (R\$ 6.204.398,13).

Portanto, chega-se ao resultado de um capital total depreciável de R\$ 33.346.444,72. Já para o cálculo do capital total não depreciável, consideraram-se os seguintes custos:

$C_{\text{terreno}}$  - Custo de aquisição do terreno, estimado em R\$ 5.000.000,00.

$C_{\text{partida}}$  - Partida da unidade: pode-se considerar como valor de 2% do  $C_{\text{TD}}$  (R\$ 666.928,89), uma vez que o processo já é bem conhecido.

$C_{\text{giro}}$  - Para calcular os despendios mensais são consideradas as despesas referentes à matéria prima, gastos energéticos, manutenção (2% do  $C_{\text{TD}}$ ), segurança (1% do  $C_{\text{TD}}$ ) e mão de obra, como ilustra a Tabela 11 Para a obtenção do custo de mão de obra considerou-se todos os encargos sociais aplicáveis. A energia elétrica será provida da COPENE, e a água da EMBASA, com valores de tarifas de ambas as fontes atualizados para 2017. A matéria prima será contabilizada como R\$ 3,53/kg para o propileno e R\$ 3,58/kg para o cloro (ALICEWEB, 2017).

TABELA 11 – SUMÁRIO DO CAPITAL DE GIRO DA UNIDADE

Custo	Preço
Mão de Obra	R\$ 260.000,00
Manutenção	R\$ 666.928,89
Segurança	R\$ 333.464,45
Utilidades	R\$ 62.774,47
Energia Elétrica	R\$ 27.236,48
Combustível	R\$ 106.614,00
Matéria Prima	R\$ 5.214.015,55
Capital de Giro	R\$ 1.457.018,29

FONTE: O autor (2017).

A partir da Equação 1, o custo total do investimento pode ser calculado com a soma dos custos depreciáveis aos não depreciáveis. Assim, estima-se como custo total do investimento o valor de R\$ 40.470.391,90.

A análise de rentabilidade do projeto foi realizada baseando-se em um período de um ano. Considerando a capacidade de produção da planta como fixa e alterando o preço de venda do cloreto de alila, é possível encontrar o preço de venda mínimo deste produto para obtenção de lucro bruto igual a zero. O cálculo foi feito utilizando a função “Atingir Metas” do Microsoft Office Excel®. Para o cálculo do lucro bruto foi subtraída das vendas o capital de giro e a depreciação linear anual. O resultado para o preço mínimo de venda do cloreto de alila foi de R\$ 1,37, inferior ao preço de importação da epicloridrina no Brasil (R\$ 5,65), e portanto, significando a viabilidade econômica do projeto.

## 4.2 ANÁLISE AMBIENTAL

Os resíduos gerados na unidade de produção de cloreto de alila podem ser divididos em resíduos sólidos, líquidos e gasosos.

O único efluente gasoso presente no processo de produção do cloreto de alila provém das emissões do forno de aquecimento do propeno. Ele é ajustado para que a queima seja completa, de forma a emitir apenas CO<sub>2</sub> e vapor de água. O combustível utilizado é o gás natural, não havendo emissões de materiais particulados.

As correntes líquidas contém compostos clorados, e devem ser encaminhadas para tratamento terceirizado. A fuligem resultante da reação é o único efluente sólido do processo, e seu tratamento também é terceirizado.

Outras emissões da indústria incluem a água gerada na lavagem do gás do forno, a água da chuva, a água de lavagem dos pátios e equipamentos, e os efluentes sanitários. Para realizar o descarte, contabilizou-se a instalação de uma estação de tratamento de efluentes.

Os fluxos de matéria do sistema produtivo são mostrados na Tabela 12.

