

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE – UNESC**  
**CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**ERIKA UGIONI BORGES**

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DA RESINA POLIÉSTER  
INSATURADA EM REATOR DESCONTÍNUO PERFEITAMENTE AGITADO**

**CRICIÚMA**

**2016**

**ERIKA UGIONI BORGES**

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DA RESINA POLIÉSTER  
INSATURADA EM REATOR DESCONTÍNUO PERFEITAMENTE AGITADO**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado para  
obtenção do grau de Engenheiro Químico no curso de  
Engenharia Química da Universidade do Extremo Sul  
Catarinense, UNESC.

Orientador: Prof. Espec. Luiz Rodeval Alexandre

**CRICIÚMA**

**2016**

**ERIKA UGIONI BORGES**

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DA RESINA POLIÉSTER  
INSATURADA EM REATOR DESCONTÍNUO PERFEITAMENTE AGITADO**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado pela Banca Examinadora para obtenção do Grau de Engenheiro Químico no Curso de Engenharia Química da Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC, com Linha de Pesquisa em estudo de otimização do processo de produção da resina poliéster insaturada.

Criciúma, 01 de dezembro de 2016.

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Luiz Rodeval Alexandre - Especialista – (UNESC) - Orientador

Prof. Michael Peterson - Doutor - (UNESC)

Filipe Freitas Zuchinali - Químico

**Dedico este trabalho aos meus pais que não mediram esforços ao longo da minha vida acadêmica.**

**Pelo carinho e apoio, obrigada!**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por sempre me guiar e iluminar meus caminhos.

Aos meus pais, Valmor e Terezinha, e irmão, Ramon, que de forma especial e carinhosa sempre estiveram ao meu lado, proporcionando cada conquista. Muita gratidão por todo o amor e por todos os seus ensinamentos.

A todos os professores pelos conhecimentos compartilhados, em especial ao meu orientador, Luiz Rodeval Alexandre, pelo acompanhamento e dedicação.

Ao meu supervisor, Filipe Freitas Zuchinali, pelas contribuições e pelo auxílio na empresa.

À empresa Anjo Química que me disponibilizou recursos para o alcance dos meus objetivos.

**“Quem sabe concentrar-se numa coisa e insistir nela como único objetivo, obtém, ao fim e ao cabo, a capacidade de fazer qualquer coisa.”**

**Mahatma Gandhi**

## RESUMO

Nos processos de obtenção de resinas industriais a produtividade é um fator decisivo para a produção das tintas, com margens sustentáveis para um mercado extremamente competitivo. De um modo geral, as resinas participam com 30% das formulações das tintas. Esta situação demanda processos produtivos em constante evolução, os quais necessitam de melhorias contínuas. Neste contexto, a produção de resina poliéster insaturada, importante matéria prima para a fabricação de massas plásticas da linha automotiva, apresenta um ciclo de produção de aproximadamente 18 horas, atingindo a temperatura de 230°C. A obtenção ocorre em reator batelada com posterior ajuste da sua condição física e química através de uma mistura com monômero de estireno. O presente trabalho se propôs a identificar melhorias no processo de produção da resina poliéster insaturada de uma empresa do setor de tintas, que se implantadas poderão reduzir o tempo de diluição em 30% quando comparado com o processo atual, bem como tornar o resfriamento mais eficiente, reduzindo a temperatura em aproximadamente 2,5°C.

**Palavras chaves:** Reator, estireno, resina poliéster insaturada, resfriamento, otimização.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma de produção de tinta base solvente .....	15
Figura 2 - Fluxograma de produção de tinta base água.....	16
Figura 3 - Reação de iniciação através do calor .....	19
Figura 4 - Reação de iniciação através de radiação .....	19
Figura 5 - Esquema de polimerização por condensação .....	21
Figura 6 - Molécula de estireno .....	23
Figura 7 - Reação de esterificação.....	24
Figura 8 - Estrutura do PET.....	26
Figura 9 - Esquema de produção industrial de resina poliéster insaturada .....	27
Figura 10 - Reação de polimerização.....	27
Figura 11 - Reator contínuo.....	29
Figura 12 - Reator semibatelada .....	30
Figura 13- Reator batelada.....	30
Figura 14 - Reator batelada encamisado .....	31
Figura 15 - Reator batelada com camisa externa.....	32
Figura 16 - Reator batelada encamisado com fluxo constante.....	32
Figura 17 - Perfis de temperatura em trocadores de calor: (a) fluxo contracorrente e (b) fluxo paralelo.....	34
Figura 18 - Trocador casco e tubo .....	35
Figura 19 - Trocador de serpentina .....	36
Figura 20 - Trocador de calor de placas.....	36
Figura 21 - Tipos de condensador: a) resfriado a ar; b) resfriado a água tipo carcaça- tubos; c) resfriado a água tipo placas; d) evaporativo .....	40
Figura 22 - Circuito de água em uma torre de resfriamento .....	42
Figura 23 - Placa de orifício.....	43
Figura 24 - Tubo de Venturi universal .....	44
Figura 25 - Rotâmetro de área variável.....	44
Figura 26 - Sensores tipo termopar.....	45
Figura 27 - Ciclo PDCA .....	47
Figura 28 - Produção de resina poliéster insaturada em laboratório .....	51
Figura 29 - Teste para determinação do índice de acidez .....	52

Figura 30 - Acompanhamento do processo atual em escala industrial .....	53
Figura 31 - Diagrama de causa e efeito .....	54
Figura 32 - Tanque diluidor .....	55
Figura 33 - Fluxograma do processo - Redução do volume de água.....	56
Figura 34 - Simulação da mistura resina-solvente .....	57
Figura 35 - Fluxograma do processo - Aproveitamento da torre .....	58
Figura 36 - Controle de acompanhamento .....	60
Figura 37 – Processo de diluição da resina em estireno – Processo atual .....	63
Figura 38 - Fluxograma do processo.....	64
Figura 39 - Fluxograma do processo atual.....	65
Figura 40 - Diagrama esquemático do processo de resfriamento da resina .....	67
Figura 41 - Tanque de armazenamento de água gelada .....	68
Figura 42 - Processo de diluição da resina em estireno – Teste industrial .....	69
Figura 43 - Teste de agitação para 80 rpm .....	71
Figura 44 - Aproveitamento da torre de resfriamento.....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Polímeros e os reagentes .....	20
Tabela 2 - Características dos processos de polimerização .....	21
Tabela 3 - Procedimentos de regulagem de uma válvula de expansão .....	41
Tabela 4 - Método de análise e solução de problemas .....	47
Tabela 5 - Informações do fabricante .....	50
Tabela 6 - Controle de acompanhamento do processo produtivo .....	50
Tabela 7 - Dados do processo atual.....	53
Tabela 8 - Levantamento das potenciais causas .....	54
Tabela 9 - Dados do processo com redução no volume de água .....	56
Tabela 10 - Avaliação econômica do processo atual .....	59
Tabela 11 - Avaliação econômica das medidas propostas .....	59
Tabela 12 - Etapas de formulação .....	61
Tabela 13 - Tempo padrão de diluição do processo atual.....	62
Tabela 14 - Temperaturas das correntes do chiller – Processo atual .....	63
Tabela 15 - Variações de temperatura – Processo atual .....	64
Tabela 16 - Dados das correntes do processo atual .....	65
Tabela 17 - Análise das hipóteses .....	66
Tabela 18 - Demanda de energia de resfriamento do processo de fabricação da resina .....	66
Tabela 19 - Dados do processo com redução no volume de água .....	68
Tabela 20 - Temperaturas das correntes do chiller – Redução do volume de água ..	70
Tabela 21 - Avaliação da mistura .....	70
Tabela 22- Dimensionamento preliminar serpentina interna .....	72
Tabela 23 - Redução do volume do tanque de armazenamento de água gelada .....	73
Tabela 24 - Estimativa dos ganhos de produção .....	73
Tabela 25 - Ganhos de energia elétrica .....	74
Tabela 26 - Aumento do nível de agitação no tanque diluidor.....	74

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>14</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>15</b>
3.1 FABRICAÇÃO DE TINTAS .....	15
<b>3.1.1 Matérias primas e suas funções</b> .....	<b>16</b>
3.2 POLÍMEROS .....	18
<b>3.2.1. Técnicas de polimerização</b> .....	<b>22</b>
3.3 RESINAS POLIÉSTERES INSATURADAS .....	23
<b>3.3.1 Matérias primas e suas funções</b> .....	<b>25</b>
<b>3.3.2 Processo de produção</b> .....	<b>26</b>
3.3.2.1 Reator químico .....	28
3.3.2.1.1 <i>Reator descontínuo perfeitamente agitado</i> .....	30
3.3.2.2 Tanque diluidor.....	33
3.3.2.2.1 <i>Agitação</i> .....	33
3.3.2.3 Trocadores de calor.....	34
3.3.2.3.1 <i>Tipos de trocadores</i> .....	35
3.3.2.4 Resfriadores de líquidos.....	36
3.3.2.4.1 <i>Evaporador</i> .....	39
3.3.2.4.2 <i>Condensador</i> .....	39
3.3.2.4.3 <i>Compressor</i> .....	40
3.3.2.4.4 <i>Válvula de expansão</i> .....	41
3.3.2.4 Torre de resfriamento .....	41
3.3.2.6 Parâmetros de controle de processo.....	42
3.3.2.6.1 <i>Vazão</i> .....	42
3.3.2.6.2 <i>Temperatura</i> .....	45
3.3.2.6.3 <i>Velocidade de agitação</i> .....	46
3.4 MÉTODO DE ANÁLISE E SOLUÇÃO DE PROBLEMAS.....	46

3.5 ANÁLISE ECONÔMICA DE PROJETOS.....	48
3.5.1 Valor presente líquido.....	49
3.5.2 Taxa interna de retorno.....	49
3.5.3 Tempo de retorno simples de investimento – Payback.....	49
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>50</b>
4.1 ANÁLISE DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA RESINA .....	50
4.1.1 Acompanhamento da produção da resina em escala de bancada .....	51
4.1.2 Acompanhamento da produção da resina em escala industrial.....	52
4.2 IDENTIFICAÇÃO DAS OPORTUNIDADES DE MELHORIAS .....	53
4.2.1 Roteiro de identificação.....	53
4.2.2 Critérios de seleção das oportunidades de melhorias potenciais.....	54
4.3 ANÁLISE DA VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DAS MELHORIAS .....	55
4.3.1 Ações de verificação e validação das hipóteses.....	55
4.3.1.1 Análise da viabilidade técnica .....	55
4.3.1.1.1 Volume do tanque reservatório influencia no desempenho do chiller .....	55
4.3.1.1.2 Agitação insuficiente no tanque diluidor .....	57
4.3.1.1.3 Uso da torre de resfriamento pode contribuir no desempenho do chiller ...	58
4.3.1.1.4 Aumento da área de troca térmica do tanque diluidor.....	58
4.3.2 Análise da viabilidade econômica .....	59
<b>5 RESULTADOS.....</b>	<b>60</b>
5.1 ANÁLISE DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA RESINA .....	60
5.1.1 Acompanhamento da produção da resina em escala de bancada .....	60
5.1.2 Acompanhamento da produção da resina em escala industrial.....	61
5.1.2.1 Tempo de processamento.....	62
5.1.2.2 Temperaturas de processo.....	63
5.2 IDENTIFICAÇÃO DAS OPORTUNIDADES DE MELHORIAS .....	65
5.2.1 Fluxograma do processo.....	65
5.2.2 Identificação das oportunidades de melhorias .....	66
5.3 ANÁLISE DA VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DAS MELHORIAS .....	67
5.3.1 Ações de verificação e validação das hipóteses.....	67
5.3.1.1 Análise da viabilidade técnica .....	67
5.3.1.1.1 Volume do tanque reservatório influencia no desempenho do chiller .....	67

5.3.1.1.2 <i>Agitação insuficiente no tanque diluidor</i> .....	70
5.3.1.1.3 <i>Uso da torre de resfriamento pode contribuir no desempenho do chiller</i> ...	71
5.3.1.1.4 <i>Aumento da área de troca térmica do tanque diluidor</i> .....	72
5.3.1.2 <i>Análise da viabilidade econômica</i> .....	73
5.3.1.2.1 <i>Redução do volume do tanque de armazenamento de água gelada</i> .....	73
5.3.1.2.2 <i>Aumento da velocidade de agitação do tanque diluidor</i> .....	74
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	<b>75</b>
<b>7 RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>76</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>77</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um grande produtor mundial de tintas, com um mercado formado por grandes empresas e fabricantes de médio e pequeno porte, voltados para o consumo em geral e para segmentos com necessidades específicas. De um modo geral a tinta pode ser considerada uma mistura estável de uma parte sólida, um componente volátil e uma resina. A resina é responsável por formar a ligação entre todos os componentes, fornecendo as características finais da tinta, como brilho, aderência e secagem.

Deste modo, a Anjo Tintas utiliza em sua linha produtos para repintura automotiva a resina poliéster insaturada, a qual é responsável pelas principais características da linha, brilho e dureza. O processo produtivo desta resina é baseado em ácido insaturado e utiliza o estireno como diluente, responsável por copolimerizar o poliéster e formar uma rede polimérica.

Um dos principais parâmetros que deve ser controlado nessa reação é a temperatura do tanque diluidor. Como precaução para não perder o lote produtivo, a mesma não deve ultrapassar a temperatura de polimerização do estireno, mantendo-se em aproximadamente 60°C. Esta restrição no controle da temperatura da operação de diluição da resina poliéster insaturada no estireno resulta num tempo de execução que influencia numa maior ou menor produtividade da resina.

Uma análise do processo produtivo pode identificar melhorias potenciais que resultam na redução deste tempo. Neste sentido, o presente trabalho se propõe a otimizar o referido processo através da identificação e análise da viabilidade de medidas de melhorias no processo de diluição da resina poliéster insaturada no estireno.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Propor melhorias no processo de produção da resina poliéster insaturada em reator descontínuo perfeitamente agitado.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar o processo de fabricação da resina poliéster insaturada;
- Identificar as oportunidades de melhorias no processo de produção da resina poliéster insaturada;
- Analisar a viabilidade de implantação das melhorias;

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 FABRICAÇÃO DE TINTAS

Na indústria de tintas a produção é feita em lotes, facilitando o ajuste feito pelo controle de qualidade, que inclui o acerto da cor e das propriedades da tinta. (YAMANAKA *et al*, 2006).

Nas etapas de fabricação de tintas base solvente predominam a mistura, dispersão, completagem, filtração e envase, como apresentado na figura 1. A determinação das quantidades das matérias primas deve ser feita através de pesagem e medição volumétrica. (YAMANAKA *et al*, 2006).

**Figura 1** - Fluxograma de produção de tinta base solvente



Fonte: YAMANAKA *et al*, 2006.

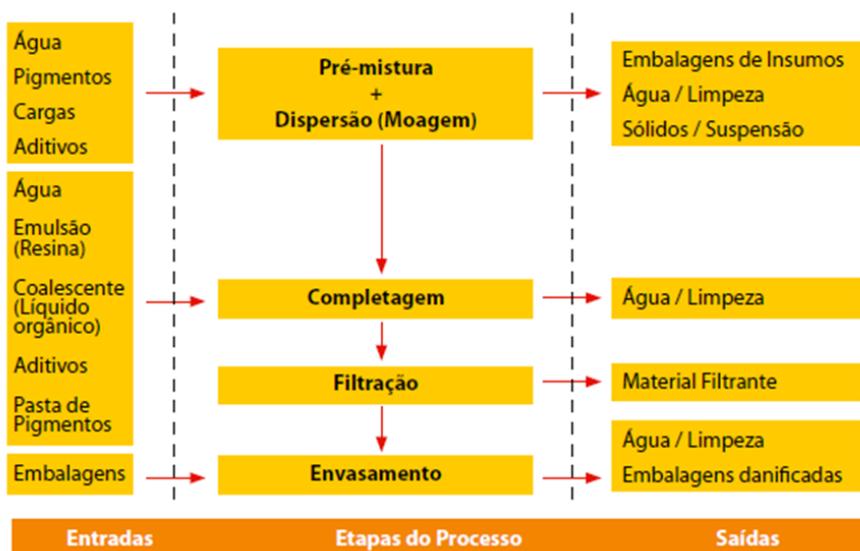
Segundo Yamanaka *et al* (2006) na etapa de pré-mistura adicionam-se os insumos em um tanque e faz-se a agitação durante um período de tempo até que se atinja a homogeneização das matérias primas. Em seguida, na etapa de dispersão (moagem), utilizam-se moinhos verticais ou horizontais, que utilizam normalmente areia ou zirconita, para desaglomerar as partículas de pigmento e garantir cobertura, cor e estabilidade ao produto. (YAMANAKA *et al*, 2006).

Na completagem são misturados os componentes faltantes, de acordo com a ordem de produção. Nessa fase são feitos os ajustes finais, como

viscosidade, acerto da cor e correção do teor de sólidos. Após a etapa de completagem a tinta é filtrada e envasada. (YAMANAKA *et al*, 2006).

O processo de produção de tintas a base de água é mais simples do que o usado na produção de tintas base solvente. O fluxograma está apresentado na figura 2.

**Figura 2** - Fluxograma de produção de tinta base água



Fonte: YAMANAKA *et al*, 2006.

### 3.1.1 Matérias primas e suas funções

A tinta é uma mistura estável de pigmentos adicionados em um componente volátil, podendo ser água ou solventes orgânicos, uma parte sólida que é responsável pela aderência da tinta no substrato e os aditivos. (YAMANAKA *et al*, 2006).

Os pigmentos são materiais sólidos insolúveis no meio e utilizados para fornecer cor, opacidade e resistência à película da tinta. São divididos em pigmentos coloridos responsáveis por conferir cor, não coloridos e anticorrosivos, os quais protegem os metais. (FAZENDA, 2005).

