EDUARDO HIROSHI OIKAWA

**AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA INDUSTRIAL DE RESFRIAMENTO DE
ÁGUA**

São Paulo

2012

EDUARDO HIROSHI OIKAWA

**AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA INDUSTRIAL DE RESFRIAMENTO DE
ÁGUA**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título
de Mestre em Engenharia**

**Área de Concentração:
Engenharia Química**

**Orientador:
Prof. Dr. José Luís de Paiva**

**São Paulo
2012**

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 14 de maio de 2012.

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Oikawa, Eduardo Hiroshi

Avaliação de sistema industrial de resfriamento de água /
E.H. Oikawa. -- ed.rev. -- São Paulo, 2012.
101 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1. Torres de resfriamento 2. Transferência de calor 3. Mode-
los matemáticos I. Universidade de São Paulo. Escola Politécni-
ca. Departamento de Engenharia Química II. t.

Dedico este trabalho:

ao meu filho Pedro Koji e a minha esposa Selma Satie

AGRADECIMENTOS

Aos professores José Luis de Paiva e Tah Wun Song pela orientação dedicação e permanente incentivo.

A todos que diretamente ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho com sugestões e apoio. Em especial à Fernanda Martins da Invensys Systems Brasil Ltda e aos colegas Carlos Roberto Porfírio, Claudio Neves Borges e José Carlos da Silva.

“Não há problema que não possa ser solucionado pela paciência”

- Chico Xavier

“As maiores das idéias fundamentais da ciência são essencialmente simples, e pode, em regra, ser expresso em uma linguagem compreensível a todos”

- Albert Einstein

RESUMO

Neste trabalho, foi estudado o desempenho de um sistema constituído de torres de resfriamento e a sua integração em uma planta industrial de hidrogenação de butadieno. Caracterizou-se o desempenho das torres de resfriamento com base em um modelo fenomenológico, cujos parâmetros foram obtidos a partir da medição de variáveis operacionais reais. O processo de hidrogenação foi configurado em um simulador de processos, sendo o caso base estabelecido nas condições de projeto. Elaborou-se um módulo específico referente às torres de resfriamento, que foi integrado ao processo configurado no simulador. Em seguida, analisaram-se as interações das condições operacionais da torre de resfriamento no desempenho do processo industrial.

Palavras-chave: Torre de resfriamento de água. Análise de processo. Integração de processo. Transferência de calor e massa.

ABSTRACT

In the present work, the performance of a system composed of a cooling tower integrated in butadiene hydrogenation plant was studied. An experimental investigation was made to characterize the cooling towers based on a phenomenological model and in real process conditions.

The hydrogenation process was configured on a process simulator and design specifications were considered as base case. A cooling tower module was developed and integrated to the process simulator. The interaction of the cooling tower system and the plant operation was investigated.

Keywords: cooling water system, cooling tower. Process analysis. Mathematical modeling. Heat and mass transfer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Torre contra corrente (Pannkoke, 1996).....	8
Figura 3.2 - Torre contra corrente (Marley, 2008).....	8
Figura 3.3 - Torre corrente cruzada (Pannkoke, 1996).....	9
Figura 3.4 - Torre corrente cruzada (Marley, 2008).....	10
Figura 3.5 - Diagrama mostrando as transferências de calor em uma gota de água.(Casetta, 2003).....	10
Figura 3.6 - Esquema do processo de transferência de calor e massa nas proximidades da interface ar-água.....	11
Figura 3.7 - Esquema da torre de resfriamento	13
Figura 3.8 - Figura representativa da relação entre PHSB e Planta de Alquilação	16
Figura 4.1 - Torre de resfriamento - Alpina Equipamentos	21
Figura 4.2 - Local onde foi realizado o levantamento das condições ambientais – Refinaria Presidente Bernardes de Cubatão, Petróleo Brasileiro SA	22
Figura 4.3 - Fluxograma da Planta de Hidrogenação Seletiva de Butadieno	25
Figura 4.4 - Representação esquemática da integração torre de resfriamento e a PHSB	33
Figura 4.5 – Configuração da Planta de Hidrogenação Seletiva de Butadieno	43
Figura 5.1 - Dados operacionais: ensaio realizado no dia 22/03/2010	49
Figura 5.2 - Dados operacionais: ensaio realizado no dia 06/08/2010	49
Figura 5.3 - Dados operacionais: ensaio realizado no dia 16/08/2010	50
Figura 5.4 - Dados operacionais: ensaio realizado no dia 10/09/2010	50
Figura 5.5 - Variação da condição ambiental ao longo do dia para 2 dias Diferentes.....	52
Figura 5.6 - Entalpia de saturação do ar em função da temperatura do ar para pressão de 760 mmHg	53
Figura 5.7 - Plotando $(K_{Ga})_{\text{experimental}} \times (K_{Ga})_{\text{calculado}}$	56
Figura 5.8 - Configuração da Planta de Hidrogenação Seletiva de Butadieno	58
Figura 5.9 - Influência da vazão de ar na carga térmica. $T_{bu} = 13$ e 27°C e $L = 275 \text{ m}^3/\text{h}$	61
Figura 5.10 - Influência da vazão de ar no range. $T_{bu} = 13$ e 27°C e	

L = 275 m ³ /h.....	61
Figura 5.11 - Influência da vazão de ar na temperatura da água fria. Tbu = 13 e 27 °C e L = 275 m ³ /h.....	62
Figura 5.12 - Influência da vazão de ar na % vaporizada no tambor de topo da T-3. Tbu = 13 e 27 °C e L = 275 m ³ /h.	62
Figura 5.13 - Influência da vazão de água na carga térmica. Tbu = 13 e 27 °C e G = 105,7 m ³ /s.	63
Figura 5.14 - Influência da vazão de água no range. Tbu = 13 e 27 °C e G = 105,7 m ³ /s.	64
Figura 5.15 - Influência da vazão de água na temperatura da água fria. Tbu = 13 e 27 °C e G = 105,7 m ³ /s	65
Figura 5.16 - Influência da vazão de água na % vaporizada no tambor de topo da T-3. Tbu = 13 e 27 °C e G = 105,7 m ³ /s.	65
Figura 5.17 - Influência do Tbu na carga térmica. L = 275 m ³ /h e G = 105,7 m ³ /s	66
Figura 5.18 - Influência do Tbu no range. L = 275 m ³ /h e G = 105,7 m ³ /s.....	67
Figura 5.19 - Influência do Tbu nas água quente e fria. L = 275 m ³ /h e G = 105,7 m ³ /s.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. Relação dos principais equipamentos: Planta de Hidrogenação Seletiva de Butadieno	26
Tabela 4.2. Trocadores de calor que operam com água de resfriamento: vazões de água e carga térmica	27
Tabela 4.3. Carga Olefínica	28
Tabela 4.4. Matéria prima rica em hidrogênio	29
Tabela 4.5: Principais características dos equipamentos da planta de PHSB, configurados no simulador	37
Tabela 4.6: Parâmetros e variáveis do módulo da torre de resfriamento	39
Tabela 4.7: Restrições para a torre T-3	41
Tabela 4.8: Parâmetros e variáveis do módulo da torre de resfriamento – Cenário 1a	44
Tabela 4.9: Parâmetros e variáveis do módulo da torre de resfriamento – Cenário 1b	45
Tabela 4.10: Parâmetros e variáveis do módulo da torre de resfriamento – Cenário 2a	45
Tabela 4.11: Parâmetros e variáveis do módulo da torre de resfriamento – Cenário 2b	46
Tabela 4.12: Parâmetros e variáveis do módulo da torre de resfriamento – Cenário 3	46
Tabela 5.1. Condições operacionais e ambientais para obtenção do coeficiente de transporte de massa K_{Ga}	48
Tabela 5.2. Vazões média de água por célula	51
Tabela 5.3. Parâmetros da equação 4.3	53

Tabela 5.4. Valores de K_G obtidos para a Torre TR-3	55
Tabela 5.5. Dados e variáveis calculadas	59

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Área específica de transferência de calor e massa	$[\text{m}^2/\text{m}^3]$
a_2	Parâmetro da equação (4.3)	$[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})]$
a_3	Parâmetro da equação (4.3)	$[\text{kJ}/(\text{kg})]$
B	Parâmetro da equação (4.5)	$[-]$
b_1	Parâmetro da equação (4.1)	$[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})]$
b_2	Parâmetro da equação (4.1)	$[\text{kJ}/(\text{kg})]$
C	Parâmetro da equação (4.5)	$[\text{C}]$
$C(i)$	Parâmetros definidos na tabela 4.6	
D	Parâmetro definido pela equação (4.10)	$[-]$
E	Percentual de água evaporada	
F_T	Fator de correção de diferença de temperatura em trocador de calor	
G'	Fluxo mássico de ar (base seca)	$[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$
G	Vazão mássica de ar (base úmida)	$[\text{kg}/\text{s}]$
G'_M	Fluxo molar de ar (base seca)	$[\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$
H_a	Entalpia específica da água	$[\text{kJ}/\text{kg}]$
H_{ar}	Entalpia específica do ar	$[\text{kJ}/\text{kg}]$
H^*_{ar}	Entalpia específica do ar saturado	$[\text{kJ}/\text{kg}]$
K_G	Coeficiente global de transferência de massa em fase gasosa	$[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$
L	Vazão volumétrica de água	$[\text{m}^3/\text{h}]$
L'	Fluxo mássico de água	$[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$
M_a	Massa molar da água	$[\text{kg}/\text{mol}]$
M_v	Massa molar do ar	$[\text{kg}/\text{mol}]$
$P(1)$	Parâmetro definido na tabela 4.6	
Q	Vazão volumétrica de ar	$[\text{m}^3/\text{s}]$
Q_i	Carga térmica do trocador de calor i	$[\text{W}]$

Q_T	Carga térmica total	[W]
$Q_{\text{célula}}$	Carga térmica de uma célula	[W]
Q_{TR}	Carga térmica da torre de resfriamento	[W]
$R(1)$	Variável retorno do módulo de calculo do PROII	
T	Temperatura	[°C]
T_{ar}	Temperatura do ar	[°C]
T_a	Temperatura da água	[°C]
T_{a1}	Temperatura da água de entrada na torre de resfriamento	[°C]
T_{a2}	Temperatura da água de saída da torre de resfriamento	[°C]
$t_{e,i}$	Temperatura da água que entra no trocador i	[°C]
$t_{s,i}$	Temperatura da água que sai do trocador i	[°C]
T_{bu}	Temperatura de bulbo úmido do ar ambiente	[°C]
T_{ar}	Temperatura do ar	[°C]
U_i	Coeficiente global de transferência de calor do trocador i	[W/m ² . °C]
U_D	Coeficiente global de transferência de calor	[W/m ² . °C]
w	Vazão de água	[m ³ /s]
w_i	Vazão mássica de água de resfriamento do trocador i	[kg/s]
W_{ar}	Umidade absoluta do ar	[kg de água/kg ar seco]
z	Altura genérica do recheio	[m]
Z_T	Altura total do recheio	[m]

SÍMBOLOS GREGOS

α	Parâmetro da equação (5.1)
β	Parâmetro da equação (5.1)
γ	Parâmetro da equação (5.1)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Torre de resfriamento: conceitos	5
3.2. Transferência de calor e massa	10
3.3. Balanço de massa e energia	12
3.4. Planta de hidrogenação seletiva de butadieno	15
3.5. Sistemas integrados torre de resfriamento e processo	17
4. MATERIAIS E MÉTODOS	20
4.1. Descrição da instalação industrial	20
4.1.1. Torres de resfriamento	20
4.1.2. Planta de Processo de Hidrogenação Seletiva de Butadieno	23
4.1.2.1. Principais Operações e Equipamentos	26
4.1.2.2. Características e Propriedades das Principais Correntes	28
4.2. Caracterização Experimental da Torre de Resfriamento	29
4.3. Integração da Torre de Resfriamento e Processo	33
4.3.1. Equacionamento auxiliar	34

4.4. Configuração do sistema integrado no simulador de processos	35
4.4.1. Trocadores de calor com água de resfriamento	36
4.4.2. Levantamento de dados	36
4.4.3. Características dos equipamentos da planta	37
4.4.4. Torre de resfriamento	38
4.4.5. Sequencia de cálculo	40
4.4.6. Restrições e condições recomendadas	40
4.4.7. Simulação – testes preliminares	41
4.4.8. Casos simulados	43
4.4.8.1. Cenário 1 – Influência da vazão de ar	44
4.4.8.2. Cenário 2 – Influência da vazão de água.....	45
4.4.8.3. Cenário 3 – Influência da temperatura de bulbo úmido	46
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1. Dados experimentais da caracterização da torre de resfriamento	47
5.2. Determinação do $K_G \cdot a$ da torre de resfriamento	52
5.3. Simulação de condição real de operação da planta e torre	57
5.4. Estudos de Casos	60
5.4.1. Influência da vazão de ar	60
5.4.2. Influência da vazão de água	63
5.4.3. Influência da T_{bu}	66
6. CONCLUSÕES	68
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

8. ANEXOS	74
Anexo A – Terminologias e definições	75
Anexo B – Listagem. Um caso do modelo em PROII	77

1. INTRODUÇÃO

Processos que utilizam água de resfriamento advindo de uma torre de resfriamento sofrem interferência direta das variações das condições ambientais. A estabilidade da temperatura da água de resfriamento dá ganho em termos de processo, pois proporciona condições estáveis de processo, e, portanto, qualidade do produto.

Os dados de operação de uma torre de resfriamento são normalmente obtidos em catálogos de fabricantes. Assim, mesmo que se encontrem trabalhos sobre torres de resfriamento na literatura, há uma carência de estudos sobre validação de variáveis de operação e avaliações de desempenho a partir de dados experimentais (Cortinovis et al., 2009a).

Na etapa de projeto de uma planta industrial, a torre de resfriamento é geralmente especificada em função da carga térmica demandada pelo processo e do approach, diferença entre a temperatura de água fria e a temperatura de bulbo úmido do ar alimentado à torre. Durante a operação de plantas industriais, as mudanças nas condições operacionais são, muitas vezes, focadas essencialmente no processo, em detrimento da área de utilidades, onde se insere a torre de resfriamento.

No caso de plantas industriais, a integração da torre de resfriamento implica numa interação significativa com as variáveis de processo envolvidas. Torna-se, portanto, fundamental uma análise integrada e sistêmica do processo.

No caso do presente estudo, o processo que está integrado à torre de resfriamento é o da Planta de Hidrogenação Seletiva de Butadieno, cuja operação demanda água de resfriamento.

O sistema a ser estudado pode ser considerado como composto de 3 partes, a saber:

- torre de resfriamento (apoio ao sistema):

- processo de alquilação (envolvido indiretamente);
- processo de hidrogenação seletiva de butadieno.

Este trabalho dá continuidade aos estudos desenvolvidos por Cortinovis (2004), Mello (2008) e Lima Jr (2011), na área de torres de resfriamento, no Laboratório de Separações Térmicas e Mecânicas da Departamento de Engenharia Química da USP.

2. OBJETIVOS

Como objetivo geral, propõe-se analisar as interações existentes em um sistema integrado industrial composto de torre de resfriamento e processo de Hidrogenação Seletiva de Butadieno, frente variações na condição ambiental e perturbações nas condições operacionais do processo.

A primeira etapa consiste na caracterização do desempenho real da torre a partir da determinação do coeficiente global de transferência de calor e massa para as diferentes condições operacionais desta.

A etapa subsequente consiste na configuração da Planta de Hidrogenação Seletiva de Butadieno em simulador de processos, de forma a prever o desempenho deste processo em função de condições operacionais inerentes à torre de resfriamento.