TABELA 12 - SUMÁRIO DO BALANÇO DE MASSA DA UNIDADE

	Nome	Vazão (kg/h)	Fase
Matéria-Prima	Propeno	821,14	Gás
	Cloro	1437,47	Gás
	Água	1305,08	Líquido
Produtos	Cloreto de Alila (99,9%)	1210,21	Líquido
	Solução HCl 36% Mássica	732,20	Líquido
	Cloreto de Alila	24,59	Líquido
	Cloreto Isopropílico	2,80	Líquido
	2-Cloropropano	33,35	Líquido
Efluentes	2,3-Dicloropropeno	16,62	Líquido
	1,2-Dicloropropano	55,24	Líquido
	1,3-Dicloropropeno	136,34	Líquido
	Chaves-Pesados	21,07	Líquido
	Fuligem	1,88	Sólido

FONTE: O autor (2017).

A abordagem da análise de ciclo de vida foi a do tipo “berço ao portão”, onde é realizada a mensuração de danos desde a extração de recursos até o portão da fábrica, ou seja, antes do transporte para o consumidor. Como objetivo, buscou-se identificar as etapas críticas dentre os processos da unidade. Todas as bibliotecas inclusas no software foram utilizadas, porém, os dados referentes a recursos hídricos e elétricos foram selecionados da base de dados nacionais. A análise de potenciais impactos ao meio ambiente foi realizada com auxílio do software SimaPro 8®, que



contém uma biblioteca de inferências ambientais e diversos métodos de quantificação de danos. Os equipamentos da planta foram então seccionados em 6 áreas principais. A atribuição do inventário de emissões e do consumo de recursos anual foi feita conforme mostra a Tabela 13. Devido a limitação da biblioteca, os compostos clorados foram considerados como “dicloropropeno”.

TABELA 13 – DADOS DIMENSIONAIS DOS TANQUES DE ARMAZENAMENTO

Fase	Gás Natural (MJ/ano)	CO2 (kg/ano)	Água (kg/ano)	Vapor (kg/ano)	Dicloro-propeno (kg/ano)	Fuligem (kg/ano)	Terreno (m <sup>2</sup> a)	Eletricidade (kWh)
Adsorvedora			23760	814572			1500	287037
Aquecimento	17561966	2136130					1000	146782
Reação			420718320			14890	1500	190626
Pré-fracionamento				27396468			1500	1022
Destiladora 1			7999200	7785360	389585		1500	1022
Destiladora 2			70839648	2455200	1907294		1500	1022

FONTE: O autor (2017).

Foram utilizados três modelos de avaliação de impactos, seguindo a classificação proposta por Carvalho et. al (2014): Ecological Scarcity 2006, EPS 200 e Berget et. al. 2014. Os resultados são ilustrados no Anexo 1.

A análise de impactos ecológicos e fatores humanos (modelo Ecological Scarcity 2006) mostrou que a etapa de pré-fracionamento é responsável por 4,7% do total de pontos de impacto ambiental (unidade de mensuração do modelo).

O EPS 2000, modelo que mensura o consumo de recursos naturais e energéticos também aponta a fase de pré-fracionamento como crítica, representando 6,4% do total de pontos de impacto ambiental.

Pelo modelo de Berget et. al. 2014, a avaliação do consumo e contaminação de água mostra que a etapa de reação é a causa de 84,4% do consumo de água da plantas.

### 4.3 ADAPTAÇÃO DO PROJETO

Dado os resultados da ACV, são propostas duas soluções para amenizar impactos:

1. Utilizar a água do ciclo de refrigeração do Dowtherm A (refrigerante do reator) para gerar vapor no TC-02. Isso diminui em muito o consumo de água do TC-03.
2. Utilizar parte do vapor gerado no TC-02 para reduzir o consumo de vapor no evaporador do pré-fracionador.

As modificações nas correntes e equipamentos são listadas no Anexo 2. Uma nova análise financeira mostra um custo total do investimento de R\$ 40.388.628,92, abaixando o preço mínimo de venda do quilo de cloreto de alila para R\$ 1,36.