Os solventes são utilizados para modificar a viscosidade ou consistência da tinta, objetivando obter uma aplicação uniforme. As principais propriedades do solvente são o peso específico, a inflamabilidade, capacidade de solvência, taxa de evaporação e os aspectos toxicológicos. (WEISMANTEL, 1981).

Os aditivos são substâncias que atuam de forma complementar, melhorando o desempenho dos pigmentos, da resina e do solvente. Como exemplo têm-se os dispersantes, umectantes, antioxidantes, fungicidas e antiespumantes. (WEISMANTEL, 1981).

A parte sólida é mais comumente chamada de resina e é considerada a matéria prima mais importante da tinta por ter a finalidade de fazer a ligação entre todos os componentes do sistema. As resinas são polímeros solúveis em água ou em solventes orgânicos e o seu tipo influencia diretamente nas características finais da tinta, como brilho, resistência química, tempo de secagem e aderência ao substrato. (FAZENDA, 2005).

De acordo com Fazenda (2005) as resinas mais comumente utilizadas são:

- Alquílicas: obtidas pela esterificação de poliácidos e ácidos graxos com poliálcoois. São utilizadas em tintas com secagem por oxidação ou polimerização por calor.
- Epoxídicas: são formadas pela presença de grupos glicídila altamente reativos. São utilizadas em sistemas que requerem resistência aos ataques físicos e químicos.
- Acrílicas: formadas pela polimerização de monômeros acrílicos e metacrílicos. São resinas resistentes ao amarelecimento.
- Nitrocelulose: produzida pela reação de celulose com ácido nítrico, na presença de ácido sulfúrico. A nitrocelulose é muito utilizada na formulação de lacas, cujo sistema é por evaporação de solventes. Esse tipo de resina fornece como principal característica a secagem rápida.
- Poliéster: formada pela reação de ácidos com álcoois. Apresenta alto brilho e é utilizada em produtos que necessitam de alta resistência.

Segundo Mello e Suarez (2012) a revolução das resinas foi marcada no ano de 1907 quando se desenvolveu as primeiras resinas fenólicas. Em seguida surgiram as tintas usando como veículo sólido resinas epóxis, alquílicas, acrílicas, vinílicas, celulósicas e poliésteres.

### 3.2 POLÍMEROS

O início do estudo dos polímeros foi no século XIX com Charles Goodyear, que desenvolveu o processo de vulcanização, destinado para transformar a borracha natural em um elastômero para fabricação de pneus. Entre os anos de 1960 e 1970 ocorreu o desenvolvimento de polímeros de alto desempenho, destinados para aplicações automotivas e até aeroespaciais. Devido à modernidade das pesquisas científicas foi possível conhecer as diversas estruturas moleculares dos polímeros e desenvolver inúmeros materiais. (FRIED, 1995; CALLISTER, 2008).

Polímeros são macromoléculas formadas pela junção de pequenas moléculas, as quais são chamadas de monômeros. A reação responsável pela combinação das mesmas é chamada de polimerização. (ODIAN, 2004).

No mercado atual existe uma quantidade muito grande de polímeros, os quais são formados por diferentes reações. Cada tipo de polímero é utilizado em uma aplicação, dependendo das suas propriedades físicas, elétricas e mecânicas. (FERNANDES; LONA, 2004).

Os tipos de polímeros mais consumidos atualmente são os polietilenos, polipropilenos, poliestirenos, poliésteres e poliuretanos; que devido a sua grande produção e utilização são chamados de polímeros commodities. Outras classes de polímeros, como os poliacrilatos, policarbonatos e fluorpolímeros tem tido uso crescente. Vários outros polímeros são fabricados em menor escala por terem uma aplicação muito específica ou devido ao seu custo ainda ser alto e por isso são chamados de plásticos de engenharia. (FERNANDES; LONA, 2004, p. 1).

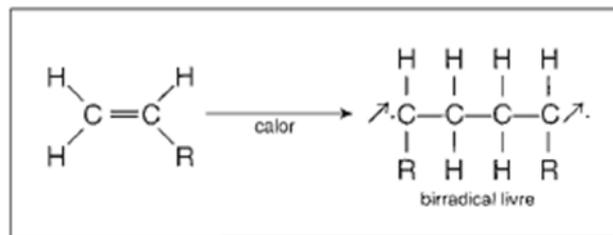
Os polímeros são classificados em dois grupos, de acordo com o seu comportamento em relação à temperatura. Os polímeros que podem ser moldados facilmente e são solidificados com o resfriamento são chamados de termoplásticos. O outro grupo são os polímeros termorrígidos, os quais possuem estrutura reticulada e são infusíveis. (ODIAN, 2004).

Os polímeros também podem ser classificados de acordo com a estrutura: de adição ou de condensação. Os polímeros de adição possuem em sua cadeia apenas átomos de carbono, ligados de forma covalente, e a reação não apresenta nenhum subproduto. Nessa técnica as moléculas insaturadas de monômeros são adicionadas a uma cadeia polimérica, uma de cada vez. (MANO; MENDES, 1999).

Segundo Mano e Mendes (1999) o mecanismo de poliadição envolve três componentes reacionais: a iniciação, a propagação e a terminação. A iniciação é a

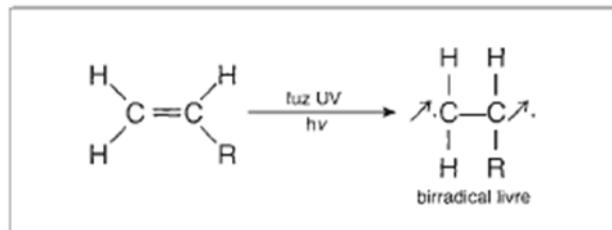
fase da formação das espécies químicas a partir do monômero, podendo ser provocada por agentes químicos (calor ou radiações), como mostram as figuras 3 e 4, ou por agentes físicos (peróxidos, hidroperóxidos ou ácidos). Independente do método escolhido, o objetivo é formação de centros ativos através da abertura da dupla ligação.

**Figura 3** - Reação de iniciação através do calor



Fonte: MANO; MENDES, 1999

**Figura 4** - Reação de iniciação através de radiação



Fonte: MANO e MENDES, 1999.

A fase de propagação ocorre logo depois da iniciação e é considerada a etapa mais importante da polimerização, pois determina o peso molecular final do polímero. Faz-se a transferência do centro ativo de monômero a monômero, provocando o crescimento da cadeia a uma velocidade alta e baixa energia de ativação. (CANEVAROLO, 2006).

Em sequência vem a terminação, a qual é a fase final de crescimento. Através de espécies químicas inertes provoca-se a interrupção do centro ativo e conseqüentemente o término do crescimento polimérico. (MANO; MENDES, 1999).

O outro grupo são as reações de condensação, bastante utilizadas nas indústrias porque além de produzirem resinas tradicionais, como melamínicas, poliésteres, fenólicas e epoxídicas que estão apresentadas na tabela 1, também

permitem a formação de polímeros sofisticados, com pesos moleculares inferiores aos produzidos por reações de poliadição.

**Tabela 1 - Polímeros e os reagentes**

<b>Polímero</b>	<b>Reação</b>
Poliésteres	Poliácidos + poliálcoois
Poliamidas	Poliácidos + poliaminas
Uréicas	Uréia + formol
Melamínicas	Melamina + formol
Policarbonatos	Bisfenol A + fosgeno
Poliuretanos	Poliisocianatos + polióis
Epóxi	Bisfenol + epicloridrina
Fenólicas	Fenóis + formol

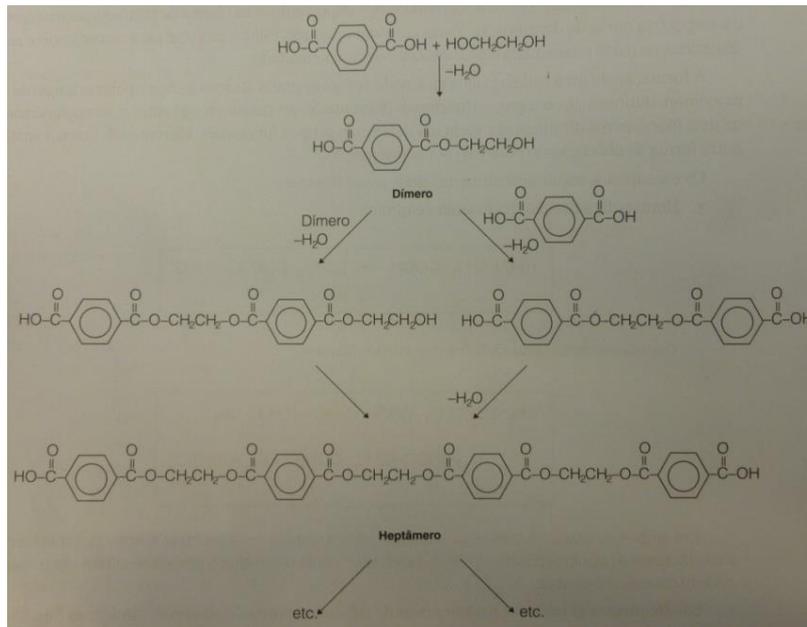
**Fonte:** FAZENDA, 2005.

Os polímeros de condensação não apresentam em sua cadeia somente átomos de carbono, mas também átomos de outros elementos, como oxigênio, nitrogênio, enxofre e fósforo, e forma-se água como subproduto. Esse tipo de reação só acontece se as moléculas que estiverem reagindo forem bifuncionais, como diol, diálcool, glicol, diácido ou diamina. Mediante a isto a molécula final será bifuncional, permitindo a continuidade da reação que irá formar o polímero. (MANO; MENDES, 1999; FERNANDES; LONA, 2004).

“É uma polimerização por etapas, pois a macromolécula vai se formando através da reação de monômeros, dímeros, trímeros, tetrâmeros e oligômeros, como se estivesse sendo constituída através da união de pedaços.” (FAZENDA, 2005, p. 32).

A polimerização por condensação segue o esquema da figura 5, onde dois monômeros reagem entre si para formar um dímero, o qual também pode reagir com outro dímero para formar um tetrâmero, que por sua vez pode reagir com qualquer uma das espécies presentes (tetrâmero, monômero, trímero ou dímero). (FAZENDA, 2005).

Em resumo, um polímero é classificado como polímero de condensação se a sua formação envolve a eliminação de pequenas moléculas, ou contém grupos funcionais como parte da cadeia do polímero, ou sua unidade de repetição carece de certos átomos que estão presentes no monômero. (ODIAN, 2004).

**Figura 5 - Esquema de polimerização por condensação**

Fonte: FAZENDA, 2005.

A tabela 2 apresenta as características principais dos processos de poliadição e policondensação.

**Tabela 2 - Características dos processos de polimerização**

Processo	Características
<b>Poliadição</b>	<p>Reação em cadeia, 3 componentes reacionais: iniciação, propagação e terminação.</p> <p>Não há subprodutos da reação</p> <p>Velocidade de reação rápida, com formação imediata de polímeros.</p> <p>Concentração de monômero diminui progressivamente.</p>
<b>Policondensação</b>	<p>Reação em etapas.</p> <p>Há subprodutos da reação.</p> <p>Velocidade de reação lenta, sem formação imediata de polímero.</p> <p>Concentração de monômero diminui rapidamente.</p>

Fonte: MANO; MENDES, 1999

### 3.2.1. Técnicas de polimerização

A preparação dos polímeros necessita que algumas condições sejam atendidas para que seja possível alcançar um resultado satisfatório. Tanto em laboratório quanto na indústria é muito importante o conhecimento das características físico-químicas do material, para então se avaliar a rota sintética e as condições de processo mais convenientes. (FERNANDES; LONA, 2004).

As técnicas de polimerização mais utilizadas em sistemas homogêneos são a polimerização em massa e a polimerização em solução. O processo de polimerização em massa, também conhecido como bulk, é um método simples onde é adicionado um iniciador ao monômero. A reação começa com o aquecimento, podendo ser verificado pelo aumento da viscosidade do meio. Nessa polimerização nenhum solvente é adicionado na fase de reação. O mesmo é adicionado somente na parte de diluição da resina. (CANEVAROLO, 2006; FERNANDES; LONA, 2004).

“As vantagens da polimerização em massa são a obtenção de polímero com alto grau de pureza, uma vez que somente monômero é alimentado no reator e a produção de polímero é a maior possível.” (FERNANDES; LONA, 2004, p.13).

Como desvantagem, segundo Fernandes e Lona (2004), por ser uma polimerização muito exotérmica, os polímeros apresentam baixos coeficientes de transferência de calor. Devido à alta viscosidade a transferência de calor por convecção é limitada, tornando a remoção do calor gerado mais difícil, resultando no aumento da temperatura no reator e em alguns casos na perda do reator e da resina produzida.

O outro tipo é a polimerização em solução, que permite melhorar a transferência de calor e o controle da temperatura, visto que um solvente é adicionado ao meio reacional. No início todos os componentes (monômero, iniciador e solvente) devem ser solúveis entre si. À medida que a reação ocorre forma-se o polímero, o qual pode ou não ser solúvel no meio. Se for solúvel tem-se uma solução homogênea. Se for insolúvel o polímero é precipitado, depois é seco e utilizado. Devido a isso, a escolha do solvente é um fator muito importante. (CANEVAROLO, 2006).

### 3.3 RESINAS POLIÉSTERES INSATURADAS

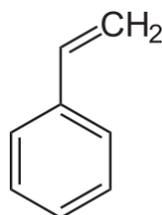
Em uma classificação de polímeros estão as resinas. Este termo inicialmente era aplicado somente às plantas, que apresentavam um líquido viscoso e amarelado, com característica de ser solúvel e de peso molecular que varia de intermediário a alto. Atualmente esse termo também é aplicado aos polímeros sintéticos, os quais amolecem ao passar por um processo de aquecimento.

As resinas insaturadas são muito utilizadas na fabricação de massas plásticas, as quais fazem parte da linha de complementos automotivos, e requerem alta resistência da película seca. São produzidas pela reação de ácidos insaturados, onde os mais comuns são o ácido fumárico e o anidrido maleico. Junto a esta mistura é adicionado ácido saturado e um glicol, e então ela é dissolvida em um monômero reativo, normalmente de estireno. (FAZENDA, 2005).

Para Fazenda (2005), além de dissolver a resina poliéster, o monômero de estireno tem a função de participar na reação de cura, fazendo as ligações das moléculas de poliéster, tornando-se uma parte ativa da resina. Vários tipos de agentes modificantes, ácidos e glicóis podem ser utilizados na formulação de uma resina.

O estireno, mostrado na figura 6, é muito utilizado na produção de resinas poliésteres insaturadas devido ao seu custo, disponibilidade e por ser um excelente diluente para controlar a viscosidade de processamento da resina. (POILLUCCI; HANSEN, 2013).

**Figura 6** - Molécula de estireno

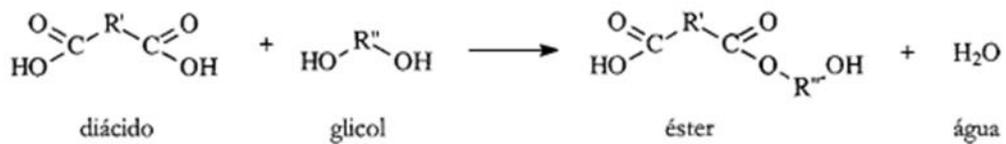


**Fonte:** POILLUCCI; HANSEN, 2013.

O processamento das resinas poliésteres insaturadas é dado por meio da polimerização em etapas, a qual consiste na condensação sucessiva de grupos funcionais reativos, aumentando o tamanho das moléculas até elas atingirem o

tamanho ideal de uma cadeia polimérica. A reação de esterificação acontece entre um diácido e um glicol e gera como produto o éster e como subproduto a água, de acordo com a figura 7.

**Figura 7 - Reação de esterificação**



Fonte: CANEVAROLO, 2006.

De acordo com a figura pode-se observar que cada grupo carboxila (COOH) reage com o grupo hidroxila (OH) do álcool, formando um éster com a eliminação de água. Cada molécula do ácido apresenta duas carboxilas e cada molécula do álcool possui duas hidroxilas, cada um desses monômeros vai reagir duas vezes. (GAUTO; ROSA, 2011).

O ácido insaturado é responsável por fornecer os pontos reativos para as ligações; o ácido saturado determina a concentração das moléculas do ácido insaturado ao longo da cadeia e o glicol faz a ponte entre os ácidos para ocorrer a formação do polímero. (GONZAGA, SEM DATA).

A temperatura da reação é um fator que deve ser controlado para se evitar reações colaterais, como a desidratação do diol para formar dietileno glicol. Essas reações colaterais podem interferir na reação de polimerização, alterando diretamente o peso molecular do polímero. (ODIAN, 2004).

Segundo Canevarolo (2006) a polimerização em etapas apresenta como principais características: condensação sucessiva de grupos funcionais, eliminando as moléculas de baixa massa molecular; os materiais reagem simultaneamente entre si; a massa molecular aumenta com o tempo de reação, visto que pequenos grupos reagem com outros e formam moléculas maiores, para então obter a cadeia polimérica; como os grupos funcionais são reativos, não é necessária a adição de iniciadores para começar a reação.

Existem três principais fatores que afetam a polimerização em etapas, a temperatura/tempo de reação e o catalisador utilizado. O aumento do tempo de reação tem como resultado polímeros com maiores massas moleculares e o

aumento da temperatura produz uma taxa de reação maior, isso ocorre devido ao fornecimento de mais energia ao sistema. Com relação ao catalisador, a presença do mesmo reduz as barreiras de energia de ativação, isso facilita a reação. Portanto obtém-se uma molécula de maior massa molar quando comparada com uma molécula não catalisada. (CANEVAROLO, 2006).

As propriedades dos polímeros variam com o peso molecular, o qual depende diretamente das condições de polimerização para cada monômero. O aumento do peso molecular provoca o aumento da viscosidade das soluções, além de influenciar na capacidade de formação de filmes e na resistência ao impacto e ao calor. O peso molecular também está diretamente ligado com propriedades como aplicabilidade, solubilidade e poder ligante. Essas propriedades são muito importantes nos polímeros utilizados em tintas. (MANO; MENDES, 1999; FAZENDA, 2005).