A integração do processo de hidrogenação e da torre de resfriamento será analisada por meio do simulador de processos, considerando-se as influências das condições ambientais e das vazões de água e de ar na torre.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo a definição do Cooling Tower Institute (2007), torre de resfriamento é o equipamento que promove a transferência de calor e massa de uma corrente de água para o ar atmosférico, causando resfriamento da água. Este processo de transferência é denominado resfriamento evaporativo, pois proporciona o resfriamento de uma corrente de água através da evaporação de uma pequena parte desta para uma corrente de ar.

Há uma carência de estudos sobre validação de variáveis de operação e avaliações de desempenho a partir de dados experimentais, principalmente para processos em escala industrial.

As variáveis usualmente definidas na especificação de uma torre são: carga térmica a ser removida, vazão de circulação da água, diferença de temperaturas da água na entrada e saída da torre ("range") e diferença entre a temperatura da água que sai da torre e a temperatura de bulbo úmido do ar ("approach"). Para especificar os valores destas variáveis, são consideradas as condições médias e usuais de operação.

Entretanto, dois aspectos raramente são estudados de forma criteriosa: interações do sistema de resfriamento com o processo e a operação da torre com demandas térmicas diferentes das de projeto.

Ortega et al. (2010) ressaltam que muitas das pesquisas em sistemas de torre de resfriamento foram direcionadas para o estudo da rede de água de resfriamento e da otimização de conjunto de trocadores de calor, mas de forma não integrada ao desempenho da torre.

Em trabalhos mais recentes, tem-se observado estudos com dois enfoques principais: a análise sistêmica da integração de uma ou mais torres de resfriamento com o processo que demanda esta carga e a modelagem mais

rigorosa dos mecanismos de transferência de calor e de massa no interior da torre.

O enfoque sistêmico visa o estudo da integração do sistema de água de resfriamento com o processo, considerando-se as diferentes operações e a interação entre as variáveis de processo envolvidas. Alguns dos trabalhos nesta linha de pesquisa foram realizados por Castro et al. (2000); Kim, Smith (2001); Cortinovis et al. (2009a); Cortinovis et al. (2009b) e Ortega et al. (2010). Quanto à modelagem mais rigorosa dos mecanismos de transferência de calor e massa no interior das torres destacam-se os trabalhos de Fisenko et. al. (2004); Kloppers, Kröger (2005a); Kloppers, Kröger (2005b) e Mello et al. (2009).

3.1. TORRE DE RESFRIAMENTO: CONCEITOS

Indústrias necessitam, em diferentes operações, de processos de resfriamento por transferência de calor. Estes processos são realizados em trocadores de calor e, dependendo da temperatura de operação, utiliza-se água de resfriamento como fluido frio, que, por sua vez, é resfriada em um circuito fechado. A água fria é bombeada de volta à unidade de processo, para os equipamentos que necessitarem de refrigeração.

Na torre de resfriamento - o equipamento destinado a promover o resfriamento da água mediante o contato com o ar - a transferência de calor se processa de duas formas: a transferência por contato, sem transporte de massa, e a transferência por evaporação, com transporte de massa. Esta última ocorre através de evaporação de parte da água circulante, passando-a para o ar sob forma de vapor de água. Neste fenômeno, tem-se o resfriamento evaporativo da água, causando diminuição da sua temperatura.

Devido às perdas de água por evaporação, arraste e respingos, deve-se fazer uma reposição no sistema, a fim de manter-se um volume constante de água em circulação.

Uma torre de resfriamento pode ter circulação de ar natural, forçada ou induzida. As mais usadas são as de tiragem induzida por apresentarem melhor rendimento e distribuição mais uniforme do ar circulante.

Nas torres de resfriamento de circulação natural, o ar passa através da torre sem o auxílio de nenhum equipamento mecânico, enquanto que nas torres de circulação forçada, são colocados ventiladores nos lados da torre, na parte inferior. Desta forma, o ar é forçado a sair pela parte superior da torre, sendo que o ar entra pelas laterais da mesma e é succionado pelo exaustor, podendo passar em contra corrente ou corrente cruzada com a água.

Para promover o contato da água com o ar, as torres industriais dispõem de dispositivos de contato, geralmente, recheios constituídos por materiais plásticos com formatos triangulares ou retangulares. A função deste é interromper a queda livre das gotas de água, provocando a formação de novos respingos, aumentando-se, assim, o tempo de contato ar/água e a área de contato entre eles, com conseqüente diminuição da altura necessária para a torre.

A água de resfriamento que circula pelos equipamentos de processo e pela torre de resfriamento deve sofrer um tratamento ou condicionamento com produtos químicos, de forma a minimizar:

- corrosão nas partes metálicas;
- proliferação de microorganismo;

Para tal, utilizam-se produtos químicos à base de fostato para controle da corrosão nas partes metálicas do sistema; cloro gás e hipoclorito de sódio para o controle de microorganismos.

Condições ambientais

As condições do ar ambiente são determinantes no desempenho da torre de resfriamento, porém as mesmas não podem ser controladas. Obviamente, a confiabilidade do sistema de resfriamento está atrelada ao conhecimento destas condições ambientais.

A temperatura de bulbo úmido é um fator importante no desempenho operacional de uma torre de resfriamento, bem como no seu dimensionamento e seleção. As variáveis que efetivamente caracterizam a condição ambiental, no caso de torres de resfriamento, são a temperatura de bulbo úmido do ar e a sua pressão, sendo que, em geral, esta pouco varia para uma dada localidade.

A seleção do valor da temperatura de bulbo úmido para o projeto não é simples, pois esta variável é função das condições ambientais locais que variam durante o dia, à noite e durante as estações do ano. Entretanto, sua escolha é feita com base nas medidas das máximas temperaturas de bulbo úmido durante os meses de verão, porém este critério pode ser revisto quando a unidade industrial dispõe de torres e ventiladores “sobressalentes” (*stand by*) (DIONISI, 2003).

Configurações de escoamento

As duas principais configurações de escoamento da corrente de ar e de água no interior de uma torre são definidas por (figuras 3.1 a 3.4):

- Escoamento contracorrente
- Escoamento cruzado

No caso de contracorrente (figuras 3.1 e 3.2), o ventilador cria movimento de ar vertical ascendente, através do enchimento, em sentido oposto ao da água. As venezianas para entrada do ar são colocadas em torno da caixa e na parte inferior. Os sistemas de alimentação e distribuição de água estão localizados entre o recheio e o sistema de eliminação de gotas.

A principal vantagem em relação à corrente cruzada é a de que a água fria entra em contato com o ar mais seco e a água mais quente entra em contato com o ar úmido, sendo obtida alta eficiência em termos de resfriamento de água.

Figura 3.1 – Torre contracorrente (Pannkoke, 1996).

Figura 3.2 – Torre contracorrente (Marley, 2008).

Destacam-se as seguintes características operacionais para o sistema contracorrente:

- maior resistência ao escoamento do ar devido ao fluxo de água e, conseqüentemente, maior perda de carga, requerendo-se maior potência do motor do ventilador em relação à torre de corrente cruzada;
- o sistema de distribuição de água nem sempre é acessível.

No caso do escoamento cruzado, o ventilador cria um fluxo de ar preferencialmente na direção horizontal, enquanto a água cai através da corrente de ar. O sistema de veneziana é disposto ao lado do enchimento e em toda sua altura (figuras 3.3 e 3.4). O distribuidor em forma de piscina está localizado na parte superior e externa. A água cai por gravidade.

Algumas características operacionais importantes da configuração de corrente cruzada são:

- facilidade de acesso ao sistema de alimentação e distribuição de água;
- o recheio praticamente ocupa toda a altura da torre;
- baixa perda de carga do lado do ar.

Figura 3.3 – Torre corrente cruzada (Pannkoke, 1996).

Figura 3.4 – Torre corrente cruzada (Marley, 2008)

3.2. TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA

Para entender o abaixamento da temperatura da água de resfriamento é necessário considerar os fenômenos de transferência de calor e massa que ocorrem no interior e na superfície de uma gota de água e no ar. Considere uma gota de água em queda em contato com ar em escoamento ascendente (figura 3.5).

Figura 3.5 – Diagrama mostrando as transferências de calor em uma gota de água (Casetta, 2003).

A força motriz para o transporte de vapor d'água é expressa pela diferença entre a pressão de vapor da água na superfície da gota e a pressão parcial do vapor da água no seio do ar. Isto provoca a transferência de vapor de água para o ar. Como esta transferência é adiabática, há um resfriamento da água devido à evaporação e a temperatura da superfície tende a atingir uma condição de regime permanente, denominada temperatura de bulbo úmido. Simultaneamente ao processo acima descrito, tem-se o processo de transferência de calor entre o ar e a água, devido à diferença de temperaturas, o que também contribui para o fluxo total de calor.

Apresenta-se na Figura 3.6 um esquema simplificado, baseado em McCabe et al. (2005), no qual são esboçados os perfis de concentração de vapor d'água e de temperaturas nas proximidades de interface ar-água e os fluxos de massa e calor.

Figura 3.6 - Esquema do processo de transferência de calor e massa nas proximidades da interface ar-água.

Resumidamente, pode-se considerar que o processo de transferência de calor envolve:

- transferência de calor latente devida à vaporização de uma pequena porção de água;
- transferência de calor sensível devida à diferença de temperaturas entre a água e o ar.

Desta transferência de calor, aproximadamente 80% são devidos ao calor latente e 20% são devidos ao calor sensível (Perry e Green, 1997).

O calor que se pode teoricamente remover do ar circulante em uma torre de resfriamento depende da temperatura e do grau de umidade do ar. Uma indicação do teor de umidade do ar é sua temperatura de bulbo úmido. Idealmente, a temperatura de bulbo úmido é a menor temperatura a que se pode resfriar a água. Na prática, a temperatura de água fria somente se aproxima, mas não atinge, a temperatura de bulbo úmido em uma torre de resfriamento.

O grau de aproximação (approach) é a diferença entre a temperatura da água fria e a temperatura de bulbo úmido e depende do projeto da torre. São fatores importantes para o desempenho da torre, o tempo de contato e a taxa de transferência de calor e massa entre o ar e a água; esta, por sua vez, é função das características (forma e dimensões) do recheio e da formação de gotículas.

3.3. BALANÇO DE MASSA E ENERGIA

Apresenta-se, neste item, o equacionamento dos balanços de massa e energia aplicados à torre de resfriamento, particularmente das fases gás e líquida, baseado no texto de McCabe et al. (2005) e nos trabalhos de Cortinovis (2004) e Mello (2008).

Será considerada uma torre de resfriamento com escoamento em contracorrente, conforme esquematizada na figura 3.7. Os escoamentos da água e do ar serão admitidos como uniformemente distribuídos ao longo do recheio interno da torre.

Os balanços de massa e energia são apresentados para um volume de controle diferencial de altura dz .

Figura 3.7 – Esquema da torre de resfriamento

O balanço de energia envolvendo as duas fases (ar-água) para um elemento de altura dz é expresso por:

$$G' \cdot dH_{ar} = L' \cdot c_L \cdot dT_a \quad (3.1)$$

O balanço de energia para a fase gás pode ser equacionado em termos do fluxo de transporte de massa, sendo a “força motriz” expressa em termos da diferença de entalpia entre o ar, no seio da fase de gás, e o ar saturado na interface ar/água de (Burger, 1994):

$$G' \cdot dH_{ar} = K_G \cdot a \cdot (H_{ar}^* - H_{ar}) \cdot dz \quad (3.2)$$

sendo: H_{ar}^* a entalpia específica de saturação do ar e $K_G \cdot a$ o coeficiente global volumétrico de transferência de calor e massa, que geralmente é expresso em função dos fluxos de água e ar.

Integrando-se a equação acima e considerando-se K_G constante, tem-se:

$$Z_T = \frac{G'}{K_G \cdot a} \cdot \int_{H_{ar1}}^{H_{ar2}} \frac{dH_{ar}}{(H_{ar}^* - H_{ar})} \quad (3.3)$$

Substituindo-se a equação (3.2) na (3.1), resulta:

$$K_G \cdot a \cdot (H_{ar}^* - H_{ar}) \cdot dz = L' \cdot c_L \cdot dT_a \quad (3.4)$$

Analogamente à equação (3.3), obtém-se:

$$Z_T = \frac{1}{K_G \cdot a} \int_{T_{a1}}^{T_{a2}} \frac{L' \cdot c_L}{(H_{ar}^* - H_{ar})} dT_a \quad (3.5)$$

Das equações (3.3) e (3.5), tem-se:

$$Z_T = \frac{G'}{K_G \cdot a} \cdot \int_{H_{ar1}}^{H_{ar2}} \frac{dH_{ar}}{(H_{ar}^* - H_{ar})} = \int_{T_{a1}}^{T_{a2}} \frac{L' \cdot c_L}{K_G \cdot a \cdot (H_{ar}^* - H_{ar})} dT_a \quad (3.6)$$

Considerando-se as vazões de ar e água constantes e integrando-se a equação (3.1), resulta a conhecida curva de operação que relaciona a entalpia específica do ar com a temperatura da água ao longo da altura da coluna:

$$H_{ar} = \left[\frac{L' \cdot c_L \cdot (T_a - T_{a2})}{G'} \right] + H_{ar1} \quad (3.7)$$

Rearranjando-se a equação (3.7), tem-se:

$$H_{ar} = \left(\frac{L' \cdot c_L}{G'} \right) \cdot T_a + \left(H_{ar1} - \frac{L' \cdot c_L}{G'} \cdot T_{a2} \right) \quad (3.8)$$

3.4. PLANTA DE HIDROGENAÇÃO SELETIVA DE BUTADIENO (PHSB)

As principais etapas de uma unidade PHSB são descritas neste item, segundo Ogino (2003).

Hidrocarbonetos de cadeia aberta propiciam elevação da octanagem de um combustível e conseqüentemente agregando valor a este.

Um processo industrial existente na indústria de petróleo para aumentar o teor de hidrocarbonetos de cadeia aberta tendo como origem cadeias de duplas ligações é a alquilação, que é a reação de olefinas (alcenos) em meio ácido.

O produto desta reação é denominado de alcoilado. O alcoilado é uma corrente rica em componentes de hidrocarbonetos contendo de 7 a 9 carbonos.

Um meio ácido para reação de alquilação em escala industrial é propiciado pelo ácido fluorídrico (HF).

Determinados produtos contidos na matéria prima para o processo trazem efeitos danosos ao sistema de alquilação em escala industrial, dentre os quais destacam-se:

- água;
- butadieno-1,3.

A presença da água dilui o ácido fluorídrico e conseqüentemente aumenta a corrosividade do sistema. O butadieno-1,3 reage com o ácido fluorídrico, em uma reação secundária, consumindo o ácido fluorídrico e formando um subproduto denominado ASO (Acid Soluble Oil), ou seja, Óleo solúvel em Ácido, originado das reações incompletas devido à redução do butadieno e minimiza-se, dessa forma, a formação de fluoretos orgânicos.

Para redução do teor de água, são instalados vasos com alumina para adsorção desta. Para a redução do teor de butadieno-1,3 há um sistema denominado Planta de Hidrogenação Seletiva de Butadieno (PHSB).

O objetivo principal da PHSB é minimizar o teor do contaminante butadieno-1,3 na carga e convertê-lo em butenos, que são os componentes desejados para o processo de alquilação (figura 3.8).

Figura 3.8 - Figura representativa da relação entre PHSB e Planta de Alquilação

O Processo de Hidrogenação constitui-se num método geral de conversão de ligações duplas Carbono-Carbono em ligações simples Carbono-Carbono em quase todos os tipos de compostos.

Hidrogenar seletivamente pode ser: converter uma ligação dupla, mas não a outra, na mesma molécula.

Na Reação de Hidrogenação, o catalisador acelera a adição de hidrogênio (H_2) à dupla ligação.