Os benefícios ambientais da nova simulação de ACV são apresentados na Tabela 14.

TABELA 14 – REDUÇÕES DE IMPACTOS MEDIDAS PELAS SIMULAÇÕES DO PROCESSO ADAPTADO

Modelo	Unidade:	Referência	Adaptado	Redução
EPS	Pt	4,62E+07	4,43E+07	4,11%
Scarcity	Pt	5,06E+10	4,90E+10	3,16%
Berger et. al.	m <sup>3</sup>	3,99E+07	2,53E+07	36,59%

FONTE: O autor (2017).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa de mercado realizada identificou uma oportunidade de lucro na produção e comercialização do cloreto de alila no Brasil. O projeto de uma indústria de cloreto de alila é apresentado, sendo que essa unidade se mostrou rentável, uma vez que o preço mínimo de venda do produto é menor que o preço de importação da epicloridrina no Brasil.

A partir da ACV, uma proposta de integração energética mostra benefícios econômicos e ambientais. A aplicação da ACV durante o projeto da indústria não somente possibilita a redução de potenciais impactos ambientais, como mostrou possibilidades de ganho econômico, contrariando expectativas. A ACV se prova então uma ferramenta importante no projeto preliminar de indústrias, uma vez que é muito mais difícil adaptar uma unidade já operante. A simulação de processos também comprova o seu valor como ferramenta para decisões econômicas e de cunho ambiental.

A redução de custos e os benefícios humanos e ambientais advindas da adaptação do processo valorizam a aplicação da integração energética em trocadores de calor industriaisto.

## REFERÊNCIAS

- ALICEWEB – **Sistema de Análise das Informações de Comércio Exterior**. Disponível em: <<http://alicesweb.mdic.gov.br/>>. Acessado em: 02/09/17.
- ALTAMIRANO, C. A. A. **Análise de Ciclo de Vida do Biodiesel de Soja: uma Comparação entre as Rotas Metálica e Etilica**. Tese - Escola de Química – TPQBq UFRJ, 2013.
- ASINGER, F. **Mono-olefins: Chemistry and Technology**. 1 Edição. Pergamon Press. 1968.
- ASSIS, B. B. de. **Avaliação Do Ciclo De Vida Do Produto Como Ferramenta Para O Desenvolvimento Sustentável**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2009.
- BRAGANÇA, L.; VIEIRA, S. M.; ANDRADE, J. B. **Early Stage Design Decisions: The Way to Achieve Sustainable Buildings at Lower Costs**. The Scientific World Journal Volume, 2014.
- CALDAS, J.N. **Torres de Recheios** JR Editora Técnica Ltda.1988.
- CARBERRY, J. J. **Chemical and Catalytic Reaction Engineering**. 1st edition. Dover Science. 2001.
- CARVALHO, A.; MIMOSO, A. F.; MENDES, A. N; MATOS, H. A **From a literature review to a framework for environmental process impact assessment index**. Journal of Cleaner Production 64 (2014) 36-62
- CAVALETT, O. **Análise do Ciclo de Vida da Soja** (doutorado). Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, 2008. 245p.
- COFICPOLO - **Comitê de Fomento Industrial de Camaçari** Disponível em: <http://www.coficpolo.com.br/2012/mapa.php> Acessado em 25/08/2017
- DOW BRASIL - **The Dow Chemical Company** – Disponível em: <<http://www.dow.com/brasil>>. Acessado em 02/09/17
- E. GRIFFING AND M. OVERCASH - **Chemical Life Cycle Database**. Disponível em: <[www.environmentalclarity.com](http://www.environmentalclarity.com)>, 1999- present. Acessadoem: 17/07/2017
- FAIRBURN, A. W. et. al. **Commercial Scale Manufacture of Allyl Chloride and Allyl Alcohol From Propylene**; Chemical Engineering Progress, Vol. 43, N°. 6; June 1947, pp. 280-290.
- FERREIRA, J. V. R. **Avaliação de Ciclo de vida do Produto**. Instituto Politécnico de Viseu. São Paulo, SP: [s.n.], 2004.
- INERIS – **Institut National de l’Environnement et des Risques. Données technico-économiques sur les substances chimiques en France: 3-chloroprene**. 2006.