### **3.3.1 Matérias primas e suas funções**

As propriedades finais dos polímeros formados podem ser manipuladas através da escolha das matérias-primas. Qualquer alteração do tipo ou proporção dos reagentes resulta em uma mudança nas propriedades do produto polimérico, por isso um grande número de poliésteres é teoricamente possível. Na maioria das resinas comerciais a reatividade fundamental é derivada do anidrido maleico e tem o monômero de estireno como solvente. O propileno glicol é o principal glicol utilizado na maioria das formulações, enquanto que o anidrido orto-ftálico é o principal ácido dibásico empregado para moderar a reatividade e o desempenho da resina. (KIRK; OTHMER, 1996).

O anidrido meta-ftálico é utilizado para aumentar a resistência térmica e para formar resinas com maior resistência ao ataque químico. O anidrido para-ftálico possui propriedades semelhantes ao anidrido orto-ftálico, entretanto só é empregado em algumas formulações devido ter solubilidade limitada em polímeros que contenham estireno. (KIRK; OTHMER, 1996).

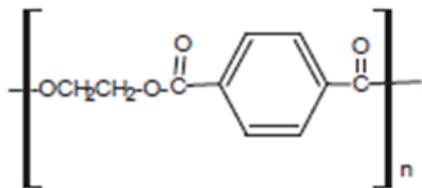
Além do etileno glicol outros glicóis podem ser utilizados para conferir propriedades importantes nas formulações. Etileno glicol é usado em grau limitado para reduzir o custo, enquanto que o dietileno glicol produz um polímero mais flexível e resistente às rachaduras. Em produtos mais comerciais utiliza-se o

neopentil glicol, o qual tem a função de melhorar a resistência aos raios ultravioletas. (KIRK; OTHMER, 1996).

Ácidos alifáticos de cadeia longa, como o ácido adípico, são usados para melhorar a flexibilidade e melhorar as propriedades de impacto, demonstrando melhorias sutis sobre resinas modificadas com dietileno glicol e glicóis como o polipropileno glicol. (KIRK; OTHMER, 1996).

O politereftalato de etileno (figura 8) é um polímero termoplástico empregado em grandes concentrações em resinas poliésteres insaturadas, pois além de apresentarem boa compatibilidade reduzem potencialmente o custo, fornecendo ácido tereftálico e glicol para a reação.

**Figura 8** - Estrutura do PET

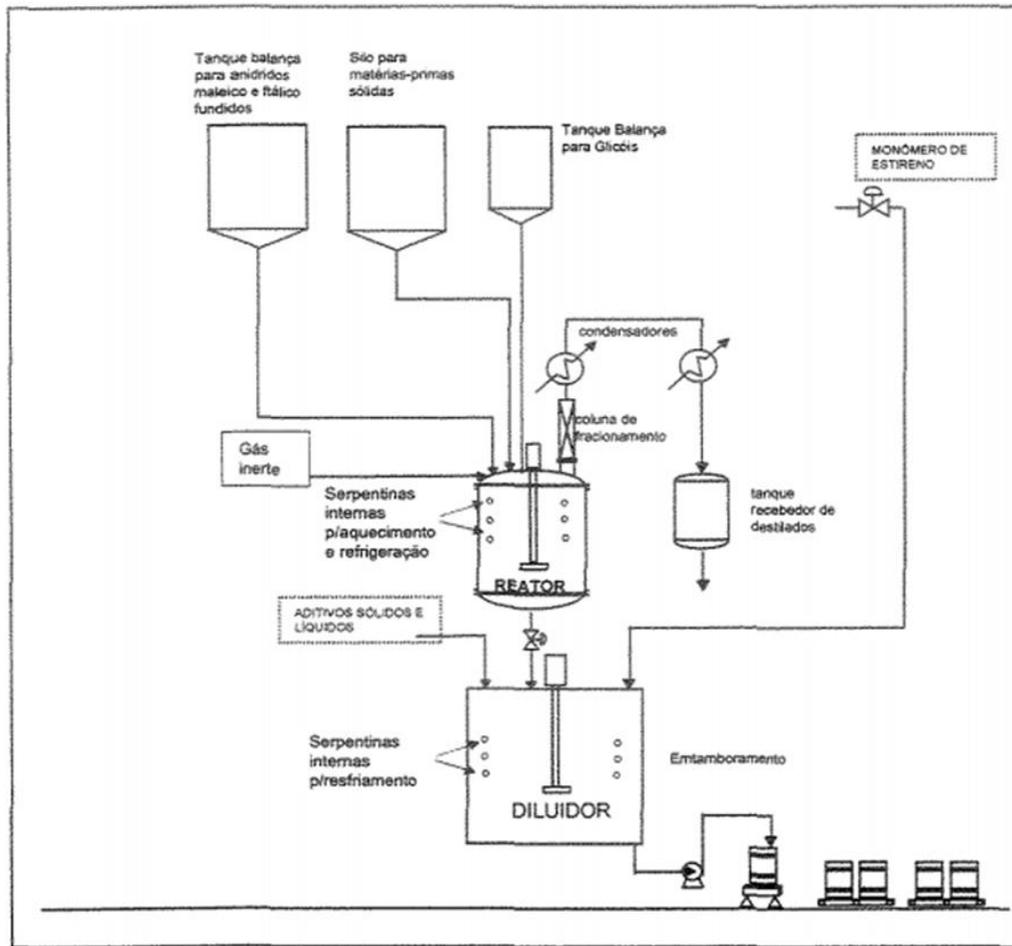


Fonte: SALEH, 2012.

### 3.3.2 Processo de produção

As resinas poliésteres insaturadas são produzidas em reatores carregados com anidrido ftálico e maleico e um componente de hidroxila, como o propileno glicol ou etileno glicol, como mostra a figura 9. Imediatamente após a reação de condensação é incorporado o estireno para evitar a cristalização do polímero. (POILLUCCI; HANSEN, 2013).

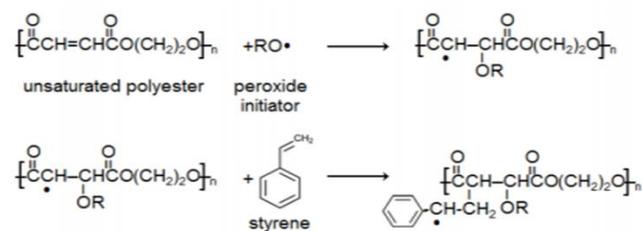
**Figura 9** - Esquema de produção industrial de resina poliéster insaturada



Fonte: KIRK; OTHMER 1996.

Um sistema de resina poliéster é normalmente composto por uma base poliéster composta de anidrido maleico e propileno glicol (50 – 65% em peso), que diluído em monômero de estireno (35 – 50% em peso). O processo de polimerização é iniciado pela adição de um peróxido de metil etil cetona (1 – 2% em peso), de acordo com a figura 10. (POILLUCCI; HANSEN, 2013).

**Figura 10** - Reação de polimerização



Fonte: POILLUCCI; HANSEN, 2013.

A resina é fabricada em processo batelada usando reatores equipados para aquecimento, arrefecimento, controle de pressão, vácuo de refluxo e destilação. O processo pode ter a duração de até 20 horas e alcançar temperatura de 220°C, onde depois de reagir o polímero é resfriado e transferido para um tanque diluidor para ser dissolvido com estireno.

### 3.3.2.1 Reator químico

Normalmente a parte principal de qualquer unidade de produção é o reator químico, pois nele ocorre a transformação dos reagentes em produtos. Antes de entrarem no reator, os reagentes passam através de vários equipamentos, onde a pressão, a temperatura, a composição e a fase são ajustadas visando as melhores condições para que as reações químicas aconteçam. (HILL JUNIOR, 1977; BRASIL, 2004).

Antes de chegarem nos reatores, os processos contam com outros equipamentos, onde ocorrem as mudanças físicas no material como elevação da pressão em bombas e compressores, ou mistura e separação. Estas operações que envolvem mudanças físicas no material são chamadas de operações unitárias. (BRASIL, 2004).

Mediante aos vários tipos de processos encontrados nas indústrias existem diversos tipos de reatores de mistura. Nenhuma das unidades de equipamento de mistura, isoladamente considerada, é capaz de fornecer a eficiência necessária a este grande número de tarefas. (COULSON, 2004).

Para a escolha do reator ideal o engenheiro químico deve avaliar os requisitos do processo, como temperatura, pressão e grau de agitação necessário. Outros fatores que necessitam ser analisados são a composição da matéria prima, a escala do processo, e se o mesmo deve ser contínuo ou intermitente. (HILL JUNIOR, 1977).

Existem várias fontes potenciais de dados experimentais que são essenciais para a escolha do reator apropriado. De acordo com Hill Junior (1977) existem três principais etapas:

- Experimentos realizados em bancada: os reatores utilizados nessa etapa são projetados para operar em temperatura constante e em condições

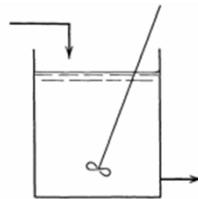
que reduzem o calor. Devido a isso é possível fazer uma avaliação dos efeitos químicos existentes.

- Estudos em planta piloto: utilizam-se reatores maiores visando determinar a taxa de reação, entretanto torna-se mais difícil avaliar os efeitos químicos existentes.
- Dados operacionais dos reatores de escala comercial: em casos onde a empresa tem acesso a outro equipamento semelhante, analisam-se as condições semelhantes.

Existem basicamente dois tipos de reatores: o tanque e o tubo. O reator do tipo tanque ideal apresenta agitação eficiente que permite que o conteúdo se mantenha em temperatura uniforme em todo o equipamento. Já no reator tubular o reagente líquido homogêneo percorre através de um tubo, apresentando um movimento chamado de fluxo de pistão. (HILL JUNIOR, 1977).

De acordo com Hill Junior (1977) os reatores do tipo tanque simples pode ser operado de três formas: batelada, semibatelada e fluxo contínuo. No modo contínuo, como mostra a figura 11, de operação o tanque é agitado, a alimentação é contínua e o conteúdo do reator é descarregado mantendo um nível constante no reservatório.

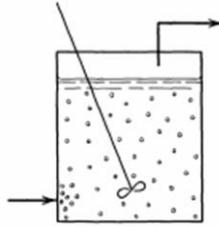
**Figura 11 - Reator contínuo**



**Fonte:** HILL JUNIOR, 1977.

O reator do tipo semibatelada fornece a possibilidade de injeção ou retirada de reagentes de forma contínua dentro do processo batelada. (HILL JUNIOR, 1977). A figura 12 mostra o reator semibatelada.

**Figura 12 - Reator semibatelada**



Fonte: HILL JUNIOR, 1977.

Os reatores batelada, apresentados na figura 13, são chamados de sistemas de volume constante, ou sistemas de massa específica constante, pois o volume e a massa específica permanecem constantes ao longo do processo. Esse equipamento é um tanque com agitação e opera por meio do carregamento da carga de reagentes de uma única vez e da retirada do produto final também de uma única vez. (FOGLER, 2009).

**Figura 13- Reator batelada**



Fonte: HILL JUNIOR, 1977.

### 3.3.2.1.1 Reator descontínuo perfeitamente agitado

Os reatores em batelada são tanques cilíndricos que normalmente ficam na posição vertical. Esse tipo de geometria facilita a limpeza e a manutenção do equipamento. A agitação pode ser feita através das lâminas do agitador de várias formas, ou por circulação forçada com uma bomba externa ou interna. (HILL JUNIOR, 1977).

Devido aos efeitos de grande energia que muitas vezes acompanham a reação química, é geralmente necessário prever a transferência de calor para ou do conteúdo do reator. Aquecimento ou resfriamento pode ser realizado usando paredes revestidas, bobinas internas ou tubos internos preenchidos com um fluido de transferência de calor que é distribuído através de um trocador de calor externo. Energia também pode ser fornecida por aquecimento elétrico ou fogo direto. Se o fluido do processo é corrosivo e bombeado facilmente e com segurança, pode ser preferível para

empregar um trocador de calor externo e bomba de circulação. (HILL JUNIOR, 1977, p. 249).

A seleção de qualquer equipamento de transferência de calor, externo ou interno, é feita por meio da área de transferência necessária, levando-se em consideração a possível incrustação do material, os requisitos de temperatura e pressão e também os efeitos que podem acontecer se o fluido entrar em contato direto com o trocador de calor. (HILL JUNIOR, 1977).

Segundo Fábrega (2012) existem três tipos de reatores batelada quanto à transferência de calor: reator batelada encamisado (camisa externa simples), reator batelada com camisa externa (meia cana) e reator batelada encamisado com fluxo constante (coflux).

Reator batelada encamisado (camisa externa simples): em grandes reatores esse sistema de aquecimento pode demorar muito tempo para ajustar a temperatura. A distribuição de transferência de calor não é ideal. (FÁBREGA, 2012, p. 9). A figura 14 mostra esse tipo de reator.

**Figura 14 - Reator batelada encamisado**



**Fonte:** FÁBREGA, 2012.

Reator batelada com camisa externa (meia cana): é construído soldando-se uma metade de tubo na parede externa do reator. Permite uma transferência de calor melhor que o reator encamisado e aquecimento/resfriamento mais uniforme. (FÁBREGA, 2012, p. 9). A figura 15 mostra esse tipo de reator.

**Figura 15** - Reator batelada com camisa externa



Fonte: FÁBREGA, 2012.

Reator batelada encamisado com fluxo constante (coflux), apresentado na figura 16, possui uma série de camisas e uma válvula que é responsável por regular a área encamisada, variando a área de transferência de calor. Isso possibilita regular a temperatura do processo sem precisar alterar a temperatura na camisa. A vantagem é que ele apresenta rápido tempo de resposta para o controle da temperatura.

**Figura 16** - Reator batelada encamisado com fluxo constante



Fonte: FÁBREGA, 2012.

Todas as partes do reator que entram em contato com a reação e seus derivados quentes são feitas de NiCrMo inox de alta qualidade. O uso do alumínio, aço esmaltado ou cobre no reator foi abandonado, já que estes tipos de reator impedem a utilização de soluções alcalinas e são menos resistentes a altas temperaturas. (KASKA; LESEK, 1991).

### 3.3.2.2 Tanque diluidor

O tanque diluidor é um equipamento que deve ser construído com aço inoxidável 316 L, o qual apresenta resistência à oxidação até a temperatura de 875°C. A presença de molibdênio na composição química deste aço eleva a sua resistência mecânica e aumenta a resistência ao ataque corrosivo em meios clorados e não oxidantes. (ZUCHINALI, 2016).

A utilização de tanques com impelidores é muito comum na indústria química. A importância se deve à transferência de calor e ao fato de que a temperatura é um fator significativo em controle de processo. O diluidor pode ser equipado com um impelidor do tipo pá inclinada, a qual desempenha bom comportamento em produtos que alteram a viscosidade com o tempo de processo. (ZUCHINALI, 2016).

O coeficiente global da troca térmica depende do tipo e impelidor empregado, das propriedades do fluido e dos parâmetros do equipamento. Devido a isto, para garantir o resfriamento necessário da resina através do aumento da área de contato entre o fluido quente e o fluido frio, é ideal que o equipamento contenha uma serpentina tubular interna e uma serpentina meia-cana. (ZUCHINALI, 2016).

Na parte inferior do equipamento tem-se a turbina de rushton para garantir alto cisalhamento. As paredes do diluidor são equipadas com chicanas, que são placas planas posicionadas na direção longitudinal do tanque e que possuem a função de evitar a formação de um vórtice central, redirecionando as linhas de fluxo. A formação de vórtice pode provocar a formação de espuma, prejudicando a qualidade final da resina. (ZUCHINALI, 2016).

#### 3.3.2.2.1 Agitação

Foust e Clump (1982) afirmam que a agitação pode ser aplicada em diversas áreas, como na dispersão de um soluto em um solvente, mistura de dois líquidos miscíveis ou na mistura dos reagentes em um reator químico. Para cada caso é necessário efetuar a avaliação da dispersão, analisando-se as forças de cisalhamento necessárias.

Para ter uma previsão do desempenho de um sistema de agitação pode-se adotar uma teoria de semelhança, supondo que o desempenho de um sistema

agitador em grande escala pode ser previsto a partir de ensaios de medidas efetuadas em um sistema semelhante, só que de menor escala. A análise do teste em menor porte permite avaliar os princípios da dinâmica dos fluidos, podendo relacioná-los com escalas maiores. Em diversas situações é possível se basear no fato de que o equipamento de grande porte opera com a mesma intensidade de energia que a unidade piloto. Para resultados mais precisos é ideal que a tensão de cisalhamento seja a mesma nas duas situações, garantindo uma ampliação de escala correta. (FOUST; CLUMP, 1982).

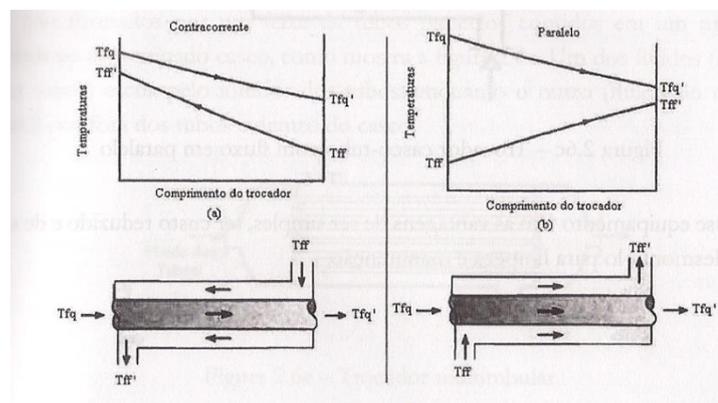
Existem operações de mistura que são sensíveis à velocidade. Para as mesmas, a ampliação de escala deve ser feita mantendo-se constante a razão torque/volume unitário. (FOUST; CLUMP, 1982).