Na Hidrogenação Seletiva Heterogênea, a reação de butadieno e hidrogênio se dá em meio catalítico. Neste processo de hidrogenação do butadieno o elemento ativo do catalisador é o paládio. O seu teor é cerca de 0,3 a 0,7% em peso, altamente disperso em um material de suporte com elevada porosidade e área superficial. No caso da alquilação, o catalisador é HF e a reação se dá em meio líquido

O paládio catalisa preferencialmente a hidrogenação de diolefinas (ex: butadieno) e isomerização de buteno 1 a buteno 2 sem hidrogenar as olefinas (butenos).

Agita-se uma solução de alceno sob leve pressão de hidrogênio em pequena porção de catalisador. A reação dar-se-á rapidamente e suavemente; concluída, o catalisador, insolúvel, é separado da solução do produto da reação por simples filtração.

a) Conversão de butadieno a butenos

Associadas à reação básica, existem as seguintes situações, que são consideradas como uma seqüência de ocorrência das reações:

b) Isomerização de buteno-1 a buteno-2

c) Conversão de butadieno a butano.

3.5. SISTEMAS INTEGRADOS TORRE DE RESFRIAMENTO E PROCESSO

Como já observado, constata-se que há grande interesse nos estudos de projetos, avaliação na conservação de energia, porém pouca pesquisa relacionada à análise integrada do processo e torre de resfriamento. Na seqüência, apresenta-se a uma breve revisão de alguns destes trabalhos.

No trabalho de Castro et al. (2000), foi desenvolvido um modelo de otimização, considerando as interações térmicas e hidráulicas associadas à operação de uma torre e um conjunto de trocadores de calor. O objetivo do estudo de otimização foi a minimização dos custos operacionais associados às potências de bombeamento e do ventilador da torre e consumo de água.

Kim, Smith (2001) desenvolveram um modelo de otimização para o projeto econômico de sistemas de resfriamento, no qual aborda o problema da mistura inapropriada de correntes de água quente a diferentes temperaturas antes do envio ao sistema de resfriamento. O estudo mostra um caso de “desengargalamento” de processo, no qual obteve-se a minimização do consumo de energia e de consumo de água.

Cortinovis (2004) e Cortinovis et al. (2009b) desenvolveram um modelo integrado para minimização dos custos operacionais de um sistema de resfriamento de água e rede de trocadores de calor, em escala piloto. Realizaram-se ensaios experimentais nesta planta para diferentes condições operacionais: vazões de água e ar e temperatura de água quente. Em seguida, realizou-se o estudo de alguns casos de operação ótima. Constatou-se que, para atender perturbações na demanda térmica de processo, os recursos operacionais mais importantes dentre os estudados foram, nessa ordem, o aumento da vazão da água de recirculação, o aumento da vazão do ar e finalmente a remoção provocada da parte da água de retorno à torre com a respectiva reposição.

Na sequência do trabalho desenvolvido por Cortinovis (2004), Mello (2008) desenvolveu estudo para determinação do desempenho de torre de resfriamento na mesma planta piloto considerada no trabalho de Cortinovis (2004). Com base em um modelo fenomenológico e a partir de dados experimentais obtidos, foi desenvolvida uma correlação para o coeficiente global de transferência de calor e massa em função das principais variáveis de processo: fluxos mássicos do gás e da água pela torre, e temperatura de entrada da água. Os resultados apresentaram boa consistência, comparados com os da literatura. Desta forma, a metodologia desenvolvida pode, com relativa facilidade, ser aplicada para torres de resfriamento industriais, pois se

baseia em medidas de variáveis, factíveis em termos operacionais em uma planta real. Paralelamente, estudou-se o comportamento de uma torre de resfriamento de água operando com temperatura da água de alimentação superior a 50°C. Constatou-se que o coeficiente de transporte de massa na torre de resfriamento aparentemente não é afetado, em tais condições.

Ortega et al. (2010) estudaram o projeto otimizado de um sistema de resfriamento de água a partir da aplicação de modelo de otimização de Programação não linear mista inteira (MINLP). Considerou-se o sistema composto dos três componentes principais: rede de água de resfriamento, projeto mecânico da torre de resfriamento e arranjo dos trocadores de calor. Consideraram-se, também, todas as opções de “by-pass”, separação e junção de correntes de água quente provenientes do processo. O modelo fenomenológico da torre foi baseado no método de Merkel. O objetivo do estudo foi a busca da minimização dos custos operacionais de bombeamento, potência de ventilador e consumo de água, assim como, do custo de investimento da torre. Foram considerados três estudos de casos para aplicação do modelo proposto.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A seleção da planta de PHSB para o presente estudo foi em função de algumas características singulares, a saber:

- o sistema requer uma demanda de água de resfriamento em diferentes trocadores de calor;
- o sistema em estudo possui uma torre de resfriamento exclusiva, TR-3.

4.1. DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO INDUSTRIAL

4.1.1. TORRES DE RESFRIAMENTO

A torre de resfriamento em estudo TR-3 é composta de 2 células idênticas que utilizam uma bacia coletora de água única (figura 4.1), cujo fabricante é a empresa Alpina Equipamentos.

O recheio é do tipo barras de respingo auto-laváveis em PVC-AE (autoextinguíveis), com secção transversal quadrada (6m x 6m) e altura de 2,605 m.

A torre opera em contracorrente com tiragem induzida a partir de ventiladores localizados na parte superior. Cada ventilador tem potência nominal de 50 hp e rotação fixa de 1750 RPM.

A vazão de ar de projeto é de 105,7 m³/s por célula na pressão atmosférica e temperatura de 30,4 °C.

A vazão de água de projeto do conjunto é de 750 m³/h e igualmente dividida pelas duas células.

Figura 4.1 - Torre de resfriamento estudada (Alpina, 2010)

Considerou-se essencial para este estudo o levantamento das condições ambientais da região onde está instalada a torre de resfriamento, ao longo do ano.

Para a avaliação da influência das condições ambientais, optou-se por avaliar o sistema em condições bem diferentes, até mesmo extremas, tais como:

- ar ambiente a altas temperaturas e umidades;
- ar ambiente a baixas temperaturas e umidades.

A condição ambiental foi determinada a partir da medida da pressão local e das temperaturas de bulbo seco e úmido do ar ambiente. Estas foram medidas com psicrômetro, composto de 2 termômetros de mercúrio sendo um envolvido em um chumaço úmido. Estima-se que o erro experimental na medida de temperatura é de 0,5 °C [Cortinovis (2004)].

As medidas das temperaturas de bulbo seco e úmido foram efetuadas com intervalo médio de 1 hora, devido à pequena variação das condições ambientais observadas ao longo de períodos desta ordem. A partir destes

dados foram calculadas a umidade do ar e a sua entalpia específica em região próxima à torre (fig 4.2).

As medições de temperaturas da água fria e quente foram realizadas com termopares de cromel-alumel e a medição de vazão de água através de placa de orifício instalada na linha de alimentação de água. Estes dados são sistematicamente medidos e registrados por sistema de aquisição de dados com frequência de amostragem de 30 segundos.

Figura 4.2 – Local onde foi realizado o levantamento das condições ambientais – Refinaria Presidente Bernardes de Cubatão – Petróleo Brasileiro SA.

4.1.2. PLANTA DE PROCESSO DE HIDROGENAÇÃO SELETIVA DE BUTADIENO

A Planta de Hidrogenação Seletiva de Butadieno consiste basicamente de:

- sistema de remoção de água livre;
- sistema de pré aquecimento;
- reator;
- torre “stripper” de componentes leves.

Na figura 4.3, está mostrado o fluxograma da Planta de Hidrogenação Seletiva de Butadieno.

Apresenta-se , a seguir, uma descrição sucinta do processo baseada em Ogino (2003).

A carga olefínica é bombeada para o sistema de secagem em leito fixo - vaso V-41. A corrente seca é misturada com uma corrente rica em hidrogênio, passando pelos pré-aquecedores TC-43 e TC-46 e seguindo para o reator R-2.

A vazão de gás alimentada ao reator é controlada de modo a manter uma relação molar de 1,4 a 1,6 entre o Hidrogênio do gás para o Butadieno-1,3 da corrente de carga. A quantidade de Hidrogênio deve ser limitada, pois um excesso torna o processo não seletivo, promovendo a hidrogenação excessiva de Butenos a Butanos. Durante o processo normal de operação da planta, essa carga olefínica já previamente isenta de umidade irá para o reator R-2, onde ocorrerão as reações de hidrogenação, misturada a ela haverá uma corrente de gás rico em hidrogênio.

A mistura de líquido e gás atravessa o leito do reator de hidrogenação, R-2, no sentido descendente, sofrendo um ligeiro aumento de temperatura, em virtude do caráter exotérmico das reações de hidrogenação e isomerização.

Devido à baixa pressão no reator, a maior parte do hidrogênio encontra-se na fase gasosa, e o líquido (butanos) adsorvido na superfície do catalisador.

Após a passagem pelo reator, essa mistura será carga de uma torre “stripper” de leves, T-11, em cujo topo serão removidos os gases mais leves a serem adicionados à corrente de gás combustível da unidade.

Pelo fundo da T-11 sai uma corrente de olefinas praticamente isenta de butadieno que servirá como carga olefínica no processo de alquilação.

A corrente de butanos tratada pela Planta de Hidrogenação Seletiva de Butadieno oriunda do fundo da torre retificadora de leves T-11 é resfriada nos trocadores TC-46, TC-41 e TC-42, e é bombeada pela B-39 A/B, sendo é enviada para a torre T-3. Os vapores do topo da torre são condensados nos trocadores TC-48 A/B, e enviados para o tambor de topo V-50. O produto deste vaso, rico em isobutano, é bombeado pela B-46 A/B como refluxo de topo e pela B-45 A/B como isobutano para processo. Esta corrente é encaminhada para a entrada dos secadores V-11 A/B localizada na planta de processo de alquilação para remoção de água.

A energia necessária para o fracionamento na torre T3 é fornecida pelos refeedores TC-49 e TC-50. No permutador TC-49, o fluido quente é a corrente de isobutano de reciclo em fase vapor oriunda da fracionadora principal T-5. O reciclo condensado retorna para a planta de alquilação, Esta configuração tem a finalidade de recuperar a energia contida na corrente de reciclo e minimizar o consumo energético,

No TC-50, o fluido de aquecimento é o vapor saturado de baixa pressão (3,5 bar relativo).

O produto de fundo, constituído de mistura de butanos e butenos, é resfriado pelos permutadores TC-51 A/B e enviado para esferas para armazenagem pela linha de saída de butanos da PHSB.

4.1.2.1. Principais Operações e Equipamentos

Na tabela, 4.1 consta a relação dos principais equipamentos que compõem a Planta de Hidrogenação Seletiva de Butadieno.

Tabela 4.1 - Relação dos principais equipamentos: Planta de Hidrogenação Seletiva de Butadieno.

EQUIPAMENTOS DO SISTEMA DE CARGA
TC-40: Resfriador dos efluentes da regeneração e/ou redução do catalisador
TC-43: Segundo aquecedor de carga do R-2
TC-46: Pré-aquecedor de carga do R-2
V-47: Vaso separador e acumulador de líquido (knout out) do gás rico em hidrogênio
EQUIPAMENTOS DO SISTEMA DE SEPARAÇÃO DE BUTANOS/ISOBUTANOS
T-3 e T-4: Torre separadora de butanos
B-4: Bombas de isobutano do T-4 para o Processo
B-5: Bombas de refluxo e retirada de isobutano para armazenagem
B-11: Bombas de fundo da T-4, envio de butanos para armazenagem
B-25: Bombas de isobutano da armazenagem
B-39: Bombas de carga olefínica proveniente do T-11 (PHSB)
B-30: Bombas de carga saturada da armazenagem
B-45: Bombas de isobutano do TT-3 para o Processo
B-46: Bombas de refluxo e retirada de isobutano para as P-4203 A/B ou ARSUL
B-47: Bombas de fundo da T-3, envio de butanos para armazenagem
TC-5 A/B: Condensador e resfriador do produto de topo da T-4
TC-6 A/B: Resfriador do produto de fundo da T-4
TC-7: Refervedor principal da T-4
TC-8: Refervedor final da T-4
TC-48 A/B: Condensador e resfriador do produto de topo da T-3
TC-49: Refervedor principal da T-3
TC-50: Refervedor final da T-3
TC-51 A/B: Resfriador do produto de fundo da T-3
V-50: Vaso acumulador de topo da T-3
V-3: Vaso acumulador de topo da T-4

Tabela 4.1 (continuação) - Relação dos principais equipamentos: Planta de Hidrogenação Seletiva de Butadieno.

SECAGEM FINAL

V-11: Vasos secadores de carga para o processo

SISTEMA DE CARGA E DA DESTILAÇÃO T-11

T-11: Torre “stripper “ de leves

B-39: Bombas de carga olefínica tratada proveniente do T-11 (PHSB)

B-40: Bombas de refluxo da T-11 e de recirculação do V-42

TC-41: Primeiro resfriador do produto de fundo da T-11

TC-42: Segundo resfriador do produto de fundo da T-11

TC-44 A/B: Condensadores de topo da T-11

TC-45: Refervedor (reboiler) da T-11

TC-46: Pré-aquecedor de carga do R-2

V-41: Vasos secadores de carga olefínica

V-42: Vaso acumulador de topo da T-11

V-43: Vaso separador e acumulador de líquido (knock-out) da regeneração

Apresenta-se, na tabela 4.2, a relação de trocadores de calor da Planta de Hidrogenação Seletiva de Butadieno que operam com água de resfriamento, com as respectivas vazões operacionais de água de resfriamento e cargas térmicas, na condição de projeto.

Tabela 4.2 – Trocadores de calor que operam com água de resfriamento: vazões de água e carga térmica.

TROCADORES DE CALOR	DADOS DE PROJETO	
	CARGA TÉRMICA (kW)	VAZÃO ÁGUA RESFRIAMENTO (m ³ /h)
TC-41	654	77,1
TC-42	242	
TC-44A	1.265	87,7
TC-44B	1.265	
TC-48A	2.213	211,7
TC-48B	2.213	
TC-51A	80	20,0
TC-51B	80	
	8.014	396,5

4.1.2.2. Características e Propriedades das Principais Correntes

A seguir, estão listadas as composições base especificadas para configuração da Planta de Hidrogenação Seletiva de Butadieno. Na tabela 4.3, consta a carga olefínica e na tabela 4.4, a matéria prima rica em hidrogênio.