IPCS INCHEM – **International Programme on Chemical Safety: Chemical Safety Information from Intergovernmental Organizations**. SIDS Initial Assessment Report for the 4th SIAM. 1996.

ITANI, A.; VILELA JR., A. **Meio Ambiente e Saúde: Desafios para a Gestão**. Interfacehs, São Paulo, v.1, n.3, p.1, abr. 2007.

KAKAÇ, S.; LIU, H. **Heat Exchangers – Selection, Rating and Thermal Design**. 2nd edition. New Yor: CRC Press, 2002. 255

KERN, D. Q. **Process Heat transfer**, International Student Edition, McGraw-Hill, Inc 1983.

KISTER, H.Z. **Distillation Design** McGraw-Hill, Inc 1992.

MARKETSANDMARKETS – **Mercado da epicloridrina** Disponível em: <<http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/epichlorohydrin-market-936.html>>. Acessado em: 02/09/17.

NBr ISO 14040, **Sistemas de Gestão Ambiental/AVC**, 2001

PEREIRA, C. L. F. **Avaliação de sustentabilidade ampliada de produtos agroindustriais. Estudo de caso: suco de laranja e etanol**. Campinas, SP: [s.n.], 2008. 268 f. Tese (doutorado – Universidade Estadual de Campinas, faculdade de Engenharia de Alimentos).

RIBEIRO, C.; GIANNETI, B.; ALMEIDA, C. M. V. B. **Avaliação do ciclo de vida (ACV): uma ferramenta importante da ecologia industrial**. Revista de Graduação da Engenharia Química, 11, p. 13-23, 2003.

RIBEIRO, F. de M. **Inventário de ciclo de vida da geração hidrelétrica no Brasil – Usina de Itaipu: primeira aproximação**. São Paulo, SP: [s.n.], 2003. 456f. Dissertação (Mestrado do programa Interunidades de pós-graduação em energia da Universidade de São Paulo) PIPGE/USP.

SANTOS, D. T. **Análise Do Ciclo De Vida Dos Produtos Açúcar e Álcool Em Usinas Sucroalcooleira No Estado De Mato Grosso Do Sul**. Dissertação do Programa de Pós – Graduação em Tecnologias Ambientais da UFMGS, 2009.

SANTOS, P. H. A; MOURA, L. A. M; SCOTTINI, L; FERREIRA, R. K. **EPIC S/A - Unidade De Produção De Cloreto De Alila**. Trabalho apresentado à disciplina TQ156 - Projetos da Indústria Química II. 2015. 252 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

SEIDER, W.D., SEADER, J.D., LEWIN, D.R. e WIDAGDO, S. **Product and Process Design Principles**, John Wiley and Sons, 2a Ed., 1999.

SILVA, I. S.; ALENCAR, J. R. B.; DANIELSKI, L. **Use Of Software For Simulation Process: An Application For Sour Water Stripping Units Of Oil Refinery**. GEINTEC 2013. Vol. 3/n. 5/

TURTON, R. et. Al. **Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes**. 3ªEdição. Prantice Hall. 1998.

ULLMANN, F. **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**. John Wiley and Sons. 2007.

WALAS, S. M. **Chemical Reaction Engineering** 3.ed. Butterworths Reprint Series, 1989

YAMAMOTO, C., KAMINSKI, M. **Apostila de Análise Econômica**. Curitiba. Universidade Federal do Paraná. 2012.