### 3.3.2.3 Trocadores de calor

Nas indústrias químicas é muito frequente a necessidade de alterar a temperatura de uma corrente de fluido. Isso pode ser feito por meio da passagem do fluido em um trocador de calor, onde ocorre o contato térmico com outro fluido em temperatura diferente. Alguns tipos de aplicações comuns deste tipo de equipamento são os aquecedores, resfriadores, condensadores, evaporadores e torres de refrigeração. (BLACKADDER; NEDDERMAN, 2004; GAUTO; ROSA, 2011).

A figura 17 apresenta os perfis de temperatura.

**Figura 17** - Perfis de temperatura em trocadores de calor: (a) fluxo contracorrente e (b) fluxo paralelo.



Fonte: GAUTO; ROSA, 2011.

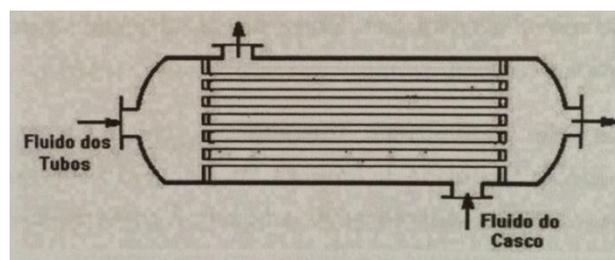
O processo de transferência de calor no interior de um trocador de calor pode ocorrer em fluxo paralelo ou em contracorrente. Nos processos em contracorrente, é possível obter temperaturas aproximadas entre o fluido quente de entrada ( $T_{iq}$ ) e o fluido frio de saída ( $T_{ff}'$ ) do trocador. Já nos processos em paralelo, a temperatura de entrada do fluido quente ( $T_{iq}$ ) e a de saída do fluido frio ( $T_{ff}'$ ) são bem mais distantes. (GAUTO; ROSA, 2011, p. 97).

### 3.3.2.3.1 Tipos de trocadores

Existem trocadores de calor que fazem a mistura direta dos fluidos, como as torres de resfriamento e os aquecedores de água, entretanto, utilizam-se normalmente os trocadores onde os fluidos são separados, como os trocadores de serpentina, tipo casco e tubo ou trocadores de placas paralelas. (GAUTO; ROSA, 2011).

Nos trocadores do tipo casco e tubo um fluido passa através dos tubos paralelos que se encontram dentro do recipiente cilíndrico e outro fluido passa pelo cilindro. O choque do fluido com os tubos resulta numa turbulência, a qual aumenta a taxa de transferência de calor. A figura 18 mostra o funcionamento deste equipamento.

**Figura 18 - Trocador casco e tubo**



Fonte: GAUTO; ROSA, 2011.

“Os trocadores de serpentina, ilustrado na figura 19, são formados por um tubo enrolado na forma de espiral, formando a serpentina, a qual é colocada em uma carcaça ou recipiente. O espaço de troca de calor é a área da serpentina.” (GAUTO; ROSA, 2011, p. 99).

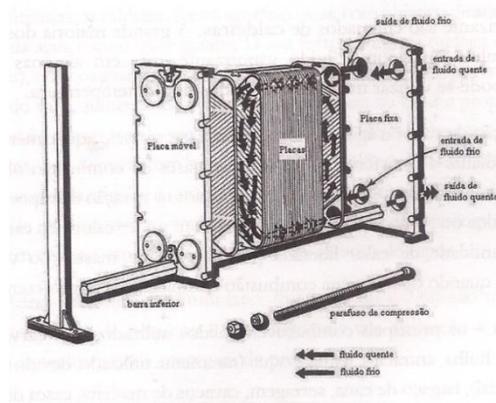
**Figura 19** - Trocador de serpentina



Fonte: GAUTO; ROSA, 2011.

O outro tipo de trocador de calor está apresentado na figura 20.

**Figura 20** - Trocador de calor de placas



Fonte: GAUTO; ROSA, 2011.

O trocador de placas funciona através de placas planas paralelas, as quais são sustentadas por barras. Entre as placas formam-se canais por onde os fluidos escoam. Os trocadores de placa começaram a ser utilizados em 1930 devido a facilidade de limpeza e também por conta da turbulência causada pelas placas, promovendo maior transferência de calor. (GAUTO; ROSA, 2011).

### 3.3.2.4 Resfriadores de líquidos

Oliveira (2005) afirma que os fenômenos térmicos ocorrem diariamente, através das alterações da temperatura, ou até mesmo das mudanças climáticas que são provocadas pelas variações de temperatura atmosférica e pressão. Um corpo não esfria espontaneamente. Afirma-se isso porque o mais comum é colocá-lo em

contato com outro corpo mais frio. Entretanto, pode-se fazer um corpo resfriar na ausência de outro mais frio através de um aparelho refrigerador, o qual faz o oposto do processo espontâneo, retirando calor de um corpo mais frio pelo consumo de trabalho, cedendo calor a outro mais quente.

De acordo com Silva (2010) a refrigeração é o nome dado ao processo responsável pela remoção de calor de um meio, reduzindo a temperatura e mantendo essa condição por meios naturais ou mecânicos. Para realizar isto, o calor deve ser removido de um corpo, o qual se pretende refrigerar, e transferido para outro, cuja temperatura esteja abaixo da do corpo refrigerado.

Para Dossat (2004) nos primórdios da refrigeração mecânica, o equipamento que era utilizado era muito volumoso e de pouca eficiência. O equipamento exigia o acompanhamento de um engenheiro de operação durante tempo integral. Isso limitava o uso da refrigeração mecânica a algumas aplicações, como fábricas de gelo ou grandes depósitos de armazenamento.

Dossat (2004) também afirma que nos últimos anos a indústria passou por uma grande transformação. Houve um aumento no número de empresas e a disputa entre elas fez com que os diversos setores industriais aumentassem a produtividade e a qualidade, priorizando a competitividade de mercado. Mediante a isto, uma forma de reduzir o tempo em diversos processos, bem como aumentar a produtividade, é dando atenção aos sistemas de refrigeração industrial.

A refrigeração industrial tem como principal objetivo o resfriamento de alguma substância ou ambiente. Os sistemas de refrigeração consistem de muitos componentes diferentes, sendo que cada um deles pode ser produzido por um fabricante diferente. Devido a isto é importante identificar e monitorar os parâmetros de todas as partes do equipamento, garantindo que cada componente trabalhe na sua configuração ideal. Os componentes básicos de um sistema de refrigeração são: compressores, trocadores de calor, ventiladores, bombas, tubos, dutos e controles. Enquanto que os fluidos mais envolvidos são a água, o ar e alguns tipos de refrigerantes. (MANSKE, 1999; STOECKER; JABARDO, 2002).

Levando em consideração que o calor se dirigirá de uma região de alta temperatura para outra de menor temperatura, para limitar o fluxo de calor na faixa refrigerada deve-se isolar a região de seus arredores, com um bom isolador térmico. (DOSSAT, 2004).

Todos os processos de resfriamento podem ser classificados como sensíveis ou latentes, de acordo com o efeito que o calor absorvido tem sobre o refrigerante. Quando o calor absorvido causa uma elevação na temperatura do refrigerante, o processo de resfriamento é chamado sensível, enquanto que quando o calor absorvido causa uma mudança no estado físico do refrigerante, o processo de resfriamento é chamado latente. Em qualquer dos processos, se o efeito de refrigeração deve ser contínuo, a temperatura do refrigerante deve ser mantida continuamente abaixo da temperatura da câmara ou do material que está sendo refrigerado. (DOSSAT, 2004).

Nas indústrias químicas é muito comum utilizar como reator uma panela ou caldeira encamisada. Em muitos casos tem de remover-se ou fornecer-se calor à mistura, para controlar a velocidade da reação ou para que ela se dê por completo. Consegue-se, de uma maneira prática, fornecer ou remover calor ao ou do recipiente, fazendo passar água, na forma de vapor ou líquida, por uma camisa adaptada à sua parte externa ou através de uma serpentina helicoidal instalada no seu interior. (COULSON, 2004, p. 310).

Segundo Stoecker e Jabardo (2002) os resfriadores de líquidos para baixas temperaturas constituem um verdadeiro problema para o operador, caso o projeto e a seleção não sejam adequados. Deve-se garantir que o resfriador apresente a área de transferência de calor adequada. Também é importante considerar a importância da capacidade de bombeamento, levando-se em consideração a viscosidade da solução.

Os resfriadores de líquidos, também chamados de chillers, ou unidades de água gelada, são equipamentos projetados para garantir o fornecimento contínuo de água à temperatura ajustada para o resfriamento de processos industriais. (LOPES, 2007).

Na maioria dos processos industriais o efeito de refrigeração é obtido por meio da circulação de um fluido a baixa temperatura (água, amônia, salmoura ou outros). (STOECKER; JABARDO, 2002).

As unidades de água gelada possuem como princípio de funcionamento o ciclo por compressão de vapor. Os principais componentes deste ciclo são: evaporador, tubulação de sucção, compressor, tubulação de descarga, condensador, tubulação de líquido e válvula de expansão. (LOPES, 2007).

#### 3.3.2.4.1 *Evaporador*

Os evaporadores possuem a função de retirar calor do meio que se deve refrigerar diretamente pelo fluido refrigerante ou pela serpentina de água gelada. São construídos de aço quando trabalham com amônia, e de latão, alumínio ou cobre quando o processo ocorre com fluidos refrigerantes convencionais. (SILVA, 2010).

Por causa das muitas e diversas aplicações de refrigeração mecânica, os evaporadores são fabricados em uma grande variedade de tipos, formas, tamanhos e projetos, e podem ser classificados em um número de diferentes modos, tais como tipo de construção, método de alimentação dos líquidos, condição de operação, método de circulação de ar (ou líquido), tipo de controle de refrigerante, e aplicação. (DOSSAT, 2004, p. 321).

Os evaporadores podem ser utilizados para resfriar ar ou líquido. Se for para resfriamento de líquido utiliza-se normalmente o tipo serpentina, tubo e casca ou placas. No caso do resfriamento do ar utilizam-se principalmente os evaporadores de serpentinas aletadas. (SILVA, 2010).

Dossat (2004) afirma que a capacidade de um evaporador é taxa que o calor passa através das paredes do evaporador para o líquido interno vaporizante. O evaporador que foi selecionado para uma aplicação deverá ter capacidade de transmissão de calor. Isso permitirá ao mesmo absorver calor para produzir o resfriamento desejado, quando estiver operando nas condições projetadas.

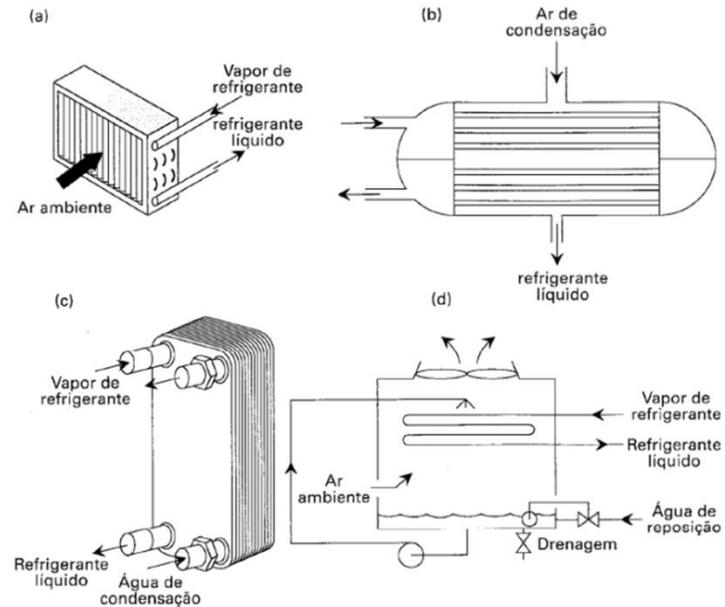
#### 3.3.2.4.2 *Condensador*

Juntamente com uma torre de resfriamento são utilizados os condensadores de água. O processo de resfriamento em um condensador de água acontece por meio da troca de calor sensível, onde o fluido tem a temperatura reduzida até a temperatura de saturação. Nesse ponto se inicia a condensação. (SILVA, 2010).

Ao contrário do que ocorre na refrigeração comercial e no condicionamento de ar, em que a maioria dos condensadores é resfriada a ar, na refrigeração industrial predomina o tipo evaporativo. Outro aspecto que diferencia as áreas é a instalação em paralelo dos condensadores, muito comum em refrigeração industrial, mas raramente utilizada nos outros segmentos. (Stoecker; Jabardo, 2002, p.188).

Em ambos os condensadores, resfriados a ar ou evaporativos, ilustrados na figura 21, a condensação do refrigerante acontece dentro dos tubos.

**Figura 21** - Tipos de condensador: a) resfriado a ar; b) resfriado a água tipo carcaça-tubos; c) resfriado a água tipo placas; d) evaporativo



Fonte: STOECKER; JABARDO, 2002

O refrigerante entra no estado de vapor superaquecido, apresentando um baixo coeficiente de transferência de calor, característica do escoamento de gases. À medida que a condensação continua o coeficiente aumenta. No entanto, a partir de um ponto pode-se verificar que o coeficiente reduz devido o aumento da espessura da película do condensado. Este comportamento é muito importante para os operadores que utilizam condensadores resfriados a ar ou evaporativos, porque mostra o efeito da presença excessiva de líquido no condensador, afetando na sua capacidade. (STOECKER; JABARDO, 2002).

#### 3.3.2.4.3 Compressor

A função dos compressores é absorver o fluido refrigerante no estado de vapor à baixa pressão e fazer a compressão do mesmo em alta temperatura e pressão até o condensador. Os compressores comumente utilizados nos processos são volumétricos ou centrífugos. Nos volumétricos a compressão ocorre pela

redução do volume do fluido refrigerante e nos compressores centrífugos o fluido é acelerado através das pás de um rotor. (SILVA, 2010).

#### 3.3.2.4.4 Válvula de expansão

As válvulas de expansão são utilizadas para controlar o fluxo do refrigerante, impedindo a evaporação do mesmo na serpentina e mantendo o superaquecimento constante do vapor que sai da serpentina. Esse tipo de válvula é instalada próxima do evaporador. (SILVA, 2010). A tabela 3 apresenta os procedimentos de regulagem de uma válvula de expansão.

**Tabela 3** - Procedimentos de regulagem de uma válvula de expansão

Procedimento	Superaquecimento	
	Aumenta	Diminui
Abrir válvula		X
Fechar válvula	X	
Adicionar refrigerante		X
Retirar refrigerante	X	

Fonte: SILVA, 2010.

Silva (2010) apresenta como conceito de superaquecimento: diferença entre as temperaturas de saturação do fluido refrigerante e a sua condição na saída do evaporador. Esta medição deve ser efetuada o mais próximo possível da saída do evaporador.

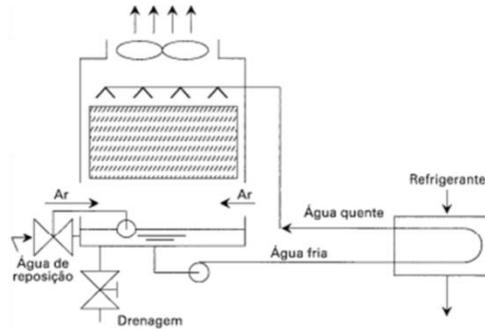
#### 3.3.2.4 Torre de resfriamento

As torres de arrefecimento apresentam a função de resfriar a água utilizada para condensar os fluidos refrigerantes. (SILVA, 2010).

O efeito do resfriamento se dá como resultado da aspersion de água em uma corrente de ar ambiente em configuração contracorrente do ar e da água. Outra possibilidade seria a de circular o ar transversalmente à corrente de água, numa configuração denominada em correntes cruzadas. (STOECKER; JABARDO, 2002, P. 196).

O mecanismo de transferência de calor na torre de resfriamento pode ser interpretado na figura 22.

**Figura 22** - Circuito de água em uma torre de resfriamento



Fonte: STOECKER; JABARDO, 2002

Na torre de arrefecimento, a temperatura do líquido cai e a temperatura e a umidade do ar sobem. A temperatura limite até a qual a água pode ser resfriada é a temperatura de bulbo úmido correspondente às condições do ar de entrada. (COULSON, 2004).

A redução da temperatura da água passando através da torre é chamada o “limite” da torre. Naturalmente, para manter o equilíbrio no sistema de água do condensador, o “limite” deve ser sempre igual à elevação da temperatura da água no condensador. (DOSSAT, 2004).

### 3.3.2.6 Parâmetros de controle de processo

Durante o processo de fabricação da resina algumas variáveis tornam-se importantes para garantir a qualidade do polímero formado. Temperatura, vazão e velocidade de agitação são classificadas como variáveis primárias, enquanto que a presença de inibidor, catalisador e agentes específicos são considerados variáveis secundárias. (CANEVAROLO, 2006).

#### 3.3.2.6.1 Vazão

A medição da vazão é essencial a todas as fases da manipulação dos fluidos, incluindo a produção, o processamento, a distribuição dos produtos e das utilidades. No processo produtivo de resinas poliésteres insaturadas é muito comum o controle da quantidade de matéria transportada por unidade de tempo através de tubulações. Essa variável é controlada no transporte dos fluidos refrigerantes, na

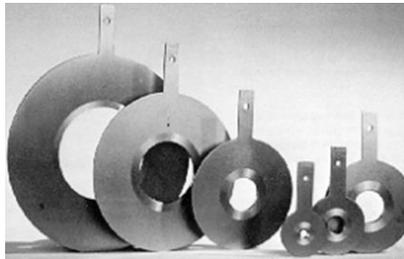
transferência de matérias-primas para o reator e também na transferência do polímero para o tanque diluidor. (BADINO JUNIOR; CRUZ, 2010).