Tabela 4.3 – Carga Olefínica

COMPOSIÇÃO	% Molar
Propeno	0,47
Propano	1,17
Buteno-1	13,13
Isobuteno	19,72
Cis-Buteno 2	8,52
Trans-Buteno 2	13,33
Somatória de Butenos	54,70
Butadieno-1,3	1,01
Isobutano	27,89
Normal-Butano	12,96
Isopentano	0,71
Normal-Pentano	0,56
Superiores a C ₅	0,53
Pressão	15,6 bar g
Temperatura	40 °C

Tabela 4.4 - Matéria prima rica em hidrogênio

COMPOSIÇÃO	% Molar
Hidrogênio	73,16
Metano	9,25
Etano	8,23
Propeno	0,02
Propano	5,60
Isobuteno	0,01
Isobutano	1,31
Normal-Butano	1,18
Isopentano	0,44
Normal-Pentano	0,27
C ₆ + Pesados	0,51
Pressão	15,0 bar g
Temperatura	40 °C

4.2. CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DA TORRE DE RESFRIAMENTO

O modelo fenomenológico adotado para a torre em estudo é o expresso pela equação (3.3), apresentado na capítulo 3:

$$Z_T = \frac{G'}{K_G \cdot a} \cdot \int_{H_{ar1}}^{H_{ar2}} \frac{dH_{ar}}{(H_{ar}^* - H_{ar})} \quad (3.3)$$

Baseado na equação (3.8) e considerando-se o termo $\frac{L' \cdot c_L}{G'}$ constante pode-se expressar a entalpia específica do ar pela equação:

$$H_{ar} = b_1 \cdot T_a + b_2 \quad (4.1)$$

Diferenciando-se, tem-se:

$$dH_{ar} = b_1 \cdot dT_a \quad (4.2)$$

Por outro lado, a entalpia específica do ar saturado na interface ar/água, a uma dada pressão, pode ser aproximada por uma relação linear com a temperatura da água, equação (4.3), no caso de range inferior a 15 °C.

$$H^*_{ar} = a_2 \cdot T_a + a_3 \quad (4.3)$$

A diferença $(H^*_{ar} - H_{ar})$ pode ser expressa a partir das equações (4.1) e (4.3):

$$(H^*_{ar} - H_{ar}) = (a_2 - b_1) \cdot T_a + (a_3 - b_2) \quad (4.4)$$

Retomando-se o integrando da equação (3.3), tem-se:

$$\frac{dH_{ar}}{H^*_{ar} - H_{ar}} = \frac{b_1}{[(a_2 - b_1) \cdot T_a + (a_3 - b_2)]} dT = \frac{1}{(B \cdot T_a + C)} dT \quad (4.5)$$

sendo:

$$B = \frac{(a_2 - b_1)}{b_1} \text{ e } C = \frac{(a_3 - b_2)}{b_1}$$

Assim, tem-se:

$$\int_{H_{ar1}}^{H_{ar2}} \frac{dH_{ar}}{(H^*_{ar} - H_{ar})} = \int_{T_{a1}}^{T_{a2}} \frac{1}{(B \cdot T_a + C)} dT_a \quad (4.6)$$

Substituindo-se a equação (4.6) na equação (3.3) e isolando-se o $K_G a$, tem-se

$$K_G \cdot a = \frac{G'}{Z_T} \cdot \int_{T_{a1}}^{T_{a2}} \frac{1}{(B \cdot T_a + C)} dT_a \quad (4.7)$$

Integrando-se a equação (4.7), resulta:

$$K_G \cdot a = -\frac{G'}{Z_T} \frac{1}{B} \cdot \left\{ \ln \left| \frac{B \cdot T_{a2} + C}{B \cdot T_{a1} + C} \right| \right\} \quad (4.8)$$

Assim, o coeficiente global de transferência de calor e massa $K_G a$ pode ser determinado experimentalmente a partir da equação (4.7), sendo conhecidas as temperaturas da água fria, T_{a1} , e da água quente, T_{a2} , a entalpia específica do ar ambiente, $H_{ar,1}$, a altura do recheio, Z_T e o fluxo mássico de ar, G' .

De outra forma, pode-se, calcular a temperatura da água, a partir dos fluxos mássicos de água, L' , e de ar, G' , da entalpia específica do ar ambiente, $H_{ar,1}$, e da temperatura da água fria, T_{a1} e do coeficiente global de transferência de calor e massa $K_G a$.

Rearranjando-se a equação (4.8), tem-se:

$$\left| \frac{B \cdot T_{a2} + C}{B \cdot T_{a1} + C} \right| = e^{\left[\frac{B \cdot Z_T \cdot K_G \cdot a}{G'} \right]}$$

$$(B \cdot T_{a2} + C) = (B \cdot T_{a1} + C) \cdot e^{\left[\frac{B \cdot Z_T \cdot K_G \cdot a}{G'} \right]}$$

$$T_{a2} = \frac{(B \cdot T_{a1} + C)}{B} \cdot e^{\left[\frac{B \cdot Z_T \cdot K_G \cdot a}{G'} \right]} - \frac{C}{B} \quad (4.9)$$

sendo:

$$D = \frac{B \cdot Z_T \cdot K_G \cdot a}{G'} \quad (4.10)$$

Tem-se:

$$T_{a2} = \left(T_{a1} + \frac{C}{B} \right) \cdot e^{-D} - \frac{C}{B}$$

$$T_{a2} = T_{a1} \cdot e^{-D} + \frac{C}{B} \cdot (e^{-D} - 1) \quad (4.11)$$

Explicitando-se C, tem-se:

$$C = \frac{a_3 - b_2}{b_1} = \frac{a_3}{b_1} - \frac{b_2}{b_1} = \frac{a_3}{b_1} - \frac{(H_{ar} - b_1 \cdot T_{a1})}{b_1} \quad (4.12)$$

Substituindo-se (4.12) em (4.11), tem-se:

$$T_{a2} = T_{a1} \cdot e^{-D} + \frac{1}{B} \cdot \left(\frac{a_3}{b_1} - \left(\frac{H_{ar}}{b_1} - T_{a1} \right) \right) \cdot (e^{-D} - 1)$$

$$T_{a2} \cdot (B \cdot e^{-D} + 1) = (B \cdot T_{a1} \cdot e^{-D}) + \left(\frac{a_3}{b_1} - \frac{H_{ar}}{b_1} \right) \cdot (e^{-D} - 1)$$

Finalmente, obtém-se a expressão (4.13) para o cálculo da temperatura da água fria:

$$T_{a2} = \frac{\left((B \cdot T_{a1} \cdot e^{-D}) + \left(\frac{a_3}{b_1} - \frac{H_{ar}}{b_1} \right) \cdot (e^{-D} - 1) \right)}{B + 1 - e^{-D}} \quad (4.13)$$

4.3. INTEGRAÇÃO DA TORRE DE RESFRIAMENTO E PLANTA DE PROCESSO

Na figura 4.4, tem-se a representação esquemática da proposta de integração da torre de resfriamento com a planta PHSB, no simulador de processo.

Figura 4.4 - Representação esquemática da integração torre de resfriamento e PHSB.

O software utilizado na configuração do processo integrado é o PRO/II da Invensys Systems Brasil Ltda.

A interação entre os dois sistemas se dá através dos trocadores comuns, que estão identificados e listados a seguir:

TC-41	Resfriamento para armazenagem e alimentação da T-3
TC-42	Resfriamento para armazenagem e alimentação da T-3
TC-44A/B	Condensador, topo da torre de destilação T-3
TC-48A/B	Condensador, topo da torre de destilação T-11
TC-51A/B	Resfriamento para armazenagem

O parâmetro K_G -a foi inserido no modelo integrado da água de resfriamento/PHSB no PROII. A inserção se deu através da elaboração de uma rotina de cálculo (Calculator CA2).

4.3.1. EQUACIONAMENTO AUXILIAR

No caso do balanço de energia para o lado da água, as cargas térmicas dos trocadores de calor, Q_i , são expressas em função das temperaturas de entrada, $t_{e,i}$, e saída, $t_{s,i}$, e vazão, w_i , da água de resfriamento:

$$Q_i = w_i c_{Li} (t_{s,i} - t_{e,i}) \quad (4.14)$$

Esta carga térmica está relacionada ao processo de transferência de calor, expresso em termos do coeficiente global de transferência de calor U_i e o fator de correção da temperatura $F_{T,i}$, assim como a diferença logarítmica média $\Delta T_{LN,i}$ que envolve as temperaturas da corrente de processo.

$$Q_i = U_i A_i F_{T,i} \Delta T_{LN,i} \quad (4.15)$$

O coeficiente global U_i foi calculado a partir dos coeficientes individuais referentes ao lado do tubo e ao lado do casco, e, também dos fatores de incrustação de projeto. No caso do módulo de trocador de calor na presente simulação, os coeficientes individuais de transferência de calor são calculados a partir de correlações já implementadas no PROII.

Pode-se expressar a carga térmica da torre TR-3 a partir das suas temperaturas de entrada e saída:

$$Q_{TR} = w \cdot c_L \cdot (T_{a1} - T_{a2}) \quad (4.16)$$

Admitindo-se que não há variação da temperatura da água que deixa a torre e é alimentada aos trocadores, tem-se :

$$T_{a2} = t_e \quad (4.17)$$

A temperatura da água quente que retorna à torre é calculada a partir do balanço de energia dos nós das linhas dos retornos de água de resfriamento. As configurações de correntes de água do presente estudo apresentam certa complexidade, como por exemplo o uso de água de resfriamento proveniente de um trocador para um segundo trocador.

4.4. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA INTEGRADO NO SIMULADOR DE PROCESSOS

A planta de hidrogenação seletiva de butadieno foi configurada de acordo com as seguintes restrições/especificações:

- A alimentação da torre de destilação T-11 é o efluente de um reator onde o objetivo é minimizar o teor de Butadieno 1,3.
- A torre de destilação T-11 tem como objetivo remover o H₂ alimentado em excesso (em relação à carga estequiométrica). A T-11 tem como objetivo maximizar a remoção de H₂ pelo topo.
- A torre de destilação T-3 tem como objetivo remover o Isobutano pelo topo, maximizar a remoção de H₂ pelo topo desta torre.
- Os produtos a serem armazenados deverão ser enviados no máximo à 50 °C.
- A corrente de fundo da torre de destilação T-11 é alimentação das torres de destilação T-3 e T-4. A corrente para T-3 varia de 50 a 75% da corrente de fundo da T-11.

4.4.1. TROCADORES DE CALOR COM ÁGUA DE RESFRIAMENTO

Esta dissertação tem como proposta a análise das interações existentes entre sistemas de uma planta industrial compostos de torre de resfriamento e processo de Hidrogenação Seletiva de Butadieno frente a variações nas condições ambientais, vazões de água e ar.

Não se propõe o estudo da rede de distribuição de água de resfriamento e está sendo adotada como premissa que as vazões circulantes de água são subdivididas nas mesmas proporções que o caso de projeto;

Para fins de estudo, o sistema foi dividido em 2 circuitos, a saber:

- circuito de hidrocarboneto;
- circuito de água de resfriamento.

As interações entre os circuitos se dão nos trocadores de calor comuns por onde ocorrem as trocas térmicas. No sistema em estudo, isto ocorre nos seguintes trocadores de calor:

TC-44A e TC-44B condensador da torre de destilação T-11

TC-41 e TC-42 resfriamento da corrente de fundo da T-11

TC-48A e TC-48B condensador da torre de destilador T-3

TC-51A e TC-51B resfriamento da corrente de fundo da T-3 para

tanque

4.4.2. LEVANTAMENTO DE DADOS

Para a configuração da planta de PHSB e do circuito de água de resfriamento no simulador de processos, foram obtidos os seguintes tipos de informações:

- Dados de projeto de bombas, trocadores de calor e torres de destilação;
- Dados de processo envolvendo as condições operacionais;
- Dados acerca da configuração da malha com distribuição de água;

- Dados acerca da planta de hidrocarboneto.

4.4.3. CARACTERÍSTICAS DOS EQUIPAMENTOS DA PLANTA

Na Tabela 4.5 são apresentadas as principais características dos equipamentos da planta de PHSB configurados no simulador. Estão discriminados apenas os trocadores de calor que operam com água de resfriamento.

Tabela 4.5: Principais características dos equipamentos da planta de PHSB, configurados no simulador

Código	Equipamento	Características
T11	torre de destilação	Número de estágios = 20 Pressão topo = 13,5 bar g Perda de carga total nos estágios = 0,6 bar
P1	bomba	Pressão diferencial = 5 bar
SP1	spliter, divisor de corrente	$S8/S7=0,228$
SP2	spliter, divisor de corrente	$S5/S9=0,26$
SP3	spliter, divisor de corrente	$S20/S11=0,091$
SP4	spliter, divisor de corrente	$D1/S1=0,75$
TC-44A/B	trocadores de calor casco-tubo	Área = 94,1 m ² /casco $U_D^* = 640 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 2 trocadores em série
TC-42	trocadores de calor casco-tubo	Área = 49,0 m ² $U_D^* = 443 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
TC-41	trocadores de calor casco-tubo	Área = 91,2 m ² $U_D^* = 370 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
P2	bomba	Pressão diferencial = 1 bar
E2	Trocador de calor hidrocarboneto/hidrocarboneto	
T3	torre de destilação	Número de estágios = 66 Pressão topo = 4,7 bar g Perda de carga total nos estágios = 1,6 bar

TC-48A/B	trocador de calor casco-tubo	Área = 389,3 m ² /casco U _D [*] = 861 W/(m ² . °C) 2 trocadores em série
TC-51A/B	trocador de calor casco-tubo	Área = 6,0 m ² /casco U _D [*] = 835 W/(m ² . °C)
M1	misturador de correntes de retorno de água de resfriamento para TR-03	
M2	misturador de correntes de retorno de água de resfriamento para TR-03	
M3	misturador de correntes de retorno de água de resfriamento para TR-03	

*Valores correspondentes apenas ao caso base

Ressalta-se, que no caso dos divisores de corrente (SP), foi adotada a divisão de correntes baseado nas vazões de projeto. As vazões de água para os trocadores foram proporcionais às vazões de circulação. As denominações S e D acompanhadas de um número foram adotadas para denominar as correntes quando da configuração no PROII.

4.4.4. Torre de resfriamento

O simulador de processos utilizado não dispõe de um módulo específico para torre de resfriamento. Desenvolveu-se, assim, um módulo com base no modelo apresentado no item 4.2.

O modelo da torre de resfriamento foi inserido como um módulo de operação unitária no PROII. Nesse módulo, a temperatura da água fria (T_{a2}) é calculada a partir da expressão (4.13):

$$T_{a2} = \frac{\left((B \cdot T_{a1} \cdot e^{-D}) + \left(\frac{a_3}{b_1} - \frac{H_{ar}}{b_1} \right) \cdot (e^{-D} - 1) \right)}{B + 1 - e^{-D}} \quad (4.13)$$

Por outro lado, o desempenho da torre de resfriamento pode ser representado pela equação do coeficiente global de transferência de calor e massa, $K_G a$, que é função dos fluxos de água e de ar, expressa por (Fredman, Saxén, 1995):

$$K_G \cdot a = \alpha \cdot G'^{\gamma} \cdot L'^{\beta} \quad (4.14)$$

A partir desta modelagem foram definidos os parâmetros e variáveis efetivamente inseridos no PROII- Calculator CA2 - conforme especificações apresentada na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Parâmetros e variáveis do módulo da torre de resfriamento.

Descrição da variável correspondente no PROII	Parâmetros e variáveis do módulo – Torre de resfriamento
P(1)	Temperatura Corrente de Saída da Torre (T_{a2})
C(1)	B
C(2)	$\exp(-D)$
C(3)	a_3
C(4)	b_1
C(5)	H_{ar1}

A correlação inserida no módulo de cálculo do PROII CA2 é expressa pelos comandos:

```
R(1)=(C(1)*P(1)*C(2)+(C(3)/C(4)-C(5)/C(4))*(C(2)-1))/(C(1)+1-C(2))
RETURN
```

Esta correlação foi inserida no módulo de cálculo CA2. A operação unitária utilizada para inserção deste módulo de cálculo foi o flash F1.

4.4.5. Seqüência de cálculo

A seqüência de cálculo no modelo configurado em PROII é a seguinte:

- M4 - mixer (misturador de correntes)
- E2 – trocador de calor hidrocarboneto/hidrocarboneto
- T11 – torre de destilação
- SP1 – splitter, divisor de corrente
- SP2 – splitter, divisor de corrente
- SP3 – splitter, divisor de corrente
- TC-44A/B – trocador de calor água/hidrocarboneto
- TC-42 – trocador de calor água/hidrocarboneto
- P2 – bomba
- SP4 - splitter, divisor de corrente
- T3 – torre de destilação
- TC-48A/B – trocador de calor água/hidrocarboneto
- TC-51A/B – trocador de calor água/hidrocarboneto
- M3 - mixer (misturador de correntes)
- TC-41 – trocador de calor água/hidrocarboneto
- M1 - mixer (misturador de correntes)
- M2 - mixer (misturador de correntes)
- CA2 – módulo de cálculo
- F1 – operação unitária flash
- P1 - bomba

4.4.6. Restrições e Condições Recomendadas

As restrições adotadas para a torre T-3, nas simulações, estão expressas na tabela 4.7 em termos de composições

Tabela 4.7: Restrições para a torre T-3

Torre T -3	componente	% molar
FUNDO	Isobutano	< 4
TOPO	Butadieno 1,3	< 0,15
	Isobutano	> 50

4.4.7. Simulação – Testes preliminares

Os circuitos de água de resfriamento e hidrocarbonetos foram configurados inicialmente de forma separada e foram integrados após verificação da convergência individual dos circuitos.