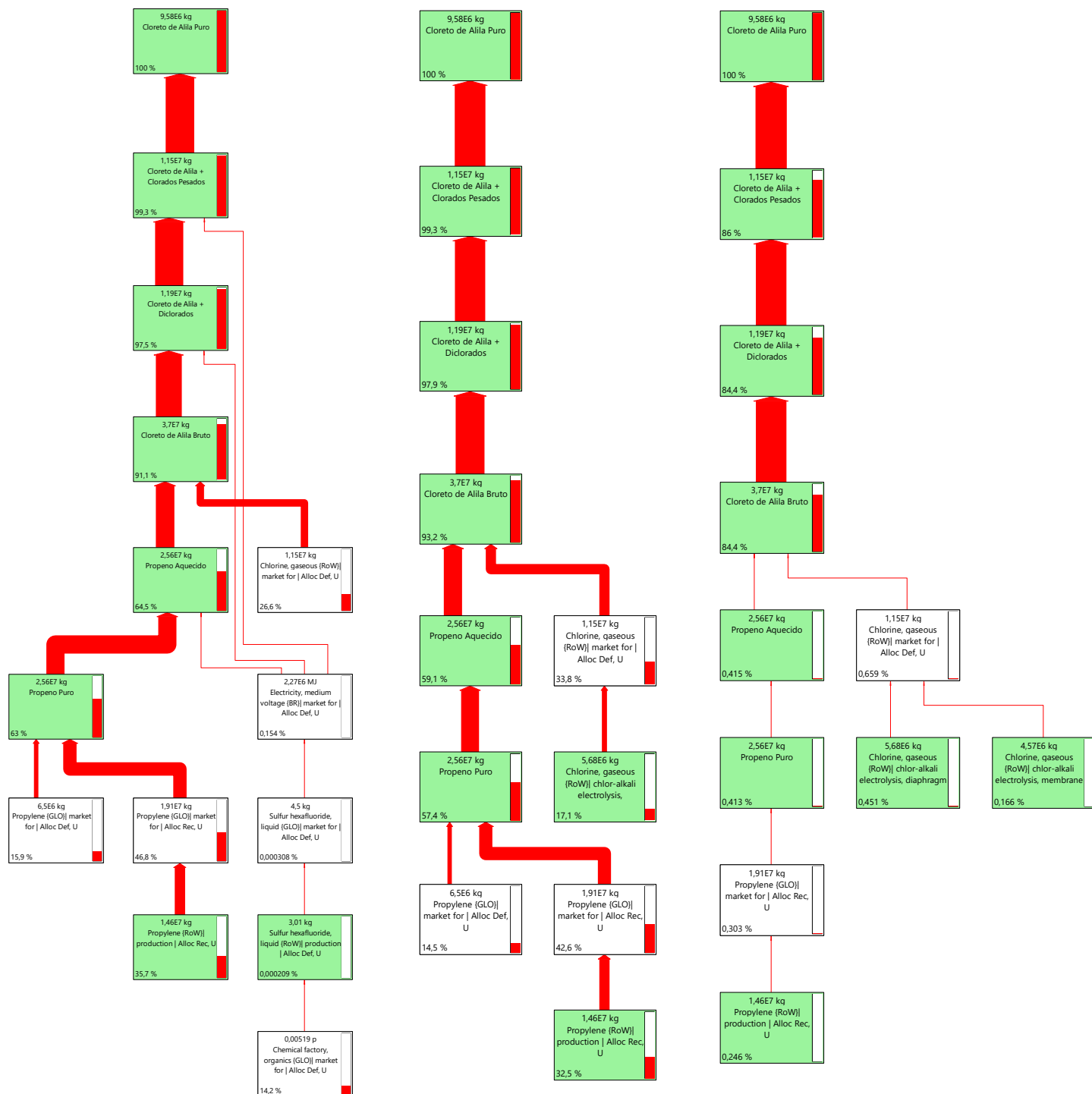
YUDINSON, R. N.; YUZEFOVICH, V. I.; BUKHARKINA, N. S. **Drying Liquid Propylene with Zeolites**. Maseln° 10 p. 20-22, November 1965.