A medição confiável e precisa requer a correta seleção do instrumento de medição, a sua instalação, a sua operação, a sua manutenção e a interpretação dos resultados obtidos. (RIBEIRO, 1997).

Para se determinar as vazões das correntes de entrada e saída em processos industriais, utilizam-se medidores de vazão conectados às linhas de processo. Como exemplos de medidores de vazão têm-se o rotâmetro, placa de orifício e medidor tipo Venturi. (BADINO JUNIOR; CRUZ, 2010).

A placa de orifício, como mostra a figura 23, é utilizada na medição de vazão de líquidos de baixa viscosidade e limpos, para evitar a incrustação. Pode ser aplicada em processos que necessitam a medição de gases e vapor d'água em baixa velocidade. Neste equipamento o fluido do processo entra em contato direto com a placa, sendo necessária a escolha de um material compatível com o fluido, objetivando evitar a corrosão. (RIBEIRO, 1997).

**Figura 23 - Placa de orifício**

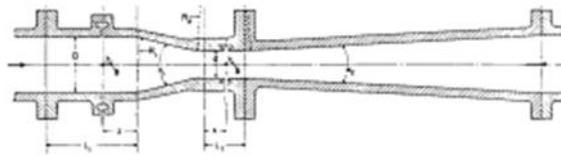


**Fonte:** RIBEIRO, 1997.

A placa de orifício deve ser construída com materiais que não sofram deformação com a pressão e não se dilate com a temperatura. Os materiais mais comuns são: aço carbono, aço inoxidável, monel, bronze e latão. (RIBEIRO, 1997). A figura 23 apresenta a placa de orifício.

O medidor do tipo Venturi, apresentado na figura 24, é muito empregado em processos onde a perda de carga permanente deve ser baixa, devido o mesmo possuir boa recuperação de pressão. Pode ser utilizado para medir a vazão de fluidos sujos, pois apresenta a característica de não acumular incrustações. (MARTINS, 1998).

**Figura 24 - Tubo de Venturi universal**



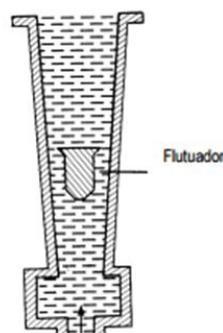
**Fonte:** RIBEIRO, 1997.

O tubo de Venturi é uma seção de tubo entre duas seções cônicas. Devido à suavidade da sua geometria, diferente da placa de orifício que é abrupta, ele apresenta a vantagem de não acumular sujeiras nas restrições e facilitar a recuperação de pressão, conseqüentemente apresenta menor perda de carga. (RIBEIRO, 1997).

O outro tipo de medidor é o rotâmetro, o qual extrai a energia do processo e posiciona um flutuador em um tubo de escala previamente calibrada. Esse equipamento é formado por um tubo cônico de medição e um flutuador que se move para cima e para baixo. O fluido a ser medido entra na parte inferior do tubo e sobe em torno do flutuador, saindo pelo topo. (RIBEIRO, 1997).

Cada posição do flutuador, ilustrado na figura 25, corresponde a uma vazão do fluido. A vazão pode ser determinada apenas pela observação direta da posição do flutuador, de acordo com a escala de leitura fixada no equipamento. (RIBEIRO, 1997).

**Figura 25 - Rotâmetro de área variável**



**Fonte:** RIBEIRO, 1997.

### 3.3.2.6.2 Temperatura

Junto com a pressão e a vazão, a temperatura é uma das principais variáveis de processo. A medição e o controle deste parâmetro são de fundamental importância em diversas aplicações, que abrange desde processos físicos e químicos até a proteção de equipamentos. (BEGA *et al*, 2006).

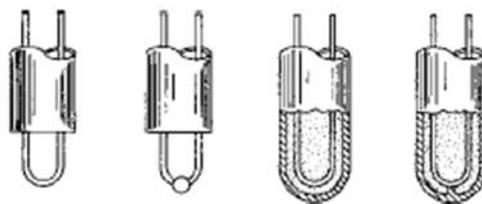
A temperatura de uma substância indica a sua habilidade de trocar energia com outra substância que ela esteja em contato térmico. Mediante a isto, uma substância a uma temperatura mais alta pode ceder calor a outra que esteja em temperatura inferior. (STOECKER; JONES, 1985).

Nas indústrias é muito comum se utilizar os bulbos de resistência de fio metálico. Para uso industrial empregam-se fios de platina, níquel, cobre ou liga de 70% Ni/30% Fe. O sensor tipo Pt 100, é chamado desta forma por apresentar em sua composição um elemento de platina e resistência padronizada de 100  $\Omega$  a 0°C. Esse tipo de sensor é o mais empregado devido à sua estabilidade, repetitividade, precisão e ampla faixa de operação. (BEGA *et al*, 2006).

“Apesar da crescente aplicação do Pt 100 nas medições de temperatura, os termopares continuam sendo os sensores mais empregados nas aplicações industriais.” (BEGA *et al*, 2006, p. 222).

Os termopares que apresentados estão apresentados figura 26 são sensores de temperatura de natureza elétrica e produzem uma tensão proporcional à diferença de temperatura de referência conhecida. (RIBEIRO, 2002).

**Figura 26** - Sensores tipo termopar



**Fonte:** RIBEIRO, 2002.

Nos processos químicos o problema de controle na maioria dos reatores é o controle de temperatura. Em reações endotérmicas ocorrem falhas ao adicionar calor suficiente para manter o reator na temperatura desejada, resultando na

diminuição da conversão final. Em reações exotérmicas ocorrem falhas ao remover o calor do reator, resultando na diminuição da constante de equilíbrio. (LUYBEN, 1998).

Na produção de resina poliéster insaturada, durante a transferência do polímero para o tanque diluidor, é necessário o constante controle da temperatura, a qual não deve ultrapassar 60°C, respeitando temperatura de polimerização do estireno. Caso esta temperatura passe deste valor estabelecido, cristais de polímeros começam a aparecer nas paredes do diluidor, provocando uma redução no tempo de validade da resina. Como consequência tem-se que quando se utiliza uma resina polimerizada na produção de massas para a linha automotiva e laminados, não se atinge o pico exotérmico, tempo de gel e o intervalo de reação, o qual estabelece o tempo que ela leva para passar do estado líquido para o estado sólido. (ZUCHINALI, 2016).

#### *3.3.2.6.3 Velocidade de agitação*

A agitação é um fator essencial na produção da resina poliéster insaturada. O agitador deve ser eficiente para promover a troca térmica necessária, bem como a homogeneização ideal do meio reacional, garantindo a interação entre as matérias primas sólidas e líquidas no reator batelada. (ZUCHINALI, 2016).

Durante o processo de diluição e transferência das resinas poliésteres insaturadas para o diluidor, o polímero encontra-se em uma temperatura de 180°C no reator e entra em contato com o monômero de estireno que é mantido no tanque diluidor em temperatura ambiente. Este gradiente de temperatura pode provocar a polimerização do estireno. Mediante a isto, para evitar a perda do lote produtivo, a agitação no tanque diluidor deve ser controlada em 80 RPM. (ZUCHINALI, 2016).

### 3.4 MÉTODO DE ANÁLISE E SOLUÇÃO DE PROBLEMAS

Para garantir bom funcionamento de uma empresa é necessário que a mesma possua métodos sistematizados de resolução de problemas, possibilitando o controle do processo e evitando a repetição do mesmo problema. Objetivando a competitividade no mercado de atuação aplica-se o MASP, o qual é um método que as empresas utilizam para encontrar soluções adequadas para a resolução de

problemas, com base na utilização do PDCA, ilustrado na figura 27, e outras ferramentas de qualidade. (SELEME; STADLER, 2010).

**Figura 27 - Ciclo PDCA**



Fonte: SELEME; STADLER, 2010

Como um dos elementos mais difundidos em gestão da qualidade, o ciclo PDCA é utilizado como base para o MASP, efetuando nas organizações uma transformação direcionada à melhoria contínua e ao controle da qualidade total. O PDCA ajuda a identificar novos problemas ou avanços em cada ciclo realizado, visando sempre a melhoria contínua do processo. (SELEME; STADLER, 2010).

De acordo com Seleme e Stadler (2010) “Se o ciclo segue em direção à melhoria contínua, o MASP o utiliza para realizar a análise do problema e para validar a solução proposta, quando de sua formulação.” (SELEME; STADLER, 2010, p. 29).

**Tabela 4 - Método de análise e solução de problemas**

<b>Método de análise e solução de problemas</b>	P	1	Identificação do problema
		2	Observação
		3	Análise para descobrir causas
		4	Plano de ação
	D	5	Ação para eliminar as causas
		6	Verificação da eficácia da ação
	C	?	Bloqueio foi efetivo
		7	Padronização
A	8	Conclusão	

Fonte: SELEME;STADLER, 2010

A tabela 4 apresenta o esquema que deve ser seguido para a realização do método de análise e solução de problemas.

De acordo com Seleme e Stadler (2010) as oito fases são descritas na sequência e podem ser aplicadas em todas as áreas funcionais da organização (produção, finanças, recursos humanos, marketing, entre outras).

- 1ª fase – Identificação do problema: o problema é identificado por uma não conformidade ou desvio do objetivo planejado.
- 2ª fase – Observação: fase de investigação. Deve-se observar se o problema se repete.
- 3ª fase – Análise para descobrir causas: todas as ideias são aceitas e registradas. Faz-se a escolha das hipóteses mais prováveis.
- 4ª fase – Plano de ação: são planejadas as contramedidas que minimizarão ou eliminarão o problema.
- 5ª fase - Ação para eliminar as causas: significa atuar para eliminar as causas. É necessário fazer o treinamento dos envolvidos para bloquear as causas.
- 6ª fase – Verificação da eficácia da ação: verifica-se se existem efeitos secundários, positivos ou negativos. Se forem negativos, as causas devem ser analisadas para levantamento de novas hipóteses.
- 7ª fase – Padronização: registro documentado dos novos procedimentos, visando garantir resultados contínuos.
- 8ª fase – Conclusão: criar nova cultura organizacional para resolução dos problemas, utilizando o MASP.

### 3.5 ANÁLISE ECONÔMICA DE PROJETOS

A análise econômico-financeira é considerada como um estudo detalhado de todos os fatores financeiros envolvidos na organização, objetivando determinar a rentabilidade do projeto, bem como o risco de execução. (SILVA, 2010).

A análise econômico-financeira tem como principais ferramentas o valor presente líquido (VPL), a taxa interna de retorno (TIR) e o tempo de retorno simples de investimento (payback). (TOWLER, 2008).

### **3.5.1 Valor presente líquido**

O valor presente líquido (VPL) é uma técnica utilizada para analisar orçamentos de capital, obtida pela subtração entre o investimento inicial com o valor presente das entradas de caixa, descontando-se uma taxa igual ao custo de capital da empresa. (GITMAN, 2002).

O VPL está diretamente ligado ao custo inicial, aos retornos e suas datas de ocorrência e à taxa requerida ajustada ao nível de risco do projeto. (LAPPONI, 2007).

Um VPL maior que zero indica um investimento atrativo, demonstrando que as entradas de caixa são maiores que as saídas. Em contrapartida, um valor de VPL igual a zero mostra que o investimento é indiferente, e valores negativos significam que o investimento apresenta alto risco. (TOWLER, 2008).

### **3.5.2 Taxa interna de retorno**

A taxa interna de retorno (TIR) é uma técnica muito utilizada que possibilita avaliar as alternativas de investimento, sendo considerada como a taxa de desconto que iguala o valor presente líquido a zero, uma vez que o valor presente das entradas se iguala ao investimento inicial. (TOWLER, 2008).

Segundo Lapponi (2007) a TIR é uma taxa de juro de fácil compreensão, a qual demonstra a viabilidade do projeto.

### **3.5.3 Tempo de retorno simples de investimento – Payback**

Gitman (2010) afirma que o payback é o tempo necessário para a empresa recuperar o investimento que foi feito inicialmente em um projeto, sendo calculado a partir das entradas de caixa.

De acordo com Towler (2008) a forma mais comum para obtenção do tempo de retorno simples de investimento é dividindo-se o capital total de investimento pelo fluxo de caixa anual médio.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho é baseado no estudo de caso realizado na unidade de fabricação de resinas da empresa Anjo Química localizada no bairro Distrito Industrial da cidade de Criciúma. Este estudo aborda a etapa de diluição da resina poliéster insaturada no solvente estireno. Esta operação é realizada no tanque diluidor com agitação e resfriamento. O tempo de transferência é dependente da temperatura da mistura poliéster-estireno, a qual não pode ultrapassar 60°C para evitar a polimerização do monômero de estireno. Quanto menor o tempo de transferência maior a produtividade da planta.

Os cálculos que envolvem os quantitativos temperatura, calor e massa foram baseados nas especificações dos fornecedores dos equipamentos, a saber:

- Unidade compacta com condensação de ar e água. Modelo: SAT 210-AR. As informações relacionadas ao equipamento foram retiradas da tabela 5.

**Tabela 5** - Informações do fabricante

Modelo	Capacidade nominal (kcal/h)	Potência em regime (kW)	Ar de condensação (m <sup>3</sup> /h)	Bomba de processo (m <sup>3</sup> /h)	Reservatório de água (L)
SAT 210- AR	208.000	73,50	68.000	45,0	250

Fonte: REFRISAT, 2016

### 4.1 ANÁLISE DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA RESINA

Foram realizadas visitas técnicas com o objetivo de obter os parâmetros e equipamentos envolvidos no processo e acompanhar a fabricação da resina poliéster insaturada para melhor o entendimento do funcionamento.

Elaborou-se junto com o supervisor de estágio um documento para controle de acompanhamento do processo produtivo, de acordo com a tabela 6.

**Tabela 6** - Controle de acompanhamento do processo produtivo

Controle de acompanhamento		
Data	Horário	Assinatura supervisor

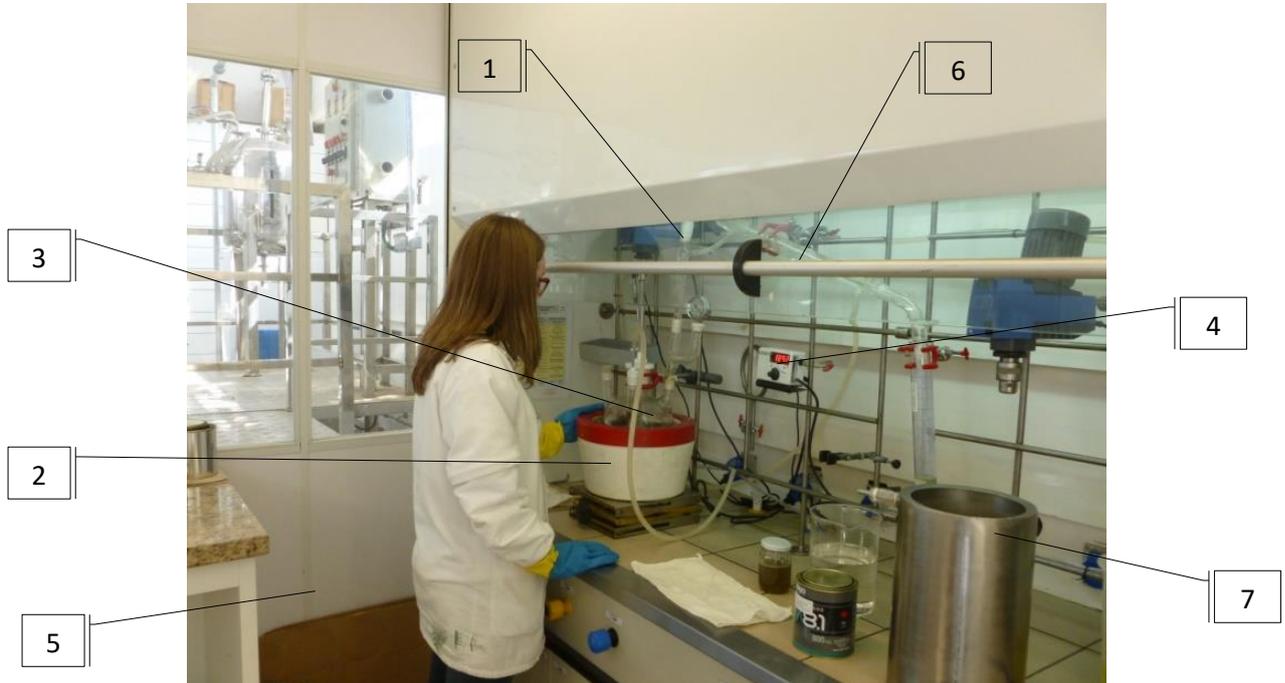
Fonte: AUTOR, 2016.

#### 4.1.1 Acompanhamento da produção da resina em escala de bancada

Com o objetivo de determinar os principais parâmetros relacionados à produção da resina poliéster insaturada, produziu-se a mesma em escala de bancada, de acordo com a figura 28, seguindo os métodos do processo atual. Os seguintes materiais foram utilizados:

1. Agitador mecânico modelo 722 – Fisatom;
2. Manta aquecedora classe 300 com reguladores incorporados – Modelo 102 – Fisatom;
3. Balão de 4 bocas com capacidade de 4L;
4. Regulador de temperatura – Modelo 411 – Fisatom;
5. Bomba de vácuo – Modelo 825T – Tipo diafragma a seco – Fisatom;
6. Coluna de destilação;
7. Tanque diluidor com capacidade de 6L.

**Figura 28** - Produção de resina poliéster insaturada em laboratório



Fonte: AUTOR, 2016.

O processo foi iniciado com PET e glicol. A rotação do balão foi mantida em 100 rpm durante todo o processo.

Após a fusão do PET a reação foi iniciada com glicol, anidrido ftálico e anidrido maleico a 100°C. A temperatura do topo da coluna de destilação foi controlada em 110°C. A temperatura foi aumentada até 150°C, onde se iniciou a geração de água como subproduto. Após 3 horas de reação, aplicou-se o vácuo no balão para retirar o restante da água da reação. O controle de finalização da reação foi feito medindo-se o índice de acidez, de acordo com a figura 29.