A configuração de cada circuito foi realizada etapa a etapa que consistiu na inserção de equipamento a equipamento após a qual o modelo era simulado. Passou-se para a etapa seguinte apenas após a convergência do modelo configurado na etapa presente.

O modelo do circuito de água de resfriamento consistiu na inserção dos dados dos trocadores de calor, inclusive fatores de incrustação, com as respectivas vazões de água de projeto.

O modelo do circuito de hidrocarboneto consistiu na inserção dos dados dos equipamentos apresentados na tabela 4.5.

A figura 4.5 apresenta o fluxograma de processo do sistema configurado no PROII.

4.4.8. Casos simulados

O estudo de casos foi realizado com o objetivo de avaliar a influência de variáveis relacionadas às condições operacionais da torre de resfriamento no desempenho do processo integrado.

As variáveis foram investigadas em torno das seguintes condições de operação da torre, denominado caso base:

- Vazão de ar = $105,7 \text{ m}^3/\text{s}$ (correspondente a 1 célula da torre de resfriamento)
- Vazão de água = $275 \text{ m}^3/\text{h}$ (correspondente a 1 célula da torre de resfriamento).

Figura 4.5 – Configuração da Planta de Hidrogenação Seletiva de Butadieno

- Consideraram-se duas condições para o ar ambiente, a saber, ar relativamente úmido com $T_{bs} = 33\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $T_{bu} = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ (UR = 70%) e ar relativamente seco com $T_{bs} = 30,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $T_{bu} = 13\text{ }^{\circ}\text{C}$ (UR = 10%).

A partir dos resultados obtidos do simulador, analisaram-se as seguintes variáveis do processo integrado:

- carga térmica total referente à água de resfriamento
- Temperatura da água fria
- Range da torre de resfriamento
- % de vapor na corrente de topo T-3 (saída do processo)

4.4.8.1 Cenário 1 – Influência da vazão de ar

Neste cenário, foi estudada a influência da vazão do ar, mantendo-se a vazão de água constante. Consideraram-se valores de vazão de ar de 80% a 120% do valor base. Para as condições do ar foram adotadas, no cenário 1a, $T_{bu} = 13\text{ }^{\circ}\text{C}$ e no cenário 1b, $T_{bu} = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Os parâmetros e variáveis para este cenário estão apresentados nas tabelas 4.8 e 4.9.

Tabela 4.8: Parâmetros e variáveis do módulo da torre de resfriamento – Cenário 1a

Vazões de ar						
Parâmetros do PROII	Variáveis da eq. 4.13	Caso base 105,7 m ³ /s	Vazão 1 105,7 m ³ /h x 0,8 = 84,5 m ³ /s	Vazão 2 105,7 m ³ /h x 0,9 = 95,1 m ³ /s	Vazão 3 105,7 m ³ /h x 1,1 = 116,2 m ³ /s	Vazão 4 105,7 m ³ /h x 1,2 = 126,8 m ³ /s
P(1)	T_{a2}	T_{a2}	T_{a2}	T_{a2}	T_{a2}	T_{a2}
C(1)	B	0,41	0,59	0,76	0,94	1,12
C(2)	exp(-D)	0,759	0,665	0,579	0,500	0,430
C(3)	a_3	-21.618	-21.618	-21.618	-21.618	-21.618
C(4)	b_1	3.329	2.959	2.663	2.421	2.219
C(5)	H_{a1}	39.455	39.455	39.455	39.455	39.455

Tabela 4.9: Parâmetros e variáveis do módulo da torre de resfriamento – Cenário 1b

Parâmetros do PROII	Variáveis da eq. 4.13	Vazões de ar				
		Caso base	Vazão 1	Vazão 2	Vazão 3	Vazão 4
		105,7 m ³ /s	105,7 m ³ /h x 0,8 = 84,5 m ³ /s	105,7 m ³ /h x 0,9 = 95,1 m ³ /s	105,7 m ³ /h x 1,1 = 116,2 m ³ /s	105,7 m ³ /h x 1,2 = 126,8 m ³ /s
P(1)	T _{a2}	T _{a2}	T _{a2}	T _{a2}	T _{a2}	T _{a2}
C(1)	B	1,88	1,30	1,59	2,16	2,45
C(2)	exp(-D)	0,261	0,419	0,332	0,203	0,156
C(3)	a ₃	-118.281	-118.281	-118.281	-118.281	-118.281
C(4)	b ₁	2.663	3.329	2.959	2.421	2.219
C(5)	H _{a1}	88.555	88.555	88.555	88.555	88.555

4.4.8.2 Cenário 2 – Influência da vazão de água

Neste cenário, foi estudada a influência da vazão de água, mantendo-se a vazão de ar constante. Consideraram-se valores de vazão de água de 80% a 120% do valor base. Para as condições do ar foram adotadas, no cenário 2a, T_{bu} =13 °C e no cenário 2b, T_{bu} =27 °C.

Os parâmetros e variáveis para este cenário estão apresentados nas tabelas 4.10 e 4.11.

Tabela 4.10: Parâmetros e variáveis do módulo da torre de resfriamento – Cenário 2a

Parâmetros do PROII	Variáveis da eq. 4.13	Vazões de água				
		Caso base	Vazão 1	Vazão 2	Vazão 3	Vazão 4
		275 m ³ /h	275 m ³ /h x 0,8 = 220 m ³ /h	275 m ³ /h x 0,9 = 247,5 m ³ /h	275 m ³ /h x 1,1 = 302,5 m ³ /h	270 m ³ /h x 1,2 = 330 m ³ /h
P(1)	T _{a2}	T _{a2}	T _{a2}	T _{a2}	T _{a2}	T _{a2}
C(1)	B	1,20	0,96	0,76	0,60	0,47
C(2)	exp(-D)	0,494	0,535	0,579	0,625	0,673
C(3)	a ₃	-21.618	-21.618	-21.618	-21.618	-21.618
C(4)	b ₁	2.131	2.397	2.663	2.930	3.196
C(5)	H _{a1}	39.455	39.455	39.455	39.455	39.455

Tabela 4.11: Parâmetros e variáveis do módulo da torre de resfriamento – Cenário 2b.

Parâmetros do PROII	Variáveis da eq. 4.13	Vazões de água				
		Caso base	Vazão 1	Vazão 2	Vazão 3	Vazão 4
		275 m ³ /h	275 m ³ /h x 0,8 = 220 m ³ /h	275 m ³ /h x 0,9 = 247,5 m ³ /h	275 m ³ /h x 1,1 = 302,5 m ³ /h	270 m ³ /h x 1,2 = 330 m ³ /h
P(1)	T _{a2}	T _{a2}	T _{a2}	T _{a2}	T _{a2}	T _{a2}
C(1)	B	1,88	2,60	2,20	1,61	1,40
C(2)	exp(-D)	0,261	0,219	0,239	0,284	0,308
C(3)	a ₃	-118.281	-118.281	-118.281	-118.281	-118.281
C(4)	b ₁	2.663	2.131	2.397	2.930	3.196
C(5)	H _{a1}	88.555	88.555	88.555	88.555	88.555

4.4.8.3 Cenário 3 – Influência da temperatura de bulbo úmido

Investigou-se, neste caso, a influência da condição ambiental expressa em termos de temperatura de bulbo úmido. As vazões de ar e água foram as do caso base e a temperatura de bulbo seco foi de 33 °C. Consideraram-se valores de T_{bu} variando de 13 °C a 33 °C.

Os parâmetros e variáveis para este cenário estão apresentados na tabela 4.12.

Tabela 4.12: Parâmetros e variáveis do módulo da torre de resfriamento – Cenário 3.

Parâmetros do PROII	Variáveis da eq. 4.13	T _{bu} =13 °C	T _{bu} =18 °C	T _{bu} =23 °C	T _{bu} =28 °C	T _{bu} =33 °C
P(1)	T _{a2}	T _{a2}	T _{a2}	T _{a2}	T _{a2}	T _{a2}
C(1)	B	0,76	1,27	1,27	1,88	1,88
C(2)	exp(-D)	0,579	0,404	0,404	0,261	0,261
C(3)	a ₃	-21.618	-61.730	-61.730	-118.281	-118.281
C(4)	b ₁	2.663	2.663	2.663	2.663	2.663
C(5)	Ha1	39.455	46.963	77.156	96.216	134.519

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. DADOS EXPERIMENTAIS DA CARACTERIZAÇÃO DA TORRE DE RESFRIAMENTO

Os dados medidos para caracterização da torre foram coletados na planta industrial (PHSB) em condições reais de operação.

Apresentam-se, na tabela 5.1, os dados operacionais da torre de resfriamento obtidos em um levantamento efetuado em quatro dias diferentes. Os dados discriminados são referentes a uma célula da torre de resfriamento, isto é, a vazão L corresponde à metade da vazão de água de circulação e a vazão Q à metade da vazão de ar.

Os dias para levantamento foram baseados nas condições ambientais dentro dos possíveis extremos, a saber:

- dias quentes com alta umidade;
- dias frios com baixa umidade.

Tabela 5.1 – Condições operacionais e ambientais para obtenção do coeficiente de transporte de massa K_{Ga} .

Data/hora	TORRE DE RESFRIAMENTO				AR AMBIENTE	
	L	Q *	T _{a1}	T _{a2}	T _{bs}	T _{bu}
	$\left[\frac{m^3}{h} \right]$	$\left[\frac{m^3}{s} \right]$	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$
22/3/10 8:25	274,3	105,7	39,2	30,1	30,0	24,0
22/3/10 9:25	272,3	105,7	39,8	30,7	32,0	25,5
22/3/10 10:25	276,5	105,7	39,9	31,0	33,5	25,0
22/3/10 11:25	275,3	105,7	39,9	31,0	34,3	26,0
22/3/10 12:25	275,6	105,7	40,1	31,3	36,0	27,0
22/3/10 13:25	275,6	105,7	40,0	31,1	37,5	27,5
22/3/10 14:25	275,9	105,7	40,3	31,3	38,5	28,5
22/3/10 15:25	276,1	105,7	40,2	31,3	36,0	27,0
6/8/10 7:55	299,3	105,7	31,0	23,2	15,0	14,5
6/8/10 8:55	300,5	105,7	31,2	23,4	16,5	14,5
6/8/10 9:55	300,8	105,7	31,4	23,5	18,0	15,5
6/8/10 10:55	298,1	105,7	31,6	23,7	19,5	15,5
6/8/10 11:55	299,9	105,7	31,9	24,0	20,0	16,0
6/8/10 12:55	301,1	105,7	32,2	24,2	20,0	16,5
6/8/10 13:55	300,7	105,7	32,0	24,2	20,0	16,5
6/8/10 14:55	299,1	105,7	31,8	23,9	18,0	15,0
16/8/10 7:55	249,4	105,7	30,4	22,2	14,0	13,0
16/8/10 8:55	246,8	105,7	31,1	23,0	17,0	14,5
16/8/10 9:55	250,5	105,7	31,8	23,6	20,0	16,0
16/8/10 10:55	248,7	105,7	31,9	23,6	19,0	15,0
10/9/10 7:55	251,0	105,7	33,5	25,0	19,5	18,0
10/9/10 8:55	251,2	105,7	33,9	25,6	21,0	18,0
10/9/10 9:55	248,8	105,7	34,0	25,7	21,5	18,0
10/9/10 10:55	249,4	105,7	33,9	25,5	22,0	18,0
10/9/10 11:55	250,3	105,7	34,0	25,6	22,5	18,5
10/9/10 12:55	250,6	105,7	34,2	26,1	22,5	18,5
10/9/10 13:55	250,0	105,7	34,4	26,2	22,5	19,5
10/9/10 14:55	249,9	105,7	34,2	26,2	23,0	19,5

* devido a indisponibilidade de medição ou variável que permita a sua obtenção foi adotado valor de projeto, considerando-se que o ventilador opera nas mesmas condições que as de projeto .

Nas figuras 5.1 a 5.4, estão apresentados os gráficos que expressam os seguintes dados operacionais da torre TR-03 em função do tempo, para quatro dias diferentes: vazões de água, L, e temperaturas de água de resfriamento quente, T_{a1}, e fria, T_{a2}.

Figura 5.1 – Dados operacionais: ensaio realizado no dia 22/3/2010

Figura 5.2 - Dados operacionais: ensaio realizado no dia 06/08/2010

Figura 5.3 – Dados operacionais: ensaio realizado no dia 16/08/2010

Figura 5.4 – Dados operacionais: ensaio realizado no dia 10/09/2010

Como anteriormente citado, os dias foram selecionados com base nas condições ambientais. Sendo as condições operacionais as realmente observadas, não estavam disponíveis para eventuais ajustes. Mesmo assim, as vazões de água medidas apresentaram valores praticamente constantes a cada dia, no entanto em patamares distintos, como pode ser observado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Vazões médias de água por célula

Data	Vazão média (m³/h)
22/03/2010	275
06/08/2010	300
16/08/2010	249
10/09/2010	250

Observa-se das figuras 5.1 a 5.4 que houve uma pequena variação das temperaturas da água (fria e quente) ao longo de cada dia, sendo o range praticamente constante.

A figura 5.5 ilustra a variação da condição ambiental em termos de temperatura de bulbo úmido (Tbu) e temperatura de bulbo seco (Tbs), ao longo do dia, para dois dias distintos.

Observa-se que a variação das condições ambientais são significativas ao longo do dia, e, portanto, a análise destas deve ser considerada na análise sistêmica do processo.

Figura 5.5 – Variação da condição ambiental ao longo do dia, para dois diferentes dias

5.2. DETERMINAÇÃO DO $K_{G,a}$ DA TORRE RESFRIAMENTO

A figura 5.6 apresenta a curva da entalpia específica de saturação do ar em função da temperatura, à pressão absoluta de 760 mmHg. Tratam-se de dados obtidos da literatura (Perry, Green, 1997) e considerados para ajuste da correlação em diferentes faixas de temperaturas.

Figura 5.6: Entalpia específica de saturação do ar em função da temperatura do ar para pressão de 760 mmHg.

Conforme procedimento apresentado no item 4.2, a entalpia específica do ar saturado, que corresponde à condição de interface, foi ajustada por uma equação linear (equação 4.3). A validade deste ajuste pressupõe uma faixa de temperatura não superior a 15 °C. Assim, adotaram-se os parâmetros para a equação (4.3), que estão apresentados na tabela 5.3, com as respectivas faixas de temperaturas.

Tabela 5.3: Parâmetros da equação 4.3

a_2	a_3	Faixa de temperatura (°C)
(J/kg ar seco.°C)	(J/kg ar seco)	
7.660	-118.281	30 a 45
6.038	-61.730	25 a 40
4.698	-21.618	20 a 35

Os valores experimentais de $K_G a$ foram obtidos a partir do modelo apresentado no item 4.2. A partir da curva de entalpia de saturação, dos fluxos L' e G' e da condição de entrada do ar (entalpia) da torre, calculam-se os parâmetros A, B e C da equação 4.8.

$$K_G \cdot a = -\frac{G'}{Z_T} \frac{1}{B} \cdot \left\{ \ln \left| \frac{B \cdot T_{a2} + C}{B \cdot T_{a1} + C} \right| \right\} \quad (4.8)$$

Apresentam-se, na tabela 5.4, os valores de $K_G a$ calculados a partir das condições operacionais e ambientais, apresentadas na tabela 5.1.