### ANEXO 1 – RESULTADOS DA ACV

EPS 2000

ECOLOGICAL SCARCITY 2006

BERGET et. al. 2014



## ANEXO 2 – BALANÇO DE MASSA DAS UTILIDADES

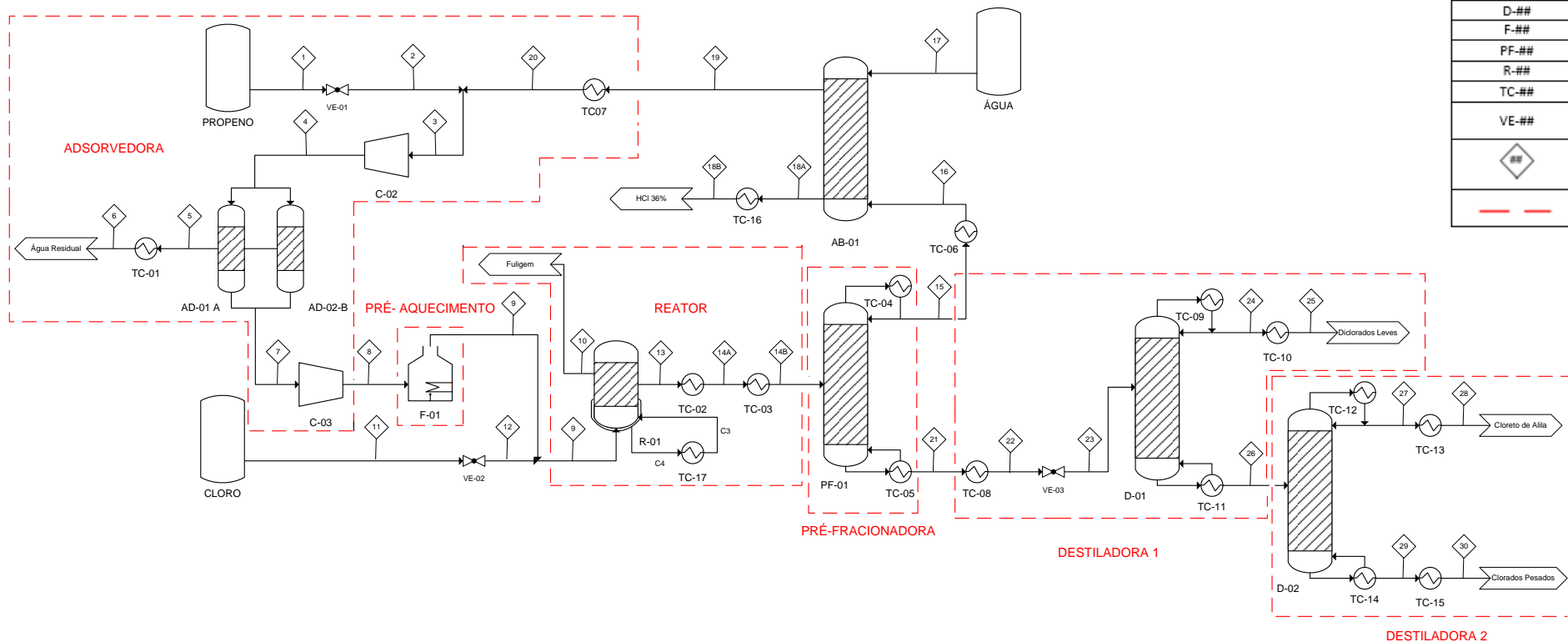
Legenda	
C##	Corrente de Refrigeração
S##	Corrente de Vapor
AR##	Corrente de Água de Refervedor
G##	Corrente de Gás Natural