**Figura 29** - Teste para determinação do índice de acidez



Fonte: AUTOR, 2016

O índice de acidez deve ser mantido na faixa de 25 a 30 mg KOH/g para a maioria das resinas de mercado. A técnica empregada na medição foi a titulometria, de acordo com a figura 30, utilizando a metodologia ASTM D1639-90.

Posteriormente deu-se início à transferência do polímero para o tanque diluidor. Ao final do processo efetuou-se a medição da viscosidade, utilizando a escala Gardner-Holdt e seguindo a metodologia ASTM D1545-89.

#### **4.1.2 Acompanhamento da produção da resina em escala industrial**

Objetivando determinar o tempo de produção da resina poliéster insaturada, bem como as temperaturas de transferência do polímero para o tanque diluidor, foi acompanhado um lote de produção em escala industrial, como mostra a figura 30.

**Figura 30** - Acompanhamento do processo atual em escala industrial



Fonte: AUTOR, 2016.

Com base no acompanhamento do lote produtivo, desenvolveu-se A tabela 7 para preenchimento dos dados coletados:

**Tabela 7** - Dados do processo atual

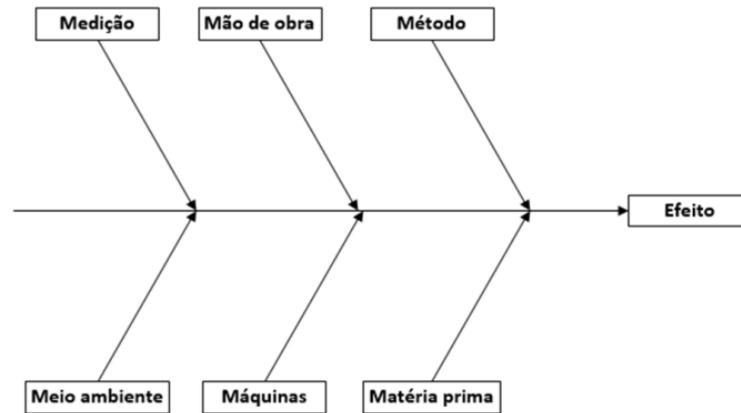
<b>Massa de resina no diluidor (kg)</b>	<b>Temperatura do diluidor (°C)</b>	<b>Tempo (min)</b>
---	-------------------------------------	--------------------

Fonte: AUTOR, 2016.

## 4.2 IDENTIFICAÇÃO DAS OPORTUNIDADES DE MELHORIAS

### 4.2.1 Roteiro de identificação

Com base nas informações obtidas no item 4.1 elaborou-se um fluxograma do processo de fabricação atual e o diagrama de causa e efeito para identificação de oportunidades de melhorias, conforme figura 31.

**Figura 31 - Diagrama de causa e efeito**

Fonte: AUTOR, 2016

A partir do diagrama de causa e efeito desenvolvido foi elaborada uma tabela para preenchimento das causas elencadas, como mostra a tabela 8.

**Tabela 8 - Levantamento das potenciais causas**

Potenciais causas		Ações de validação
Provável	Improvável	

Fonte: AUTOR, 2016

#### 4.2.2 Critérios de seleção das oportunidades de melhorias potenciais

Com o objetivo de selecionar as oportunidades de melhorias de melhor custo-benefício foi estabelecido os seguintes critérios:

- Simplicidade com menor intervenção na planta;
- Rapidez na implantação;
- Menor investimento (capex);
- Maior produtividade.

Considerou-se na seleção o cálculo estimativo preliminar para as oportunidades de melhorias que demandem menor complexidade e tempo de avaliação dos resultados para a realização do presente estudo. Sendo que as mesmas não serão descartadas caso apresentem potencial, mas serão citadas como recomendações para futuros trabalhos.

## 4.3 ANÁLISE DA VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DAS MELHORIAS

### 4.3.1 Ações de verificação e validação das hipóteses

#### 4.3.1.1 Análise da viabilidade técnica

##### 4.3.1.1.1 *Volume do tanque reservatório influencia no desempenho do chiller*

Com o objetivo de avaliar a influência do processo de mistura das correntes de água quente (L4 e L2) e fria (L1, e L3) foi testado em escala industrial a redução do volume do tanque reservatório de água gelada de 8000L para 4000L.

Aplicando-se o procedimento padrão, o processo iniciou com o carregamento do reator com PET para fazer a fusão do mesmo. A temperatura do topo da coluna de destilação foi controlada em 110°C. Após a fusão do PET a reação foi iniciada com glicol, anidrido ftálico e maleico, aumentando-se a temperatura para 150°C para dar início à liberação de água como subproduto.

Após 14 horas de reação aplicou-se vácuo no reator para extrair a água residual da reação. Retirou-se uma amostra de polímero do reator e fez-se o controle do índice de acidez segundo a metodologia ASTM D1639-90. Deu-se início à transferência do polímero para o tanque diluidor quando a temperatura do reator atingiu 180°C. A figura 32 mostra o tanque diluidor com o monômero de estireno pronto para diluição da resina.

**Figura 32 - Tanque diluidor**



Fonte: AUTOR, 2016.

À medida que o polímero era transferido registrou-se a variação da temperatura e o comportamento do resfriamento.

Foi elaborada uma tabela para acompanhamento da variação da temperatura através do tempo e da massa de resina descarregada para o tanque diluidor, como segue na tabela 9.

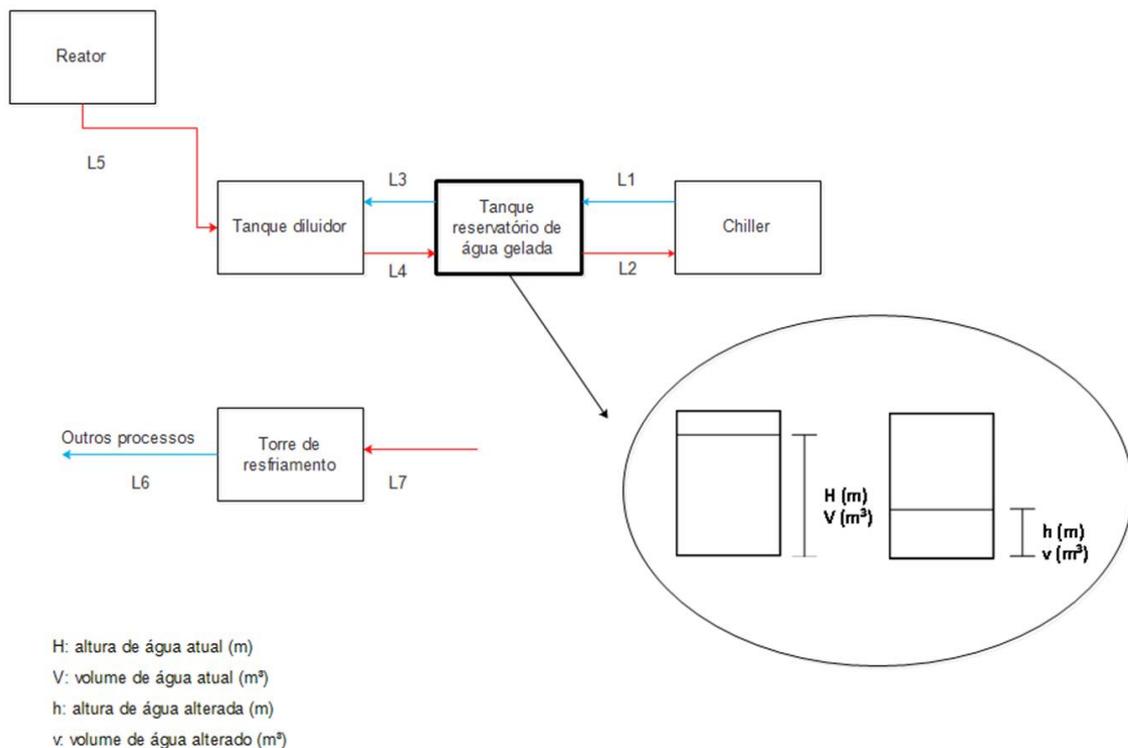
**Tabela 9** - Dados do processo com redução no volume de água

Massa de resina no diluidor (kg)	Temperatura do diluidor (°C)	Tempo (min)
----------------------------------	------------------------------	-------------

Fonte: AUTOR, 2016

A figura 33 ilustra em destaque as alterações de volume propostas e as correntes de água quente (L2, L4, L5 e L7) e fria (L1, L3 e L6).

**Figura 33** - Fluxograma do processo - Redução do volume de água



Fonte: AUTOR, 2016

#### 4.3.1.1.2 Agitação insuficiente no tanque diluidor

Para verificar a eficiência da agitação no tanque diluidor, foi realizado um teste em escala de bancada, conforme ilustrado na figura 34, que compreendeu em simular diferentes níveis de agitação para identificar o menor tempo de mistura completa entre resina e monômero de estireno. Como parâmetro de medição utilizou-se um traçador de base colorimétrica para evidenciar o melhor resultado. Foram utilizados os seguintes materiais:

- Reator de vidro com capacidade de 4L;
- Agitador mecânico modelo 722 – Fisatom;
- 100 g de concentrado universal amarelo;
- 3 kg de resina poliéster insaturada.

**Figura 34** - Simulação da mistura resina-solvente



Fonte: AUTOR, 2016

O teste foi realizado para 3 velocidades de agitação: 45 rpm (velocidade de agitação do processo atual), 80 rpm e 100 rpm, na temperatura ambiente. Foram pesados 4 kg de resina poliéster insaturada já dissolvida em estireno e em seguida, em agitação, foram adicionados 100 g de concentrado amarelo universal. Mediu-se o tempo necessário para completa homogeneização.

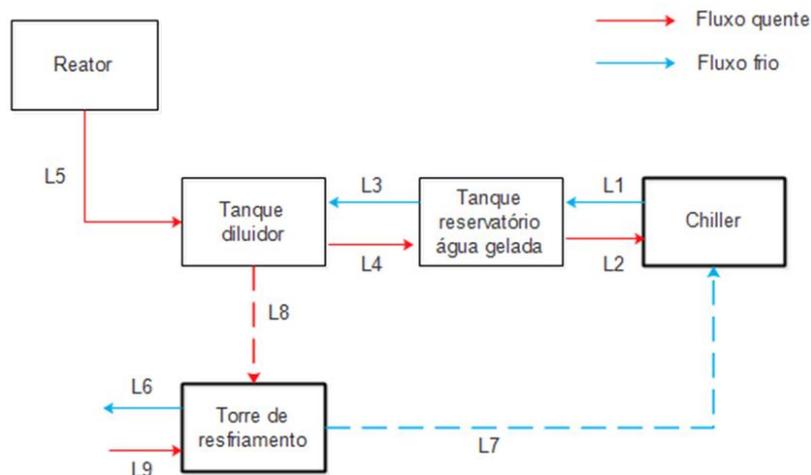
#### 4.3.1.1.3 Uso da torre de resfriamento pode contribuir no desempenho do chiller

A operação de resfriamento da planta é servida por uma torre de resfriamento, exceto a unidade de produção da resina poliéster insaturada, que tem o seu resfriamento servido pelo chiller.

Para avaliação desta hipótese de uso parcial da torre de resfriamento na unidade de resina, foi realizada uma medição da temperatura de saída da água da torre de resfriamento, bem como verificação das especificações fornecidas pelo fabricante para verificar a disponibilidade do seu uso.

A análise de viabilidade do uso da torre foi feita levando-se em consideração o nível de utilização dos outros processos da planta de acordo com a capacidade máxima da torre, conforme especificação do fabricante e necessidades dos processos. Para tal, procedeu-se a medição da temperatura e da vazão disponível, na corrente L6. A simulação da hipótese foi aplicada nas correntes L7, corrente de retorno da torre para o chiller, e L8, corrente do chiller para o tanque diluidor, como mostra a figura 35.

**Figura 35** - Fluxograma do processo - Aproveitamento da torre



Fonte: AUTOR, 2016

#### 4.3.1.1.4 Aumento da área de troca térmica do tanque diluidor

Foi feito um levantamento da área de troca térmica atual e simulou-se o seu aumento com a instalação de uma serpentina interna, considerando a redução

do volume útil no tanque diluidor, tendo como restrição a manutenção da sua produtividade.

Adicionalmente foi consultada uma empresa especializada para verificar a viabilidade técnica.

#### 4.3.2 Análise da viabilidade econômica

Com base nos investimentos e nas medidas de melhorias necessários, realizou-se a avaliação econômica do projeto calculando o tempo de retorno simples de investimento – payback.

Foi realizada a avaliação econômica do processo com o objetivo de se obter o custo evitado levando-se em consideração a opção de fabricação da resina pela empresa e a compra de terceiros, conforme apresentado na tabela 10.

**Tabela 10** - Avaliação econômica do processo atual

<b>Etapas</b>	<b>Tempo (h)</b>	<b>Batelada (kg)</b>	<b>Custo produção (R\$/batelada)</b>	<b>Custo compra externa (R\$/batelada)</b>	<b>Custo evitado (R\$/batelada)</b>
---------------	------------------	----------------------	--------------------------------------	--	-------------------------------------

Fonte: AUTOR, 2016

O custo evitado serviu de base para a determinação dos ganhos de cada medida proposta retratadas na tabela 11, que apresenta os resultados consolidados das referidas medidas propostas.

**Tabela 11** - Avaliação econômica das medidas propostas

<b>Medida</b>	<b>Redução tempo de diluição (h)</b>	<b>Investimento (R\$)</b>	<b>Custo evitado (R\$ batelada/ano)</b>	<b>Payback simples (meses)</b>
---------------	--------------------------------------	---------------------------	---	--------------------------------

Fonte: AUTOR, 2016

## 5 RESULTADOS

### 5.1 ANÁLISE DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA RESINA

Com base nos acompanhamentos realizados foi preenchida uma tabela pelo supervisor, como mostra a figura 36.

**Figura 36 - Controle de acompanhamento**

Controle de acompanhamento		
Data	Horário	Assinatura supervisor
10/08/2016	07:30 - 14:18	
16/08/2016	07:30 - 14:18	
19/08/2016	07:30 - 14:18	
25/08/2016	09:00 - 12:00	
30/08/2016	09:00 - 11:00	
02/09/2016	07:30 - 14:18	
09/09/2016	08:00 - 14:00	
14/09/2016	07:30 - 14:18	
15/09/2016	07:30 - 14:18	
21/09/2016	09:00 - 15:00	
28/09/2016	07:30 - 14:18	
06/10/2016	07:30 - 14:18	
04/10/2016	07:45 - 02:50	
14/10/2016	08:00 - 14:18	
14/10/2016	09:00 - 14:18	
18/10/2016	07:30 - 14:18	
20/10/2016	07:30 - 14:18	
25/10/2016	09:00 - 11:00	
26/10/2016	07:45 - 02:50	

Fonte: AUTOR, 2016

#### 5.1.1 Acompanhamento da produção da resina em escala de bancada

Mediante a produção da resina poliéster insaturada em laboratório, seguindo os procedimentos padrões, obteve-se os dados apresentados na tabela 12.

**Tabela 12 - Etapas de formulação**

<b>Etapas</b>	<b>Condição</b>
1	Elevação da temperatura de 100°C para 150°C (Reação exotérmica)
2	Aplicação do vácuo: -0,8 bar
3	Resfriamento de 230°C para 180°C
4	Diluição controlada

Fonte: AUTOR, 2016

A característica exotérmica citada na tabela 12 foi provocada pela abertura do anel dos anidridos e pela formação do éster, como consequência houve o início da liberação de água como subproduto da reação. Nesta etapa foi importante controlar a temperatura do topo da coluna de destilação em 110°C, para evitar a perda de glicol.

A etapa 2 foi necessária porque devido o aumento da viscosidade dos reagentes tornou-se mais difícil a liberação de água, a qual deve estar sempre em equilíbrio com a formação do polímero. Mediante a esta dificuldade o vácuo foi aplicado, pois com a diminuição do ponto de ebulição da água, ocorre um aumento da carga de vapor de água para a coluna, facilitando a saída do subproduto.

Para transferir a massa de 4 kg de polímero para o tanque diluidor foi necessário um tempo padrão de 30 minutos, mantendo a agitação em 100 rpm. Conforme o polímero, que estava em aproximadamente 180°C, entrava em contato com o monômero de estireno, que estava em temperatura ambiente, ocorria o aumento da temperatura do diluidor. Nos períodos em que a temperatura ficava próxima dos 60°C ocorria a formação de pequenos cristais devido a polimerização do estireno. Mediante a isto foi necessário efetuar pausas na transferência para homogeneização e resfriamento do polímero.

### **5.1.2 Acompanhamento da produção da resina em escala industrial**

Como resultado do acompanhamento do processo obteve-se as condições operacionais do processo de diluição da resina em função do tempo de transferência e o comportamento da temperatura.

### 5.1.2.1 Tempo de processamento

A tabela 13 mostra a situação atual de transferência do polímero do reator para o tanque diluidor.