Observa-se que os valores de vazão de ar pouco variam e este comportamento decorre apenas da variação da condição ambiental, pois a rotação dos ventiladores não foi alterada. Mesmo assim, considerou-se além do fluxo de água, o fluxo de ar como variável.

O coeficiente global de transferência de massa, $K_G a$, da torre de resfriamento em questão pode ser expresso em função dos fluxos de ar e de água (Fredman, Saxen (1995)), conforme a equação (5.1):

$$K_G \cdot a = \alpha \cdot L'^{\beta} \cdot G'^{\gamma} \quad (5.1)$$

Tabela 5.4 – Valores de K_{Ga} obtidos para a Torre TR-03.

Data/hora	L'	G'	K_{Ga}
	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right]$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right]$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \cdot \left(\frac{\text{m}^2}{\text{m}^3} \right) \right]$
22/3/10 8:25	2,12	3,40	0,73
22/3/10 9:25	2,10	3,38	0,78
22/3/10 10:25	2,13	3,36	0,70
22/3/10 11:25	2,12	3,36	0,77
22/3/10 12:25	2,13	3,34	0,85
22/3/10 13:25	2,13	3,32	0,96
22/3/10 15:25	2,13	3,34	0,84
6/8/10 7:55	2,31	3,58	0,99
6/8/10 8:55	2,32	3,56	0,97
6/8/10 9:55	2,32	3,54	1,04
6/8/10 10:55	2,30	3,53	0,99
6/8/10 11:55	2,31	3,52	0,97
6/8/10 12:55	2,32	3,52	0,99
6/8/10 13:55	2,32	3,52	0,99
6/8/10 14:55	2,31	3,54	0,93
16/8/10 7:55	1,92	3,59	0,88
16/8/10 8:55	1,90	3,56	0,83
16/8/10 9:55	1,93	3,52	0,84
16/8/10 10:55	1,92	3,53	0,80
10/9/10 7:55	1,94	3,53	0,82
10/9/10 8:55	1,94	3,51	0,73
10/9/10 9:55	1,92	3,50	0,72
10/9/10 10:55	1,92	3,50	0,73
10/9/10 11:55	1,93	3,49	0,75
10/9/10 12:55	1,93	3,49	0,68
10/9/10 13:55	1,93	3,49	0,75
10/9/10 14:55	1,93	3,48	0,73

Com o uso de recurso da função de regressão Proj. Lin. da biblioteca de funções estatística do Microsoft Excel obtêm-se a seguinte equação, com coeficiente de correlação de 0,635.

$$K_G \cdot a = 0,097 \cdot G'^{1,3} \cdot L'^{0,9} \quad (5.2)$$

Figura 5.7: Comparação : $(K_G a)_{\text{experimental}} \times (K_G a)_{\text{calculado}}$

A figura 5.7 apresenta uma comparação entre os valores de $K_G a$, obtidos experimentalmente e os valores calculados pela correlação (5.2).

Os parâmetros β e γ obtidos para a equação (5.1) são superiores aos observados na literatura. Mello (2008) obteve γ entre 0,6 e 0,7 e β entre 0,42 e 0,49, para uma coluna em escala piloto. No entanto, o tipo de recheio (enchimento) tem forte influência neste parâmetro.

Face aos limitados intervalos de valores de vazão de água e, principalmente, de ar, a correlação (5.2) empregada no presente trabalho ficou restrita à variações de vazões de ar e água de no máximo 20%.

5.3. SIMULAÇÃO DE CONDIÇÃO REAL DE OPERAÇÃO DA PLANTA E TORRE

Apresenta-se na figura 5.8 o fluxograma do processo e sistema de resfriamento configurado no PROII. A Tabela 5.5 apresenta um resumo obtido do simulador de dados e resultados típicos de uma simulação.

Figura 5.8 – Configuração da Planta de Hidrogenação Seletiva de Butadieno

Tabela 5.5 – Dados e variáveis calculadas

Stream Name Stream Description	A1	A2	A3_REF	D1	D2	D3	S1	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S2	S20	S21	S22	S23	S24	S25	S26	S27	S28	S3	S30	S4	S5	S7	S8	S9
Phase	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid	Vapor	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid	Mixed	Liquid	Liquid	Liquid	Mixed	Mixed	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid
Total Stream																																		
Rate	30444.0023	444.0023	444.002	201.912	55.000	141.735	5.175	5941.232	7392.049	403.558	5110.720	1103.452	5110.720	403.558	289.216	289.216	289.216	475.600	1138.752	5253.298	1138.752	5253.298	1103.452	141.735	502.768	7392.049	493.474	493.474	87.304	289.216	5110.720	30444.002	5941.232	502.768
Std. Liq. Rate	548.999	548.999	548.999	19.536	5.535	13.479	0.522	125.172	313.632	38.864	110.195	111.057	110.195	38.864	26.049	26.049	26.049	46.250	38.568	275.064	38.568	275.064	111.057	13.479	423.827	313.632	46.871	46.871	6.512	26.049	110.195	548.999	125.172	423.827
Temperature	42.107	29.805	29.805	30.102	43.101	63.188	43.101	47.478	29.811	33.037	29.829	49.775	31.347	39.472	30.102	31.401	30.049	40.000	29.811	29.811	33.060	45.220	43.031	36.914	40.519	43.738	39.204	63.632	30.102	49.204	29.811	29.812	29.811	29.811
Pressure	3.697	0.100	0.100	14.897	4.667	6.298	4.667	4.103	4.633	13.784	3.926	5.700	3.897	13.900	14.897	13.921	13.897	13.967	4.633	4.633	3.784	4.465	4.654	6.127	3.697	3.784	13.967	13.967	13.926	4.633	4.633	4.633	4.633	
Molecular Weight	18.015	18.015	18.015	87.453	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	
Enthalpy	22.333	15.337	15.337	0.202	0.081	0.298	0.030	5.785	8.795	0.438	3.102	6.582	3.262	2.713	0.269	0.269	0.269	0.631	1.082	7.714	1.210	12.076	2.220	0.170	16.548	13.235	0.546	1.098	0.087	0.440	3.090	15.397	3.510	11.886
Mole Fraction Liquid	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
Reduced Temperature	0.4572	0.4652	0.4652	0.7189	0.7700	0.7384	0.7704	0.4955	0.4652	0.7388	0.4652	0.4652	0.4705	0.7388	0.7189	0.7189	0.7189	0.7462	0.4652	0.4652	0.4732	0.4920	0.7698	0.7259	0.4847	0.4597	0.7516	0.5211	0.7189	0.7541	0.4652	0.4652	0.4652	
Reduced Pressure	0.0210	0.0050	0.0050	0.3996	0.1494	0.1806	0.1497	0.0223	0.0252	0.3713	0.0221	0.1758	0.0210	0.3749	0.3996	0.3751	0.3745	0.3751	0.0252	0.0252	0.0214	0.0244	0.1491	0.1784	0.0210	0.0214	0.3813	0.3762	0.3996	0.3753	0.0252	0.0252	0.0252	
Acentric Factor	0.3449	0.3449	0.3449	0.1975	0.1839	0.1836	0.1836	0.3449	0.3449	0.1908	0.3449	0.1975	0.1975	0.1975	0.1975	0.1975	0.1975	0.1975	0.1975	0.1975	0.3449	0.3449	0.3449	0.3449	0.1839	0.1833	0.1833	0.1833	0.1833	0.1833	0.1833	0.1833	0.1833	
UOP K factor	8.758	8.758	8.758	13.223	13.223	13.223	13.223	13.223	13.223	13.223	13.223	13.223	13.223	13.223	13.223	13.223	13.223	13.223	13.223	13.223	13.223	13.223	13.223	13.223	13.223	13.223	13.223	13.223	13.223	13.223	13.223	13.223	13.223	
Std. Liquid Density	999.014	999.014	999.014	593.763	593.763	593.763	593.763	593.763	593.763	593.763	593.763	593.763	593.763	593.763	593.763	593.763	593.763	593.763	593.763	593.763	593.763	593.763	593.763	593.763	593.763	593.763	593.763	593.763	593.763	593.763	593.763	593.763	593.763	
Sp. Gravity	1.0000	1.0000	1.0000	0.5944	0.5723	0.6041	0.5721	1.0000	1.0000	0.5881	1.0000	0.5723	1.0000	0.5881	0.5944	0.5944	0.5944	0.5944	0.5944	0.5944	0.5944	0.5944	0.5944	0.5944	0.5944	0.5944	0.5944	0.5944	0.5944	0.5944	0.5944	0.5944	0.5944	
API Gravity	10.000	10.000	10.000	106.567	115.513	102.744	115.513	10.000	10.000	109.920	10.000	109.920	10.000	109.920	106.567	106.567	106.567	107.755	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	
Vapor																																		
Rate	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	5.175	n/a	n/a	n/a	n/a	1103.452	n/a	403.558	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	136.757	n/a	n/a	n/a	8.751	20.488	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
KG/HR	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	298.264	n/a	n/a	n/a	n/a	1103.452	n/a	403.558	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	780.577	n/a	n/a	n/a	186.246	749.886	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
M3/HR	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	21.136	n/a	n/a	n/a	n/a	111.057	n/a	38.864	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	559.769	n/a	n/a	n/a	14.767	35.034	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Vapor Std Vol Flow	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	115.020	n/a	n/a	n/a	n/a	732.770	n/a	8045.336	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	3065.490	n/a	n/a	n/a	196.155	459.229	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Molecular Weight	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	57.597	n/a	n/a	n/a	n/a	57.597	n/a	57.597	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	57.597	n/a	n/a	n/a	57.597	57.597	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Z (from K)	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.8605	n/a	n/a	n/a	n/a	0.8605	n/a	0.8605	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.8605	n/a	n/a	n/a	0.8605	0.8605	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Enthalpy	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	101.324	n/a	n/a	n/a	n/a	103.580	n/a	119.207	n/a	0.000	0.000	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	101.315	n/a	n/a	0.000	101.462	112.131	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
KD/L/KG-C	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.435	n/a	n/a	n/a	n/a	0.447	n/a	0.524	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.435	n/a	n/a	n/a	0.600	0.516	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
CP	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	14.111	n/a	n/a	n/a	n/a	16.645	n/a	26.264	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	14.073	n/a	n/a	n/a	12.915	21.404	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Th. Conductivity	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.01561	n/a	n/a	n/a	n/a	0.01622	n/a	0.01977	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.01561	n/a	n/a	n/a	0.00894	0.04007	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Viscosity	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.00818	n/a	n/a	n/a	n/a	0.00835	n/a	0.00942	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.00818	n/a	n/a	n/a	0.00853	0.00893	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Liquid																																		
Rate	30444.0023	444.0023	444.002	201.912	55.000	141.735	5.175	5941.232	7392.049	403.558	5110.720	n/a	5110.720	n/a	289.216	289.216	289.216	475.600	1138.752	5253.298	1138.752	5253.298	966.685	141.735	502.768	7392.049	484.722	472.985	87.304	289.216	5110.720	30444.002	5941.232	502.768
KG/HR	548.999	548.999	548.999	19.536	5.535	13.479	0.522	125.172	313.632	38.864	110.195	n/a	110.195	n/a	26.049	26.049	26.049	46.250	38.568	275.064	38.568	275.064	967.934	134.308	408.938	7392.049	484.722	472.985	87.304	289.216	5110.720	30444.002	5941.232	502.768
M3/HR	548.999	548.999	548.999	19.536	5.535	13.479	0.522	125.172	313.632	38.864	110.195	n/a	110.195	n/a	26.049	26.049	26.049	46.250	38.568	275.064	38.568	275.064	967.934	134.308	408.938	7392.049	484.722	472.985	87.304	289.216	5110.720	30444.002	5941.232	502.768
Molecular Weight	18.015	18.015	18.015	87.453	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	n/a	57.597	n/a	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	57.597	
Z (from K)	0.00381	0.00094	0.00094	0.05856	0.02182	0.02636	n/a	0.00408	0.00471	0.05405	0.00412	n/a	0.00391	n/a	0.05856	0.05494	0.05492	0.05471	0.00471	0.00397	0.00439	0.02177	0.02587	0.00382	0.00386	0.05402	0.05856	0.05402	0.00471	0.00471	0.00471	0.00471	0.00471	
Enthalpy	40.719	27.965	27.965	17.374	25.577	36.612	n/a	46.262	28.071	19.243	28.177	n/a	29.632	n/a	17.374	18.095	17.333	23.102	28.071	28.071	31.399	43.944	25.532	20.880	39.082	42.402	22.979	37.893	17.374	28.452	28.071	28.073	28.071	
KD/L/KG-C	1.031	1.030	1.030	0.562	0.609	0.631	n/a	1.031	1.030	0.574	1.030	n/a	1.030	n/a	0.562	0.564	0.564	1.030	1.030	1.030	1.031	0.609	0.572	1.031	0.587	0.587	0.587	0.587	0.587	0.587	0.587	0.587	0.587	
Density	976.221	966.765	966.765	577.991	535.146	539.658	n/a	971.575	966.842	565.100	966.703	n/a	965.504	n/a	577.991	576.134	577.977	561.178	966.842	966.842	964.031	973.539	535.335	577.449	977.585	974.511	553.605	522.713	577.991	551.509	966.842	966.842	966.842	
Surface Tension	69.4308	71.8587	71.8587	11.2904	8.2848	8.2071	n/a	68.3804	71.8575	10.3780	71.8340	n/a	71.5526	n/a	11.2904																			

5.4. ESTUDO DE CASOS

O objetivo deste estudo foi o de analisar a influência de algumas variáveis no desempenho da torre de resfriamento, considerando-se a integração desta no processo.

Conforme procedimento descrito no item 4.4.8, as seguintes variáveis operacionais da torre de resfriamento foram investigadas: vazão de ar, vazão de água e temperatura de bulbo úmido do ar.

Cabe ressaltar que as vazões base 105,7 m³/s de ar, 275 m³/h de água e a carga térmica listadas nos gráficos a seguir correspondem a 1 célula da torre de resfriamento TR-3 composta de 2 células.

5.4.1. Influência da vazão de ar

Neste item, o objetivo é avaliar a influência da vazão de ar no desempenho da torre e do sistema integrado, para as seguintes condições: vazão de água de 275 m³/h, para $T_{bu} = 13\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $T_{bu} = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A Figura 5.9 mostra a variação de carga térmica na célula da torre de resfriamento em função da vazão de ar. Nota-se que o acréscimo na carga térmica devido ao aumento da vazão de ar não é significativo, mas decorre, principalmente, do aumento do K_{Ga} .

Observa-se que o range aumenta muito pouco com a vazão de ar, conforme mostrado na Figura 5.10, este comportamento é similar ao da carga térmica com a vazão de ar. Tal desempenho é previsto, pois a vazão de líquido é constante, assim a carga térmica é diretamente proporcional ao range.

A temperatura da água fria diminui com a vazão do ar, mas esta queda é muito mais intensa para $T_{bu} = 13\text{ }^{\circ}\text{C}$ do que para $T_{bu} = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 5.11). Para a faixa de vazões de ar estudada, conta-se, que o “approach” para $T_{bu} = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ é

relativamente baixo variando de 2 a 5 °C, enquanto que para $T_{bu} = 13\text{ °C}$, este varia de 4 a 13 °C. Ou seja, a torre opera mais distante do seu limite termodinâmico.

Figura 5.9 – Influência da vazão de ar na carga térmica. $T_{bu} = 13$ e 27 °C e $L = 275\text{ m}^3/h$.

Figura 5.10 – Influência da vazão de ar no range. $T_{bu} = 13$ e 27 °C e $L = 275\text{ m}^3/h$.

Figura 5.11 – Influência da vazão de ar na temperatura da água fria. $T_{bu} = 13$ e 27°C e $L = 275 \text{ m}^3/\text{h}$.