Corrente	Propileno (kg/h)	Gás Natural (kg/h)	Ar (kg/h)	Dowtherm A (kg/h)	Água (kg/h)	Vapor (kg/h)	T (°C)	P (atm)	Equipamento	Serviço	Área de Troca (m <sup>2</sup> )
C1					3		27	1			
C2					3		50	1	TC-01	Resfriamento da Água Residual	2
C3				16855,63462			350	11,19			
C4				16855,63462			400	11	SR-01	Resfriamento do Reator	22,4
C5					24883		7,22	1			
C6					24883		32,22	1	TC-03	Resfriamento da Saída do Reator	54
C7	39701						-45	2,9			
C8	39701						-34	2,9	TC-04	Condensador do Pré-Fracionador	67,1
C9	2650						-45	1			
C10	2650						-45	1	SAB-01	Resfriamento da Absorvedora	4,9
C11					1502		27	1			
C12					1502		50	1	TC-16	Resfriamento do HCl	43,2
C13	3850						-45	1			
C14	3850						-45	1	TC-08	Resfriamento da Saída do Pré-Fracionador	0,4
C15	3875						-45	1			
C16	3875						-45	1	TC-09	Condensador da Destiladora 01	6,5
C17					1010		7,22	1			
C18					1010		32,22	1	TC-10	Resfriamento do Topo da Destiladora 01	0,02
C19					4549		27	1			
C20					4549		50	1	TC-12	Condensador da Destiladora 02	18,1
C21					4100		7,22	1			
C22					4100		32,22	1	TC-13	Resfriamento do Topo da Destiladora 02	4,1
C23					295,4		7,22	1			
C24					295,4		32,22	1	TC-15	Resfriamento do Fundo da Destiladora 02	0,2
C25					25270		27	1			
C26					25270		50	1	TC-17	Refrigeração do Dowtherm A	2,31
AR1					2968		90	5,92			
AR2						2968	158,46	5,86	TC-02	Resfriamento da Saída do Reator	54,7
G1		113,4	2692,8				25	1			
G2		113,4	2692,8				800	1	F-01	Pré-aquecimento do Propeno	33,4
S1						96,88	207,00	17,93			
S2						96,88	207,00	17,93	TC07	Aquecimento do Reciclo de Propeno	0,36
S3							5,97	207	17,93		
S4						5,97	207	17,93	SAD-01	Aquecimento da Adsorvedora	0,03
S5							3300	207	17,93		
S6						3300	207	17,93	TC-05	Refervedor do Pré-Fracionador	12,7
S7							159,15	207	17,93		
S8						159,15	207	17,93	TC-06	Aquecimento do Topo do Pré-Fracionador	0,5
S9							983	207	17,93		
S10						983	207	17,93	TC-11	Refervedor da Destiladora 01	4,2
S11							310	207	17,93		
S12					310		207	17,93	TC-14	Refervedor da Destiladora 02	1,8

Modificações							
Corrente	Água (kg/h)	Vapor (kg/h)	T (°C)	P (atm)	Equipamento	Serviço	Área de Troca (m <sup>2</sup> )
C5	4518		7,22	1			
C6	4518		32,22	1	TC-03	Resfriamento da Saída do Reator	7,72
C27	1590		100	1			
C28		1590	100	1	TC-18	Refervedor Auxiliar do Pré-Fracionador	21,47
S5		860	207	17,93			
S6	860		207	17,93	TC-05	Refervedor do Pré-Fracionador	8,79
S13	1590		50	1			
S14		1590	100	1	TC-02	Resfriamento da Saída do Reator	24,8



## ANEXO 3 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO



Legenda	
AB-##	Absorvedora
AD-##	Adsorvedora
C-##	Compressor
D-##	Destiladora
F-##	Forno
PF-##	Pré-Fracionador
R-##	Reator
TC-##	Trocador de Calor
VE-##	Válvula de Expansão
##	Identificação da Linha
- - - - -	
Unidades Funcionais	