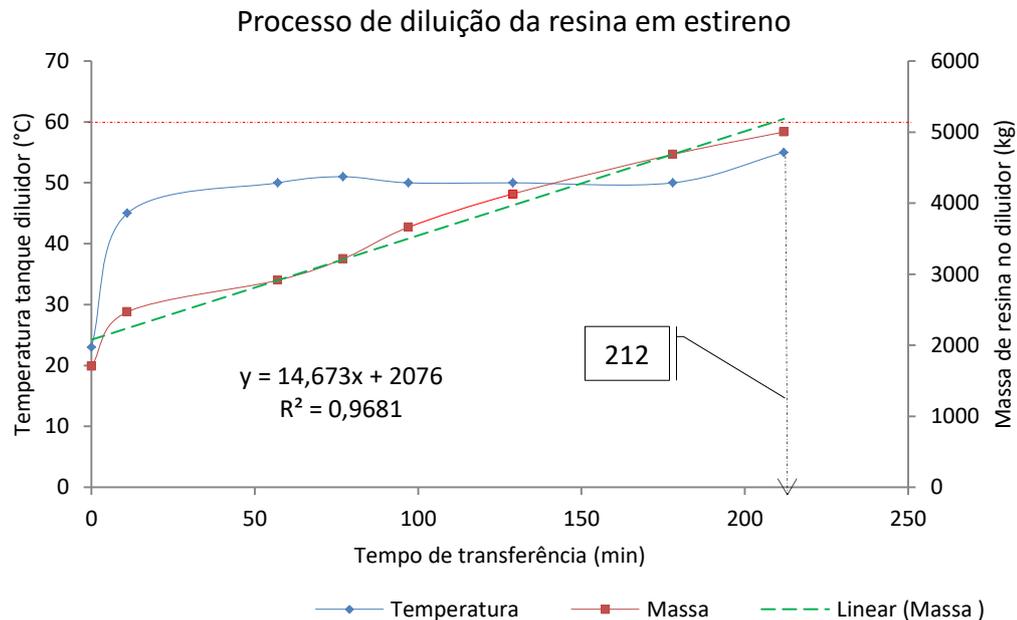
**Tabela 13** - Tempo padrão de diluição do processo atual

<b>Massa de resina no diluidor (kg)</b>	<b>Temperatura do diluidor (°C)</b>	<b>Tempo (min)</b>
1700	23	0
2469	45	11
	Parou a transferência por 37 minutos	
2914	50	57
	Parou a transferência por 8 minutos	
3215	51	77
	Parou a transferência por 11 minutos	
3659	50	97
	Parou a transferência por 25 minutos	
4130	50	129
	Parou a transferência por 38 minutos	
4585	50	178
	Parou a transferência por 12 minutos	
5002	55	212

Fonte: AUTOR, 2016

A transferência ocorreu respeitando a temperatura máxima de 60°C, para evitar a cristalização da resina e a polimerização do monômero de estireno. Foi possível transferir 769 kg de polímero antes que a temperatura do tanque diluidor atingisse 45°C, onde foi necessário pausar a transferência por 37 minutos. No retorno da transferência a temperatura atingiu 50°C, sendo necessária outra pausa para resfriamento. Neste ritmo, o processo de diluição teve duração de 3 horas e 32 minutos, dos quais aproximadamente 62% foram destinados à pausa para resfriamento da resina.

O gráfico da figura 37 ilustra o comportamento das curvas temperatura e da massa de resina transferida para o tanque diluidor, em função do tempo de execução da operação.

**Figura 37 – Processo de diluição da resina em estireno – Processo atual**

**Fonte:** AUTOR, 2016

Com os valores apresentados na tabela 13 elaborou-se o gráfico da figura 37. A massa total acumulada considerou a soma de 1700 kg de estireno com 3202 kg de resina. A taxa mássica média de resina adicionada ao tanque diluidor foi de 1415,66 kg/h.

O tempo total para transferência de 3302 kg de resina para o tanque diluidor foi de 3 horas e 32 minutos.

#### 5.1.2.2 Temperaturas de processo

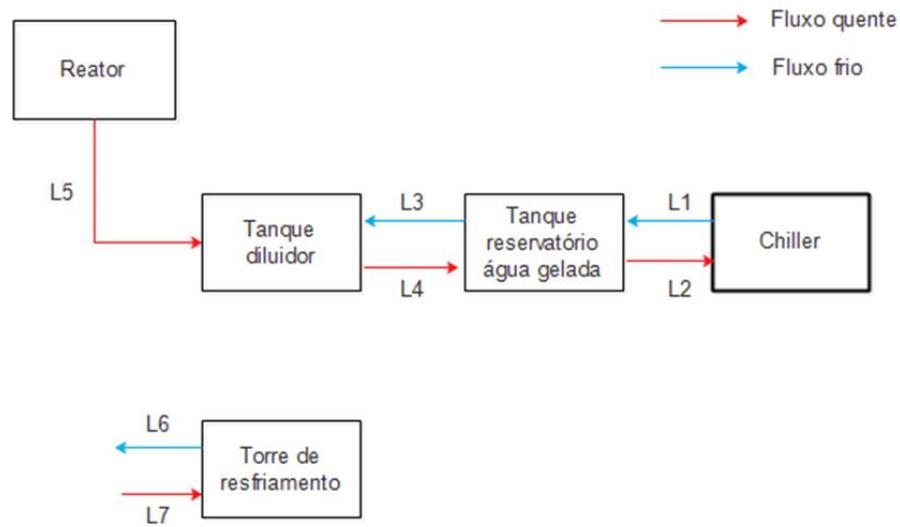
O acompanhamento das variações de temperatura resultou na tabela 14.

**Tabela 14 - Temperaturas das correntes do chiller – Processo atual**

<b>Tempo de processo (min)</b>	<b>Temperatura L1 (°C)</b>	<b>Temperatura L2 (°C)</b>
10	11,3	14,6
30	9,5	12,8
212	9,5	12,8

**Fonte:** AUTOR, 2016

A figura 38 mostra o fluxograma contemplando as correntes de entrada e saída do chiller (L1 e L2), onde foram feitas as medições de temperatura.

**Figura 38 - Fluxograma do processo**

Fonte: AUTOR, 2016

A tabela 15 correlaciona os dados de variação de temperatura de entrada e saída das correntes L1 e L2, cujo resultado para ambos foi de 3,3°C constante ao longo do processo, valor este em concordância com a especificação do fabricante, ou seja, numa condição onde a temperatura de saída da água do chiller é de 10°C e seu retorno de 14°C, com uma variação de temperatura de 4°C.

**Tabela 15 - Variações de temperatura – Processo atual**

Tempo de processo (min)	Variações de temperatura (°C)
10	3,3
30	3,3
212	3,3

Fonte: AUTOR, 2016

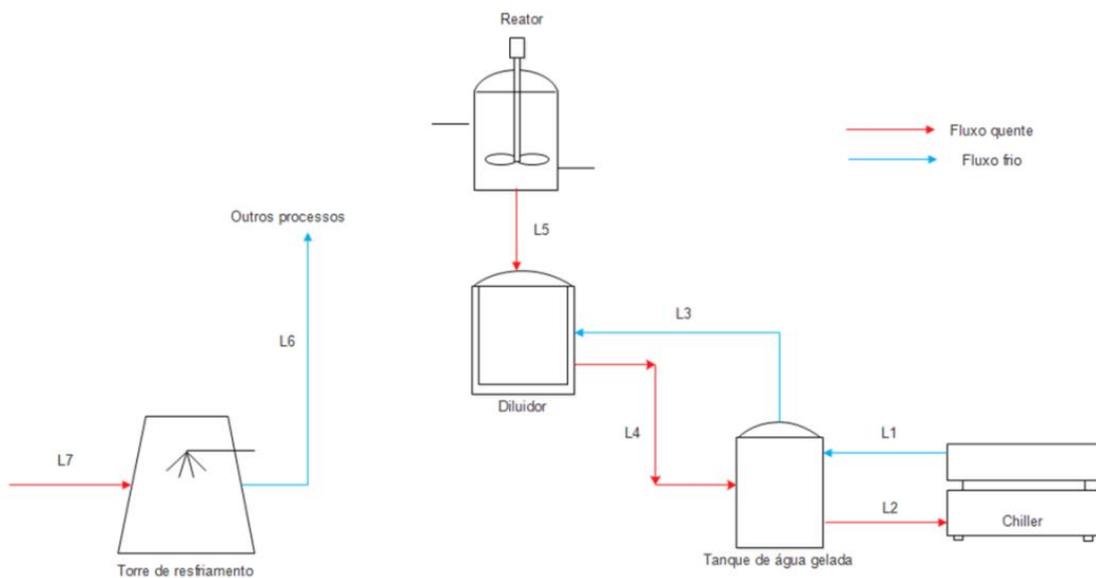
Destaca-se que neste período ocorreu a queima de uma das unidades de resfriamento do chiller, no entanto este fato não prejudicou o andamento dos trabalhos, uma vez que o padrão adotado foi o mesmo para a realização dos testes.

## 5.2 IDENTIFICAÇÃO DAS OPORTUNIDADES DE MELHORIAS

### 5.2.1 Fluxograma do processo

Elaborou-se o fluxograma do processo de produção da resina poliéster insaturada de acordo com o procedimento adotado atualmente, contemplando o sistema de resfriamento, objeto do estudo. A figura 39 mostra as principais correntes envolvidas no processo produtivo e a tabela 16 mostra os dados coletados.

**Figura 39 - Fluxograma do processo atual**



Fonte: AUTOR, 2016

**Tabela 16 - Dados das correntes do processo atual**

Correntes	Descrição	Vazão	Pressão	Temperatura
L1	Corrente de saída do chiller	45 m <sup>3</sup> /h	3 bar	11,3°C
L2	Corrente de retorno para o chiller	45 m <sup>3</sup> /h	3,5 bar	14,6°C
L3	Água enviada para o diluidor	45 m <sup>3</sup> /h	3,5 bar	13 – 15°C
L4	Água que retorna do diluidor	45 m <sup>3</sup> /h	3 bar	17 – 19°C
L5	Resina descarregada no diluidor	1,25 m <sup>3</sup> /h	-	180°C
L6	Corrente de água da torre	200 m <sup>3</sup> /h	5 bar	25°C – 30°C

Fonte: AUTOR, 2016.

## 5.2.2 Identificação das oportunidades de melhorias

Como resultado do diagrama de causa e efeito a tabela 17 mostra as oportunidades de melhorias que foram avaliadas para implantação.

**Tabela 17** - Análise das hipóteses

	Potenciais causas		Ações	Seleção
	Provável	Improvável		
Volume tanque reservatório	x		Teste industrial	Selecionada
Nível de agitação	x		Teste de bancada	Selecionada
Uso torre de resfriamento	x		Simulação	Recomendações
Aumento área de troca térmica	x		Consulta fabricante	Recomendações
Chiller subdimensionado		x	Consulta fabricante	Não selecionada

Fonte: AUTOR, 2016

A hipótese de subdimensionamento do chiller foi considerada improvável em função de que a capacidade especificada pelo fornecedor, que é de 208.000 kcal/h, atende uma produção de até 3400 kg/batelada, sendo que a mesma é mantida abaixo deste valor.

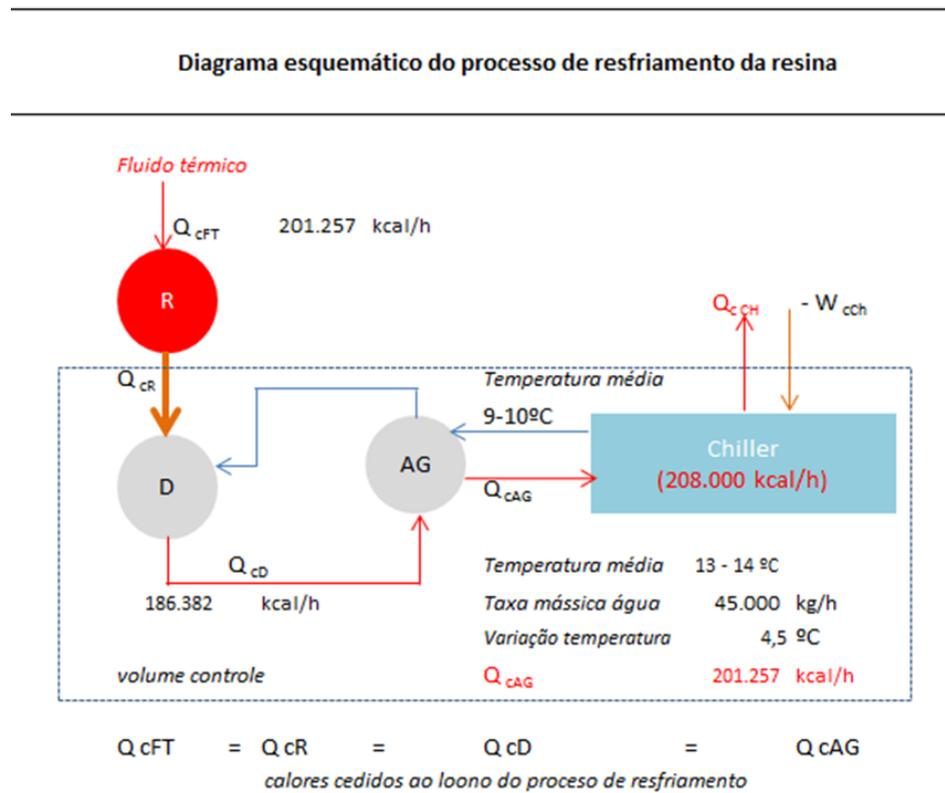
A figura 40 e a tabela 18 foram elaboradas para verificação da demanda necessária de calor do processo de produção. Neles pode-se observar que a necessidade de resfriamento ficou abaixo do especificado para o chiller.

**Tabela 18** - Demanda de energia de resfriamento do processo de fabricação da resina

Etapa	Massa (kg)	T (°C)	Q (kcal)	Chiller SAT 210 (kcal/h)
Reação	3452	180	186.382	208.000
Diluição	1700	25	14.875	

Fonte: AUTOR, 2016

**Figura 40** - Diagrama esquemático do processo de resfriamento da resina



Fonte: AUTOR, 2016

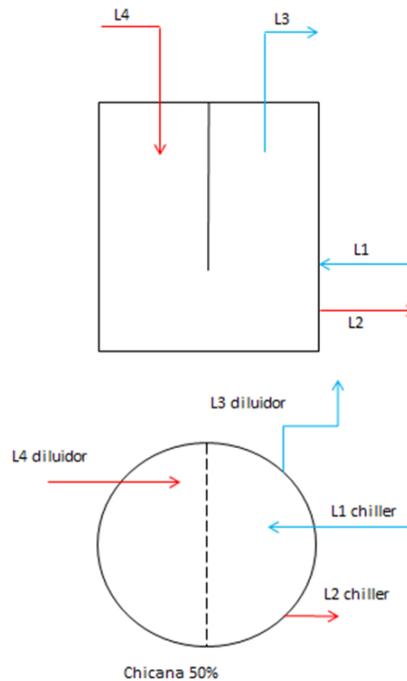
## 5.3 ANÁLISE DA VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DAS MELHORIAS

### 5.3.1 Ações de verificação e validação das hipóteses

#### 5.3.1.1 Análise da viabilidade técnica

##### 5.3.1.1.1 Volume do tanque reservatório influencia no desempenho do chiller

Para melhor visualização do teste realizado foi elaborado um desenho simplificado do tanque de armazenamento de água gelada, com suas correntes, como mostra a figura 41.

**Figura 41 - Tanque de armazenamento de água gelada**

Fonte: AUTOR, 2016

A simulação em escala industrial com redução em 50% do volume do tanque de armazenamento de água gelada apresentou uma redução no tempo de diluição da resina poliéster insaturada, fato este creditado a otimização da mistura de água quente, uma vez que a variação da quantidade de calor no volume de controle é constante.

De acordo com a tabela 19 ocorreu um menor tempo de pausa no processo de transferência, quando comparado com o processo atual, correspondendo a 36% do tempo total, enquanto que no processo atual são 62%, resultando num ganho de 26 pontos percentuais.

**Tabela 19 - Dados do processo com redução no volume de água**

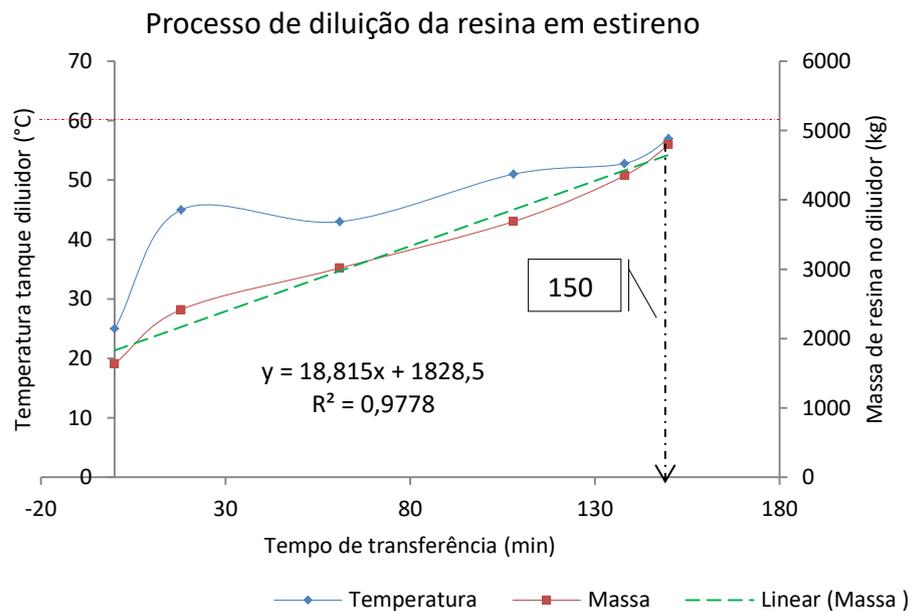
Massa de resina no diluidor (kg)	Temperatura do diluidor (°C)	Tempo (min)
1637	25	0
2418	45	18
	Parou a transferência por 31 minutos	
3018	43	61
	Parou a transferência por 23 minutos	
3689	51	108
4349	52,8	138
4797	57	150

Fonte: AUTOR, 2016

Ressalta-se que as paradas no processo de diluição da resina são em função da necessidade de se manter a temperatura da mistura abaixo de 60°C (restrição do processo).

O gráfico da figura 42 ilustra o comportamento das curvas temperatura e massa em função do tempo.

**Figura 42 -** Processo de diluição da resina em estireno – Teste industrial



**Fonte:** AUTOR, 2016

Com os valores apresentados na tabela 19 elaborou-se o gráfico da figura 42. A massa total acumulada considerou a soma de 1637 kg de estireno com 3160 kg de resina. A taxa mássica média de resina adicionada ao tanque diluidor foi de 1918,8 kg/h.