A Figura 5.12 mostra a influência da vazão de ar na % vaporizada no tambor de topo da T-3. Para $T_{bu} = 27^{\circ}\text{C}$, a fração vaporizada é fortemente relacionada à vazão de ar, devido à menor temperatura da água fria (proveniente da torre). No entanto, para $T_{bu} = 13^{\circ}\text{C}$, toda corrente proveniente do tambor está condensada, independente da vazão considerada.

Figura 5.12 – Influência da vazão de ar na % vaporizada no tambor de topo da T-3. $T_{bu} = 13$ e 27°C e $L = 275 \text{ m}^3/\text{h}$.

5.4.2. Influência da vazão de água

O recurso operacional mais utilizado para suprir a demanda térmica em um sistema de resfriamento é o ajuste da vazão de água da torre de resfriamento. Assim, neste item, tem-se como objetivo avaliar a influência da vazão de água no desempenho do sistema, para as seguintes condições: $T_{bu} = 13\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $T_{bu} = 27^{\circ}\text{C}$ e vazão de ar $105,7\text{ m}^3/\text{s}$.

A Figura 5.13 mostra que há um pequeno incremento na carga térmica na célula com o aumento da vazão de água. Este incremento é mais significativo no caso de $T_{bu} = 27^{\circ}\text{C}$.

O range diminui de forma intensa com o aumento na vazão de água, como pode ser observado na Figura 5.14, provavelmente devido ao aumento da capacidade térmica da água.

Figura 5.13 – Influência da vazão de água na carga térmica. $T_{bu} = 13$ e $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $G = 105,7\text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 5.14 – Influência da vazão de água no range. T_{bu} = 13 e 27 °C e G = 105,7 m³/s.

A figura 5.15 mostra que a temperatura da água fria praticamente não varia com a vazão de água, mantendo-se em 30 °C, para T_{bu} = 27°C, e entre 21 e 22 °C, para = 13°C. Este comportamento difere do observado com a vazão de ar, pois a vazão água interfere no desempenho da torre e diretamente no processo. Os coeficientes de troca de calor e as diferenças de temperaturas nos diferentes trocadores de calor são diretamente afetados pela vazão de água.

A influência da vazão de água na % vaporizada no tambor de topo da T-3 é apresentada na figura 5.16. Para T_{bu} = 27 °C a fração vaporizada é fortemente relacionada à vazão de água, devido à maior vazão de água no trocador de calor do sistema. Para T_{bu} = 13 °C, a temperatura da água fria é baixa o suficiente para manter a corrente proveniente do tambor condensada, independente da vazão de água.

Figura 5.15 – Influência da vazão de água na temperatura da água fria. $T_{bu} = 13$ e 27°C e $G = 105,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 5.16 – Influência da vazão de água na % vaporizada no tambor de topo da T-3. $T_{bu} = 13$ e 27°C e $G = 105,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.4.3. Influência da temperatura de bulbo úmido, T_{bu}

Neste item, avalia-se a influência da condição ambiental expressa em termos da temperatura de bulbo úmido. Foram consideradas as seguintes condições: vazão de água de $275 \text{ m}^3/\text{h}$ e vazão de ar de $105,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

A Figura 5.17 ilustra o forte decréscimo na carga térmica na célula com o aumento da temperatura de bulbo úmido. Isto pode ser explicado pela redução na força motriz para transferência de calor e massa na torre.

Nota-se, da Figura 5.18, que o range tem comportamento similar ao da carga térmica. Justifica-se, do lado da torre, pois sendo a vazão de água constante, a carga está diretamente relacionada ao range. Por outro lado, no processo, com o aumento da temperatura de bulbo úmido e a menor carga na torre, tem-se uma maior temperatura de água fria (Figura 5.19) dificultando a troca de calor nos trocadores do processo.

Figura 5.17 – Influência do T_{bu} na carga térmica. $L = 275 \text{ m}^3/\text{h}$ e $G = 105,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 5.18 – Influência do Tbu no range. $L = 275 \text{ m}^3/\text{h}$ e $G = 105,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 5.19 – Influência do Tbu em T_{a1} (água quente) e T_{a2} (água fria).
 $L = 275 \text{ m}^3/\text{h}$ e $G = 105,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

6. CONCLUSÕES

Os levantamentos de campo possibilitaram a caracterização do desempenho de uma torre de resfriamento industrial, de capacidade aproximada de 10.000 kW, (2 células de 5.000 kW) a partir de medidas de vazão de água de resfriamento e temperaturas da água fria, água quente e bulbo úmido. O desempenho da torre foi representado de maneira coerente em termos do coeficiente global de transferência de calor e massa, como função das vazões de água e de ar, na faixa limite de operação.

Configurou-se uma Planta de Hidrogenação Seletiva de Butadieno em simulador de processos, em condições reais de operação, e desenvolveu-se um módulo para simulação da torre de resfriamento baseado no modelo expresso em termos do coeficiente global de transferência de calor e massa. A implementação deste módulo viabilizou a análise sistêmica do processo e da torre de resfriamento de forma integrada.

Simularam-se vários cenários, investigando-se a influência das seguintes variáveis: vazão de ar, vazão de água e temperatura de bulbo úmido. A partir dos resultados, constata-se que, no limite de operação industrial e considerando-se as faixas de vazões simulados, a temperatura de bulbo úmido é a variável de maior influência no desempenho do processo. Ressalta-se que esta variável, obviamente, não é manipulável, sendo função apenas da condição ambiental.

Face às variações da condição ambiental o desempenho do processo é realmente afetado e demanda da operação ajustes que geralmente recaem na alteração da vazão de água. Disto decorrem alterações nas vazões específicas de cada ramal da rede de distribuição de água, dos coeficientes de transferência de calor nos trocadores de calor e na potência de bombeamento. Impactando-se, de forma complexa no processo. Da análise desenvolvida neste trabalho, verifica-se que a manipulação da vazão de ar, ao invés da

vazão de água, tende a compensar as variações das condições ambientais, com menor interferência no processo.

Como proposta de continuidade deste estudo, sugere-se:

- implementar a rede de distribuição de água no simulador de processos.
- avaliar o custo operacional devido às potências associadas aos custos de bombeamento e do ventilador.
- analisar o desempenho da torre em função de alterações na capacidade de processamento de planta.
- implementação de uma operação unitária de torre de resfriamento mais robusto.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BURGER, Robert. **Cooling tower technology: maintenance, upgrading and rebuilding**. 3rd ed. The Fairmont Press, Inc. Indian Trail, Lilburn, 1994.

BURGER, R. **Points to consider when specifying a cooling tower**. (HVAC). Plant Engineering v. 45, n. 3, p 76(4), 1991.

CASTRO, M.M.; SONG, T.W.; PINTO, J.M., Minimization of operational cost in cooling water systems. Trans IChemE., v.78, part A, p.192-201, 2000.

CASSETTA, E. Curso teórico: torres de resfriamento de água, São Paulo, 2003.

COOLING TOWER INSTITUTE (CTI). Houston. Apresenta recursos e atividades desenvolvidas. Disponível em:< <http://www.cti.org> >. Acesso em 22 jun. 2007.

CORTINOVIS, G. F., **Modelagem e otimização de um sistema de água de resfriamento e validação experimental**. Dissertação de mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2004. 159 p.

CORTINOVIS, G. F.; PAIVA, J. L.; SONG, T. W.; PINTO, J.M., **A systemic approach for optimal cooling tower operation**. Energy Conversion and Management. USA, p.2200-2209, 2009a.

CORTINOVIS, G. F.; PAIVA, J. L.; SONG, T. W.; PINTO, J.M., **Integrated analysis of cooling water systems: Modeling and experimental validation**. Applied Thermal Engineering, 29, p.3124-3131, 2009b.

ELKIND, Raul. Torres de resfriamento. PETROBRAS/SEREC/CEN-SUD.

FISENKO, S. P. et. al. Evaporative cooling of water in a mechanical draft cooling tower. International Journal of Heat and Mass Transfer v. 47, 165-177, 2004.

FOUST, A. S. et. al. **Principles of unit operations**. 2nded. John Wiley & Sons New York, 1980.

FREDMAN, T.; SAXÉN, H. **Modeling and simulation of a cooling tower**. European simulation multiconference. Praga, p.66-70, 1995.

KIM, J; SMITH, R., **Cooling water system design**. Chemical Engineering Science, v. 56, p.3641-3658, 2001.

KLOPPERS, J.C.; KROGER, D.G., **A critical investigation into the heat and mass transfer analysis of counterflow wet-cooling towers**. International Journal of Heat and Mass Transfer v.48, p.765-777, 2005a.

KLOPPERS, J.C.; KROGER, D.G., **Cooling Tower Performance Evaluation: Merkel, Poppe and e-NTU Methods of analysis**. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, v.127, p.1-7, 2005b.

LIMA JÚNIOR, R. C. de. **Estudo de torres de resfriamento acopladas em situação de alta demanda térmica**. Qualificação – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2011.

MARLEY COOLING TOWER COMPANY. Catálogo CF 05 , 2008.

MELLO, L. C., **Influência de variáveis de processo no desempenho de torre de resfriamento**. Dissertação de mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2008. 140 p.

MELLO, L.C., SONG, T.W., PAIVA, J.L., **Metodologia para caracterización del desempeño operacional de una torre de enfriamiento.**, In: X Congreso Iberoamericano de Aire Acondicionado y Refrigeración, Guayaquil, 2009.

MUANGONI, T.; ASVAPOOSITKUL, W.; WONGWISES, S., **An exergy analysis on the performance of a counterflow wet cooling tower**. Applied Thermal Engineering, v.27, p.910-917, 2007.

MSPC Informações Técnicas. Disponível em:

<<http://www.mspc.eng.br/termo/termod0410.shtml>>. Acesso em: 05 março 2007.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P., **Unit operations of chemical engineering**. 6 th. New York: McGrill-Hill Higher Education, 2005.

OGINO, W. T., **Manual de operação da UGAV**. Vol. 1, 2, 3, 4, 5 e 6. Cubatão, 2003.

ORTEGA, J.M.P.; GONZALES, M.S; GUTIÉRREZ, A.J. **Optimization model for re-circulating cooling water systems**, Computers and Chemical Engineering, 34, p.177-195, 2010.

PANNKOKE, T. **Cooling tower basics**. Journal HPAC Engineering. feb.1996.

PAPAEFTHIMIOU, V. D.; ZANNIS, T. C.; ROGDAKIS, E. D., **Thermodynamic study of wet cooling tower performance**. International Journal of Energy Research. Grécia, n. 30, p. 411-426, 23 jan. 2006.

PERRY, R.H.; GREEN, D. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 7th ed, McGraw Hill, New York, 1997.

8. ANEXOS

ANEXO A – Terminologias e Definições

Terminologias e Definições típicas referentes às colunas de resfriamento, baseadas na NBR-6111/1980 e em normas internacionais regidas pelo C.T.I. COOLING TOWER INSTITUTE, 2007.

Aproximação (approach): Diferença entre a temperatura da água fria (saída da torre) e a temperatura de bulbo úmido do ar afluente.

Ar efluente (inlet air): Mistura de ar e vapor de água na saída da torre de resfriamento de água.

Bacia de água fria: Componente situado sob a torre de resfriamento de água com a finalidade de receber a água fria e orientar o fluxo para o poço ou linhas de sucção.

Bicos de distribuição: Dispositivo usado nos sistemas de distribuição de água quente, servindo para escoar e distribuir a água das calhas ou dos tanques de distribuição para o enchimento da torre.

Carga térmica (heat load): Quantidade de calor removido da água em circulação pela torre de resfriamento de água por unidade de tempo.

Célula: Menor divisão de uma torre de resfriamento de água limitada pelas paredes exteriores e paredes divisórias; cada célula pode funcionar como uma unidade independente com respeito aos escoamentos de ar e água.

Diferencial de temperatura (cooling range): diferença de temperatura entre a água quente (entrada da torre) e a resfriada.

Difusor: Estrutura de forma cilíndrica modificada que envolve o ventilador de uma torre de tiragem mecânica.

Eliminador de gotas (drift eliminator): Sistema de chicanas existentes na torre e projetado para reduzir a quantidade de água perdida na forma de gotículas misturadas com o ar efluente.

Enchimento (packing ou fill): Componente interno da torre utilizado para aumentar o tempo e a superfície de contato entre a água e o ar, incrementando assim, a transferência da massa e calor.

Perda de água por evaporação: Perda de água na forma de vapor, medida em termos de porcentagem da vazão de água circulante.

Perda de água por respingamento: Perda de água, na forma de gotas, através das venezianas ou aberturas nas paredes, medida em termos de porcentagem da vazão de água circulante.

Plenum: Em uma parte de tiragem induzida é o espaço compreendido entre os eliminadores de gotas e a plataforma dos ventiladores; em uma torre de tiragem forçada, é o espaço entre os ventiladores e o enchimento.

Potência do ventilador: Potência requerida pelo ventilador.

Pressão dinâmica do ventilador: Pressão correspondente à velocidade média

na descarga do ventilador, baseada na área total da saída, sem descontar a área tomada por redutores, suportes e outros componentes.

Pressão estática do ventilador: Pressão necessária para vencer as perdas de carga interpostas pelos diversos componentes da torre.

Pressão total do ventilador: É a soma algébrica da pressão dinâmica com a pressão estática do ventilador.

Purga (blow-down): descarte contínua do sistema tendo como finalidade o controle da concentração de sais e outras impurezas que possam atingir a saturação e se depositarem nos equipamentos do sistema (exemplo: trocadores de calor, linhas, bacia da torre de resfriamento).

Range ou cooling range: Diferença de temperatura entre a água quente e a fria.

Recirculação (recirculation): quantidade de ar de descarga que retorna à torre de resfriamento por unidade de tempo.

Reposição de água (make-up): água adicionada ao circuito para recompor as perdas de água por evaporação, arraste, respingos e vazamentos.

Sistema de distribuição: Parte da torre que começa na conexão de entrada e que distribui a água quente circulante sobre o enchimento.

Temperatura da água quente: Temperatura da água circulante ao entrar no sistema de distribuição.

Temperatura de bulbo úmido do ambiente (ambient wet bulb temperature): a temperatura do bulbo úmido do ar, do lado dos ventos predominantes, em relação à torre e sem a interferência da mesma.

Temperatura de bulbo seco: temperatura do ar indicada por um termômetro comum, sem condensação na superfície do bulbo.

Temperatura de água fria: Temperatura “média” da água circulante na bacia de água fria.

Torre contra corrente: Torre de resfriamento através da qual o ar flui em sentido contrário ao da corrente de água.

Vazão de ar (air flow): a quantidade total de ar entrando na torre de resfriamento por unidade de tempo.

Vazão de água (circulating water flow): quantidade de água quente entrando na torre de resfriamento por unidade de tempo.

Venezianas: Componentes instalados nas entradas de ar da torre com o objetivo de diminuir perdas por respingamento e direcioná-lo para o interior da torre.

Ventilador (fan): Equipamento rotativo que movimenta o ar continuamente. É usado para movimentação do ar nas torres de tiragem mecânica.