Descrição da Linha	Corrente	Temperatura (°C)	Pressão (atm)	Vazão Mássica (kg/h)	Propileno	Cloro	HCl	Cloreto Isopropílico	2-Cloropropeno	Cloreto de Alila	1,2 Dicloropropano	1,3 Dicloropropeno	2,3 Dicloropropeno	Chave-Pesados	Água	Fuligem
Reposição de Propeno	1	25,00	11,60	821,14	821,14											
Propeno Despressurizado	2	62,21	2,00	821,14	821,14											
Junção das Correntes de Propeno	3	62,25	2,00	3239,98	3236,74										3,24	
Propeno Pressurizado	4	74,57	2,50	3239,98	3236,74										3,24	
Propeno Desidratado	7	76,65	2,30	3236,74	3236,74											
Remoção da Água Residual	5	76,65	2,30	3,24											3,24	
Água Residual Resfriada	6	50,00	2,30	3,24											3,24	
Propeno Reagente Pressurizado	8	76,92	3,00	3236,74	3236,74											
Propeno Reagente Aquecido	9	425,00	3,00	3236,74	3236,74											
Remoção de Fuligem	10	510,00	3,00	1,88												1,88
Alimentação de Cloro	11	25,00	7,80	1437,47		1437,47										
Cloro Despressurizado	12	149,51	3,00	1437,47		1437,47										
Cloreto de Alila Bruto	13	510,00	3,00	4671,94	2439,52		732,20	2,97	33,35	1233,70	55,66	136,65	16,82	21,07		
Cloreto de Alila Resfriado	14A	200,00	3,00	4671,94	2439,52		732,20	2,97	33,35	1233,70	55,66	136,65	16,82	21,07		
Cloreto de Alila Resfriado	14B	25,00	3,00	4671,94	2439,52		732,20	2,97	33,35	1233,70	55,66	136,65	16,82	21,07		
Topo do Pré-Fracionador	15	-27,40	2,94	3171,72	2439,51		732,20									
Topo do Pré-Fracionador Aquecido	16	25,00	2,94	3171,72	2439,51		732,20									
Alimentação de Água da Absorvedora	17	25,00	2,00	1305,08												
Cloreto de Hidrogênio	18A	59,85	2,15	2057,95	23,91	732,20										1305,08
Cloreto de Hidrogênio Resfriado	18B	30,00	2,15	2057,95	23,91	732,20										1301,84
Saída de Topo da Absorvedora	19	13,35	2,00	2442,75	2439,51											3,24
Reciclo de Propeno	20	62,26	2,00	2418,84	2415,60											3,24
Fundo do Pré-Fracionador	21	64,19	2,74	1500,22				2,97	33,35	1233,70	55,66	136,65	16,82	21,07		
Fundo do Pré-Fracionador Resfriado	22	22,00	2,74	1500,22				2,97	33,35	1233,70	55,66	136,65	16,82	21,07		
Alimentação da Destiladora-01	23	22,00	2,00	1500,22				2,97	33,35	1233,70	55,66	136,65	16,82	21,07		
Topo da Destiladora-01	24	36,92	1,38	49,19				2,80	33,35	13,05						
Clorados Leves	25	30,00	1,38	49,19				2,80	33,35	13,05						
Fundo da Destiladora-01	26	58,50	1,38	1451,03				0,17		1220,65	55,66	136,65	16,82	21,07		
Topo da Destiladora-02	27	55,21	1,38	1210,21				0,17		1209,11	0,42	0,31	0,20			
Cloreto de Alila	28	30,00	1,38	1210,21				0,17		1209,11	0,42	0,31	0,20			
Fundo da Destiladora-02	29	106,50	1,38	240,82						11,54	55,24	136,34	16,62	21,07		
Diclorados	30	30,00	1,38	240,82						11,54	55,24	136,34	16,62	21,07		