O tempo total para transferência de 3160 kg de resina para o tanque diluidor foi de 2 horas e 30 minutos, representando uma redução de aproximadamente 30% no tempo de produção, equivalente a 150 minutos, quando comparado com o tempo padrão de 212 minutos.

Durante o teste fez-se o registro das temperaturas do chiller. Os dados obtidos estão descritos na tabela 20.

**Tabela 20** - Temperaturas das correntes do chiller – Redução do volume de água

Tempo de processo (min)	Temperatura L1 (°C)		Temperatura L2 (°C)	
	Atual	Teste	Atual	Teste
10	11,3	12,5	14,6	15,8
30	9,5	-	12,8	-
40	-	9,8	-	13,1
212	9,5	7,0	12,8	10,3

Fonte: AUTOR, 2016

Com base no fluxograma do processo apresentado na figura 38 elaborou-se a tabela 20 onde foram comparados os dados obtidos no teste e no padrão operacional. Observou-se que o chiller alcançou temperaturas inferiores, mantendo o  $\Delta t$  em 3,3°C, enquanto que o especificado pelo fabricante era de 4°C, coerentemente com as equações do balanço de energia no volume de controle estabelecido.

#### 5.3.1.1.2 Agitação insuficiente no tanque diluidor

No teste de verificação do tempo necessário para mistura completa da mistura resina e estireno mostrou que um aumento na velocidade de agitação, de 45 rpm (atual) para 80 rpm, o tempo de mistura completa reduziu 25% e 50% para 100 rpm, como mostra a tabela 21.

**Tabela 21** - Avaliação da mistura

Tempo de agitação	45 rpm*	80 rpm	100 rpm
20 segundos	NM	NM	NM
50 segundos	NM	NM	NM
2 minutos	NM	NM	CM
3 minutos	NM	CM	-
4 minutos	CM	-	-

\* Padrão produção

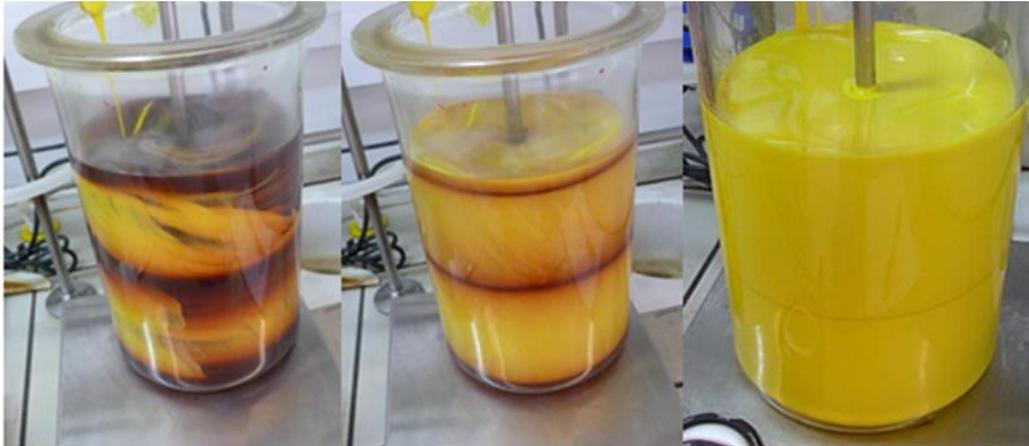
CM: completamente misturado

NM: não misturado

Fonte: AUTOR, 2016

A figura 43 ilustra o resultado visual do teste de agitação em 80 rpm. Pode-se observar a utilidade do corante universal, traçador, para identificação do estado de mistura completa.

**Figura 43 - Teste de agitação para 80 rpm**

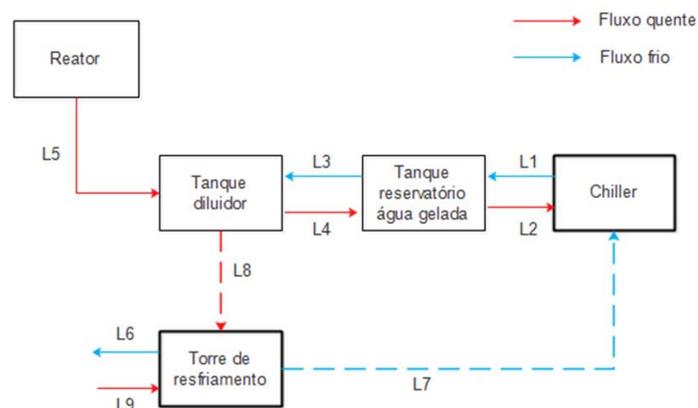


Fonte: AUTOR, 2016

### 5.3.1.1.3 Uso da torre de resfriamento pode contribuir no desempenho do chiller

O uso compartilhado da torre de resfriamento, desviando a corrente de água quente que sai do diluidor (L4) para a torre e desta para o tanque reservatório, alterando o circuito atual onde originalmente a corrente L4 alimentava o tanque reservatório de água gelada.

**Figura 44 - Aproveitamento da torre de resfriamento**



Fonte: AUTOR, 2016

A figura 44 mostra o desvio, onde se estima um rebaixamento de temperatura de até 2°C, representando uma redução de 90.000 kcal no sistema de resfriamento da unidade de resina, equivalente em aproximadamente 30% de redução da necessidade de trabalho do chiller.

Esta alternativa não foi selecionada devido à temporariedade do seu uso futuro, mas não descartada para casos emergenciais e neste caso, devido a sua importância, a mesma fará parte das recomendações futuras deste trabalho.

#### 5.3.1.1.4 Aumento da área de troca térmica do tanque diluidor

O aumento da área de troca térmica prevê a instalação de uma serpentina interna no interior do tanque diluidor. Com isso a tabela 22 apresenta as principais informações dimensionais previstas para o novo trocador.

Um cálculo estimativo obteve um ganho de potencial de até 67%, considerando que as condições dos principais coeficientes de troca térmica (coeficiente de película, coeficiente global) e fluidodinâmica (Reynolds, Prandtl e Nusselt, entre outros) permaneceram iguais para ambos os casos: serpentina externa e serpentina interna.

**Tabela 22-** Dimensionamento preliminar serpentina interna

<b>DIMENSÕES</b>	<b>Unidades</b>	<b>Serpentina externa – meia cana (atual)</b>	<b>Serpentina interna (proposta)</b>
Diâmetro diluidor	m	1,8	1,8
Diâmetro serpentina	m	0,09	0,09
Altura feixe de serpentina	m	2	1,7
Espaçamento entre serpentinas	m	0,05	0,05
Comprimento serpentina	m	102	79
Área de troca térmica	m <sup>2</sup>	9	6
Ganho área de troca	%	0	67

Fonte: AUTOR, 2016

O aumento de área interferiu no volume do tanque diluidor em 6,2% (0,5 m<sup>3</sup>), valor este que não inviabiliza a instalação, pois não altera a produtividade atual.

O valor do investimento previsto para a instalação é de R\$50.000,00, conforme orçamento obtido pela empresa Anjo Tintas junto à empresa especializada. A proposta apresenta uma redução de tempo estimada em 1 hora e 40 minutos, correspondente a 40% do tempo total de diluição atual. Trata-se de uma excelente opção. No entanto, em função da intervenção necessária na planta e do tempo requerido para avaliação dos resultados, a mesma não foi selecionada neste estudo, fazendo parte das recomendações futuras.

### 5.3.1.2 Análise da viabilidade econômica

#### 5.3.1.2.1 Redução do volume do tanque de armazenamento de água gelada

O payback para a implantação da redução do volume do tanque de armazenamento de água gelada está apresentado na tabela 23.

**Tabela 23** - Redução do volume do tanque de armazenamento de água gelada

<b>Medida</b>	<b>Redução tempo de diluição (h)</b>	<b>Investimento (R\$)</b>	<b>Custo evitado (R\$ batelada/ano)</b>	<b>Payback simples (meses)</b>
Redução de volume	1	-	243.360,00	-

Fonte: AUTOR, 2016

De acordo com a tabela 23 o tempo de retorno é igual a zero por não ser necessário a realização de um investimento.

A medida reduziu o tempo de produção, na etapa de diluição, em aproximadamente 1 hora, o que representa um ganho de aproximadamente 19 bateladas/ano, proporcionando uma redução de custo evitado de 5,8%, como mostra a tabela 24.

**Tabela 24** - Estimativa dos ganhos de produção

<b>Parâmetro</b>	<b>Atual</b>	<b>Proposto</b>	<b>Ganho potencial</b>
Produção (batelada/ano)	308,6	327,3	18,7
Custo evitado (R\$ batelada/ano)	4.177.680	4.421.040,00	243.360,00

Fonte: AUTOR, 2016

Realizou-se também um estudo para verificar os ganhos energéticos. O resultado está apresentado na tabela 25.

**Tabela 25 - Ganhos de energia elétrica**

<b>Equipamento</b>	<b>Capacidade (kW)</b>	<b>kW/batelada atual</b>	<b>R\$/batelada atual</b>	<b>kW/batelada reduzida</b>
Chiller	65,4	228,9	114,45	163,5
Bombas chiller	7,35	25,725	12,86	18,375
Bombas circulares	5	17,5	8,75	12,5

Fonte: AUTOR, 2016

Levando-se em consideração a redução de 1 hora no tempo de diluição, a implantação desta medida proporcionou um ganho de energia elétrica de R\$38,88 por batelada, representando 28,57% de redução.

#### 5.3.1.2.2 Aumento da velocidade de agitação do tanque diluidor

Foi realizado um estudo para o aumento do nível de agitação em 10%, apresentado na tabela 26. O resultado foi uma redução de 1,9% no custo evitado, bem como um ganho de bateladas/ano em 2,04%, representando aproximadamente 6 bateladas/ano.

**Tabela 26 - Aumento do nível de agitação no tanque diluidor**

<b>Medida</b>	<b>Redução tempo de diluição (h)</b>	<b>Investimento (R\$)</b>	<b>Custo evitado (R\$/batelada)</b>	<b>Payback simples (meses)</b>
Aumento da agitação em 10%	0,35	30.000,00	79.346,24	4,5

Fonte: AUTOR, 2016

## 6 CONCLUSÃO

Com base nos estudos e experimentos realizados, pode-se concluir que:

- Foram identificadas 5 potenciais oportunidades de melhorias, das quais 4 foram consideradas como prováveis, sendo que duas foram selecionadas, validadas e as demais estão apresentadas nas recomendações deste estudo
- A hipótese de que o tanque reservatório de água gelada com volume de 8000L pode ter o seu efeito de mistura das correntes de água quente e fria melhorado em até 30% foi comprovada quando seu volume foi reduzido para 4000L no teste industrial realizado, que apresentou como resultado uma redução de 1 hora, correspondente a 30%, no tempo de diluição da resina no estireno.
- A hipótese de redução do volume do tanque de armazenamento de água gelada não exigiu investimento. A medida proporcionou um ganho de aproximadamente 19 bateladas/ano, estimado em R\$ 243.360,00 representando uma redução de custo evitado de 5,8%, bem como um ganho com energia elétrica de R\$38,88 por batelada.
- A hipótese da influência da velocidade de agitação do tanque diluidor apresentou um tempo de retorno, payback simples de investimento de 4,5 meses, com um potencial de ganho de aproximadamente 6 bateladas/ano.
- Um aumento significativo da produção implicará numa sobrecarga do chiller, que somente será corrigida mediante um aumento da sua capacidade com aquisição de uma nova unidade. Fato este observado pelo balanço de energia que apresenta uma quantidade de calor cedido inferior à capacidade do chiller, que é de 201.257 kcal/h.

## 7 RECOMENDAÇÕES

Sugere-se para trabalhos futuros:

- Análise do uso compartilhado da torre de resfriamento existente no processo atual da empresa, pois um resfriamento adicional da corrente de água quente L4 deve reduzir a sobrecarga do chiller e;
- Aumento da área de troca térmica através da instalação de um trocador de calor, tipo serpentina no interior do tanque diluidor, aumentando a eficiência do resfriamento e conseqüentemente proporcionará um aumento da taxa mássica de diluição da resina poliéster insaturada com estireno no tanque diluidor.

## REFERÊNCIAS

- BADINO JÚNIOR, Alberto Colli; CRUZ, Antônio José Gonçalves. **Fundamentos de balanços de massa e energia**: um texto básico para análise de processos químicos. São Paulo: EdUFSCar, 2010. 236 p.
- BEGA, Egídio Alberto *et al.* **Instrumentação industrial**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2006. 583 p.
- BLACKADDER, D.A.; NEDDERMAN, R.M. **Manual de operações unitárias**: destilação de sistemas binários, extração de solvente, absorção de gases, sistemas de múltiplos componentes, trocadores de calor. São Paulo: Hemus Ed., 2004. vi, 276p.
- BRASIL, Nilo Indio do. **Introdução à engenharia química**. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. 369p.
- CALLISTER JÚNIOR, William D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 705 p.
- CANEVAROLO JÚNIOR, Sebastião V. **Ciência dos polímeros**: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2. ed. rev. e ampl São Paulo: Artliber, 2006. 280 p.
- COULSON, J.M.; RICHARDSON, J.F. **Tecnologia química - Fluxo de fluidos, transferência de calor e transferência de massa**. 4 ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2004. 896 p.
- DOSSAT, Roy J. **Princípios de refrigeração**: teoria, prática, exemplos, problemas, soluções. São Paulo: Hemus, 2004. 884 p.
- FÁBREGA, Prof. Dr. Francine de Mendonça. **Apostila: Cálculo de reatores I**. Jundiaí, 2012. 112 p.
- FAZENDA, Jorge M. R. **Tintas e vernizes**: ciência e tecnologia. 3. ed. rev. e ampl São Paulo: ABRAFATI, 2005. 1044 p.
- FERNANDES, Fabiano A. N.; LONA, Liliane M. F. **Introdução à modelagem de sistemas de polimerização**. São Carlos, SP: Booklink, 2004. 140 p.
- FOGLER, H. Scott. **Elementos de engenharia das reações químicas**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 853p.
- FOUST, Alan S.; CLUMP, Curtis W. **Princípios das operações unitárias**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982, 670 p.
- FRIED, Joel R. **Polymer science and technology**. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1995. 509 p.
- GITMAN, Lawrence J. **Princípios de administração financeira**. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2010. 745 p.

HILL JUNIOR, Charles G. **An introduction to chemical engineering kinetics & reactor design**. Canada: John Wiley & Sons, Inc, 1977. 594 p.

KASKA, J.; LESEK, F. **Processes and equipment for alkyd and unsaturated polyester resin manufacture**. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/003306559180016C>>. Acesso em: 10 set 2016.

KIRK, Raymond; OTHMER, Donald. **Encyclopedia of Chemical Technology**. 4 ed, vol 19. New York: Wiley - Interscience, 1996. 1141 p.

LOPES, Marco Aurélio. **Projeto e simulação de resfriadores de líquidos**. Disponível em: < [http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3150/tde-12092007-150005/publico/Dissertacao\\_final\\_rev6.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3150/tde-12092007-150005/publico/Dissertacao_final_rev6.pdf)>. Acesso em 20 ago. 2016.

LUYBEN, William L. **Temperature control of autorefrigerated reactors**. USA: Journal of process control, 1998. 12 p.

MANO, Eloisa Biasotto; MENDES, Luís Cláudio. **Introdução a polímeros**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1999. 208 p.

MANSKE, Kyle A. **Performance optimization of industrial refrigeration systems**. University of Wisconsin-Madison, 1999. 154 p.

MARTINS, Nelson. **Manual de medição de vazão: através de placas de orifício, bocais e venturis**. Rio de Janeiro: Interciência, 1998. 297 p.

MELLO, Vinicius M.; SUAREZ, Paulo A. Z. **As formulações de tintas expressivas através da história**. Brasília: Revista Virtual de Química, 2012. 12 p.

ODIAN, George. **Principles of polymerization**. 4.ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004. 812 p.

POILLUCCI, Richard A.; HANSEN, Christopher J. **Reducing use of styrene monomer in unsaturated polyester resins**. University of Massachusetts Lowell, 2013. 18 p.

REFRISAT. **Unidade de água gelada**. Disponível em <<http://refrisat.com.br/products/portfolio-completo/unidade-de-agua-gelada/>>. Acesso em 30 set 2016.

RIBEIRO, Marco Antônio. **Instrumentação**. 5 ed. Salvador: Tek Treinamento & Consultoria Ltda, 1997. 340 p.

RIBEIRO, Marco Antônio. **Instrumentação**. 9 ed. Salvador: Tek Treinamento & Consultoria Ltda, 2002. 360 p.

SELEME, Robson; STADLER, Humberto. **Controle da qualidade: as ferramentas essenciais**. 2 ed. Curitiba: Ibpex, 2010. 181 p.

SILVA, Josué Graciliano da. **Introdução à tecnologia da refrigeração e da climatização**. 2 ed. São Paulo: Artliber, 2003. 263 p.

SILVA, José Pereira da. **Análise financeira das empresas**. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2010. 522 p.

STOECKER, W. F.; JONES, J. W; Tradução JABARDO, José M Saiz. **Refrigeração e ar condicionado**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985. 481 p.

STOECKER, W. F.; JABARDO, J. M. Saiz. **Refrigeração industrial**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002. 371 p.

TOWLER, Gavin; SINNOTT, Ray. **Chemical engineering design: principles, practice and economics of plant and process design**. Amsterdam: Elsevier, 2008. 1245 p.

YAMANAKA, Hélio Tadashi *et al.* **Guia técnico ambiental tintas e vernizes: série P+L**. São Paulo: CETESB, FIESP, 2006. 70 p.

ZUCHINALI, Filipe Freitas. **Processo produtivo para resina poliéster insaturada**. Treinamento proferido na empresa Anjo Tintas. Criciúma, 13 set. 2016.

WEISMANTEL, G.E. **Paint handbook**. McGraw-Hill Professi, 1981. 752 p.