ANEXO B - Listagem. Um caso do modelo em PROII

TITLE

DESC HSB_1: Inclusao do flash e calculator

DESC HSB_2: Link de A2 com A2_ref e estimativas iniciais em S7

DESC HSB_3: Alterar calculator

DESC

DIMENSION METRIC, PRES=KG/CMG, STDTEMP=0, STDPRES=0

SEQUENCE SIMSCI

CALCULATION RVPBASIS=APIN, TVP=37.778, RECYCLE=ALL

COMPONENT DATA

LIBID 1,H2O/2,H2/3,METHANE/4,ETHANE/5,PROPENE/6,PROPANE/7,IBUTENE/ &

8,1BUTENE/9,C2BUTENE/10,T2BUTENE/11,13BD/12,IBUTANE/ &

13,BUTANE/14,IPENTANE/15,PENTANE/16,HEXANE

THERMODYNAMIC DATA

METHOD SYSTEM=PR, SET=PR01, DEFAULT

WATER DECANT=OFF

STREAM DATA

PROPERTY STREAM=W1, TEMPERATURE=40, PRESSURE=15, PHASE=M, &

RATE(M)=14.874, COMPOSITION(M)=2,73.16/3,9.25/4,8.23/5,0.02/ &

6,5.6/7,0.01/12,1.31/13,1.18/14,0.44/15,0.27/16,0.51, &

NORMALIZE

PROPERTY STREAM=S2, TEMPERATURE=40, PRESSURE=13.967, PHASE=M, &

RATE(LV)=46.2499, COMPOSITION(M)=5,0.47/6,1.17/7,19.72/ &

8,13.13/9,8.52/10,13.33/11,1.01/12,27.89/13,12.96/14,0.71/ &

15,0.56/16,0.53, NORMALIZE

PROPERTY STREAM=W3, TEMPERATURE=93.151, PRESSURE=14.126, PHASE=M, &

COMPOSITION(M,KGM/H)=2,2.13509E-24/3,4.25646E-17/ &

4,1.4874E-8/5,0.00621306/6,0.0805032/7,51.7415/8,35.0431/ &

9,26.4448/10,39.7821/11,2.72527/12,67.0635/13,38.7696/ &

14,2.8295/15,2.29712/16,2.4325

PROPERTY STREAM=S7, TEMPERATURE=32, PRESSURE=0.1, PHASE=M, &

RATE(M)=30444, COMPOSITION(M)=1,1

PROPERTY STREAM=S13, TEMPERATURE=26, PRESSURE=5, PHASE=M, &

RATE(WT)=77000, COMPOSITION(M)=1,1

PROPERTY STREAM=S18, TEMPERATURE=28.409, PRESSURE=13.921, PHASE=M, &

COMPOSITION(M,KGM/H)=2,2.13509E-24/3,4.25646E-17/ &

4,1.4874E-8/5,0.00621306/6,0.0805032/7,51.7415/8,35.0431/ &

9,26.4448/10,39.7821/11,2.72527/12,67.0635/13,38.7696/ &

14,2.8295/15,2.29712/16,2.4325

PROPERTY STREAM=S14, REFSTREAM=S1

PROPERTY STREAM=A2_REF, REFSTREAM=A2

UNIT OPERATIONS

MIXER UID=M4

FEED S2,W1

PRODUCT M=S29

HX UID=E2

HOT FEED=W3, M=S4, DP=0.2

COLD FEED=S29, M=S3, DP=0.2

CONFIGURE COUNTER

OPER HOCI=10

COLUMN UID=T11

PARAMETER TRAY=20,IO

FEED S3,1

PRODUCT OVHD(M)=W2,224.258, BTMS(M)=W3,269.216, SUPERSEDE=ON

CONDENSER TYPE=PART, PRESSURE=13.467, TEST=84.239

DUTY 1,1,-0.420788,CONDENSER

DUTY 2,20,,REBOILER

DUTY 3,20,1.62923,2

PA NAME=1, FROM=20, TO=20, PHASE=L, DNAME=2, LFRAC(M)=0.65

PRINT PROPTABLE=PART

ESTIMATE MODEL=CONVENTIONAL, RRATIO=0.4, CTEMP=84.239, &

TTEMP=89.472, BTEMP=92.045, RTEMP=93.151

TEMPERATURE 1,84.239/2,89.472/3,89.971/4,90.201/5,90.374/ &

6,90.518/7,90.642/8,90.75/9,90.845/10,90.931/ &

11,91.009/12,91.082/13,91.153/14,91.225/15,91.304/ &

16,91.397/17,91.521/18,91.708/19,92.045/20,93.151

PRESSURE 1,13.467/2,13.9/3,13.9075/4,13.9148/5,13.9222/ &

6,13.9297/7,13.937/8,13.9445/9,13.9519/10,13.9593/ &

11,13.9667/12,13.9741/13,13.9815/14,13.9889/ &

15,13.9964/16,14.0038/17,14.0112/18,14.0186/ &

19,14.026/20,14.126

VAPOR(M) 1,224.258/2,403.556/3,439.51/4,442.048/5,442.847/ &

6,443.394/7,443.844/8,444.236/9,444.586/10,444.902/ &

11,445.183/12,445.435/13,445.655/14,445.838/ &

15,445.972/16,446.033/17,445.979/18,445.716/ &

19,444.985/20,442.282

LIQUID(L,M) 1,672.772/2,708.725/3,711.263/4,712.062/5,712.609/ &

6,713.059/7,713.452/8,713.804/9,714.118/10,714.398/ &

11,714.654/12,714.874/13,715.054/14,715.187/ &

15,715.248/16,715.194/17,714.931/18,714.204/ &
 19,711.497/20,269.216
 SPEC ID=COL2SPEC1, STREAM=W3, RATE(KGM/H), COMP=2,4,WET, &
 DIVIDE, STREAM=W1, RATE(KGM/H),TOTAL,WET, &
 VALUE=1E-9
 SPEC ID=COL2SPEC2, RRATIO, VALUE=3
 VARY DNAME=CONDENSER,2
 TSIZE SECTION(1)=2,9,VALVE, DMIN=381
 TSIZE SECTION(2)=10,19,VALVE, DMIN=381
 TFLOW NET(V)=S16,2
 REBOILER TYPE=KETTLE
 SPLITTER UID=SP1
 FEED S7
 PRODUCT M=S8, M=S9
 OPERATION OPTION=FILL
 SPEC STREAM=S8, RATE(KGM/H),TOTAL,WET, DIVIDE, STREAM=S7, &
 RATE(KGM/H),TOTAL,WET, VALUE=0.228
 SPLITTER UID=SP2
 FEED S9
 PRODUCT M=S5, M=S11
 OPERATION OPTION=FILL
 SPEC STREAM=S5, RATE(KGM/H),TOTAL,WET, DIVIDE, STREAM=S9, &
 RATE(KGM/H),TOTAL,WET, VALUE=0.26
 SPLITTER UID=SP3
 FEED S11
 PRODUCT M=S21, M=S20
 OPERATION OPTION=FILL
 SPEC STREAM=S20, RATE(KGM/H),TOTAL,WET, DIVIDE, STREAM=S9, &
 RATE(KGM/H),TOTAL,WET, VALUE=0.091
 HXRIG UID=TC-44AB
 TYPE TEMA=AES, ORIENTATION=HORI, FLOW=COUN
 TUBES FEED=S8, M=S10, BWG=14, NUMBER=262, PATTERN=90, &
 MATERIAL=CS, FOUL=0.0003
 SHELL FEED=S16, M=S12, SERIES=2, MATERIAL=CS, FOUL=0.0002, &
 ID=540
 BAFFLE CUT=0.25, SPACING=150
 SNOZZLE NONE
 TNOZZLE NONE
 HXCALC DPSMETHOD=BELL, DPTMETHOD=BBM, HTCMETHOD=CHEN
 HXRIG UID=TC-42

TYPE TEMA=AES, ORIENTATION=HORI, FLOW=COUN
 TUBES FEED=S5, M=S13, NUMBER=136, FOUL=0.0002
 SHELL FEED=S18, M=S19, FOUL=0.0002
 BAFFLE CUT=0.417, SPACING=119
 SNOZZLE NONE
 TNOZZLE NONE
 HXCALC HTC METHOD=CHEN
 PUMP UID=P2
 FEED S19
 PRODUCT M=S17
 OPERATION DP=1
 SPLITTER UID=SP4
 FEED S17
 PRODUCT M=D1, M=S30
 OPERATION OPTION=FILL
 SPEC STREAM=D1, RATE(WT,KG/H),TOTAL,WET, DIVIDE, STREAM=S17, &
 RATE(WT,KG/H),TOTAL,WET, VALUE=0.75
 COLUMN UID=T3
 PARAMETER TRAY=66,IO=35
 FEED D1,35
 PRODUCT OVHD(M)=S1,5.19674, LDRAW(M)=D2,1,55.0004, BTMS(M)=D3, &
 141.715, SUPERSEDE=ON
 CONDENSER TYPE=MIX, PRESSURE=4.6668, TEST=43.103
 DUTY 1,1,-4.93384,CONDENSER
 DUTY 2,66,5.13637,2
 PRINT PROPTABLE=PART, ITERATION=NONE, PROFILE=NONE
 ESTIMATE MODEL=CONVENTIONAL, RRATIO=10, CTEMP=43.103, &
 TTEMP=49.776, BTEMP=61.893, RTEMP=63.189
 TEMPERATURE 1,43.103/2,49.776/3,49.939/4,50.095/5,50.248/ &
 6,50.4/7,50.551/8,50.702/9,50.851/10,51/11,51.148/ &
 12,51.296/13,51.443/14,51.59/15,51.737/16,51.884/ &
 17,52.032/18,52.181/19,52.332/20,52.486/21,52.644/ &
 22,52.806/23,52.973/24,53.148/25,53.331/26,53.523/ &
 27,53.727/28,53.944/29,54.175/30,54.422/31,54.687/ &
 32,54.974/33,55.288/34,55.647/35,56.123/36,56.219/ &
 37,56.317/38,56.416/39,56.516/40,56.618/41,56.722/ &
 42,56.828/43,56.936/44,57.047/45,57.161/46,57.277/ &
 47,57.397/48,57.521/49,57.649/50,57.783/51,57.923/ &
 52,58.07/53,58.225/54,58.391/55,58.568/56,58.759/ &
 57,58.966/58,59.193/59,59.441/60,59.716/61,60.021/ &

62,60.364/63,60.758/64,61.233/65,61.893/66,63.189
 PRESSURE 1,4.6668/2,5.7/3,5.70934/4,5.71867/5,5.72801/ &
 6,5.73735/7,5.74669/8,5.75602/9,5.76536/10,5.7747/ &
 11,5.78403/12,5.79338/13,5.80272/14,5.81206/ &
 15,5.82139/16,5.83073/17,5.84007/18,5.8494/ &
 19,5.85874/20,5.86808/21,5.87742/22,5.88675/ &
 23,5.89609/24,5.90543/25,5.91476/26,5.9241/ &
 27,5.93344/28,5.94278/29,5.95211/30,5.96145/ &
 31,5.9708/32,5.98013/33,5.98947/34,5.99881/ &
 35,6.00815/36,6.01748/37,6.02682/38,6.03616/ &
 39,6.04549/40,6.05483/41,6.06417/42,6.0735/ &
 43,6.08284/44,6.09218/45,6.10152/46,6.11085/ &
 47,6.12019/48,6.12953/49,6.13886/50,6.14821/ &
 51,6.15755/52,6.16689/53,6.17622/54,6.18556/ &
 55,6.1949/56,6.20423/57,6.21357/58,6.22291/ &
 59,6.23225/60,6.24158/61,6.25092/62,6.26026/ &
 63,6.26959/64,6.27893/65,6.28827/66,6.29761
 VAPOR(M) 1,5.19674/2,1103.5/3,1159.19/4,1158.3/5,1157.41/ &
 6,1156.51/7,1155.63/8,1154.75/9,1153.89/10,1153.04/ &
 11,1152.22/12,1151.41/13,1150.61/14,1149.84/ &
 15,1149.09/16,1148.35/17,1147.62/18,1146.9/ &
 19,1146.18/20,1145.47/21,1144.75/22,1144.01/ &
 23,1143.26/24,1142.47/25,1141.65/26,1140.78/ &
 27,1139.85/28,1138.86/29,1137.78/30,1136.62/ &
 31,1135.35/32,1133.96/33,1132.41/34,1130.57/ &
 35,1127.97/36,1170.63/37,1170.52/38,1170.4/ &
 39,1170.26/40,1170.1/41,1169.94/42,1169.74/ &
 43,1169.54/44,1169.31/45,1169.07/46,1168.8/ &
 47,1168.52/48,1168.2/49,1167.87/50,1167.49/ &
 51,1167.09/52,1166.64/53,1166.16/54,1165.61/55,1165/ &
 56,1164.32/57,1163.55/58,1162.69/59,1161.71/ &
 60,1160.59/61,1159.31/62,1157.84/63,1156.1/64,1153.9/ &
 65,1150.6/66,1143.24
 LIQUID(L,M) 1,1043.3/2,1098.99/3,1098.1/4,1097.21/5,1096.32/ &
 6,1095.43/7,1094.55/8,1093.69/9,1092.85/10,1092.02/ &
 11,1091.21/12,1090.42/13,1089.64/14,1088.89/ &
 15,1088.15/16,1087.42/17,1086.7/18,1085.99/ &
 19,1085.27/20,1084.55/21,1083.82/22,1083.06/ &
 23,1082.28/24,1081.45/25,1080.58/26,1079.66/ &
 27,1078.66/28,1077.58/29,1076.42/30,1075.15/ &

31,1073.76/32,1072.21/33,1070.37/34,1067.78/ &
 35,1312.34/36,1312.24/37,1312.11/38,1311.98/ &
 39,1311.82/40,1311.65/41,1311.46/42,1311.25/ &
 43,1311.03/44,1310.79/45,1310.52/46,1310.23/ &
 47,1309.92/48,1309.58/49,1309.21/50,1308.81/ &
 51,1308.36/52,1307.87/53,1307.33/54,1306.72/ &
 55,1306.04/56,1305.27/57,1304.4/58,1303.42/59,1302.3/ &
 60,1301.03/61,1299.55/62,1297.81/63,1295.62/ &
 64,1292.32/65,1284.96/66,141.715

SPEC ID=X1, REFLUX(LV,M3/H), VALUE=105

SPEC ID=X2, STREAM=D3,PCT(LV), COMP=12,WET, VALUE=4

VARY DNAME=CONDENSER,2

TFLOW NET(V)=S14,2

METHOD SET=PR01

HXRIG UID=TC-48AB

TYPE TEMA=AEU, ORIENTATION=HORI, FLOW=COUN, AREA=389.3

TUBES FEED=S21, M=S23, BWG=14, PATTERN=30, FOUL=0.0002

SHELL FEED=S14, M=S24, SERIES=2, FOUL=0.0002, DPSCALER=0.8

SNOZZLE NONE

TNOZZLE NONE

HXCALC DPSMETHOD=BELL, DPTMETHOD=BBM, HTCMETHOD=CHEN

HXRIG UID=TC-51AB

TYPE TEMA=AEU, ORIENTATION=HORI, FLOW=COUN, AREA=12

TUBES FEED=S20, M=S22, LENGTH=4.834, BWG=14, PATTERN=90, &
 FOUL=0.0002

SHELL FEED=D3, M=S25, FOUL=0.0002

SNOZZLE NONE

TNOZZLE NONE

HXCALC HTCMETHOD=CHEN

MIXER UID=M3

FEED S22,S23

PRODUCT M=S27

HXRIG UID=TC-41

TYPE TEMA=AEU, ORIENTATION=HORI, FLOW=COUN

TUBES FEED=S13, M=S15, BWG=14, NUMBER=254, PATTERN=90, &
 MATERIAL=CS, FOUL=0.0002

SHELL FEED=S4, M=S18, MATERIAL=CS, FOUL=0.0002

BAFFLE CUT=0.25, SPACING=313

SNOZZLE NONE

TNOZZLE NONE

```

    HXCALC HTCMETHOD=CHEN
MIXER UID=M1
    FEED S27,S15
    PRODUCT M=S26
MIXER UID=M2
    FEED S26,S10
    PRODUCT M=A1
CALCULATOR UID=CA2
    CONSTANT 1,1.88/2,0.261/3,-118281/4,2663/5,88555
    RESULT 1,SAIDA AGUA RESFRIAMENTO
    DEFINE P(1) AS STREAM=A1, TEMPERATURE(C)
    PROCEDURE
        
$$R(1)=(C(1)*P(1)*C(2)+(C(3)/C(4)-C(5)/C(4))*(C(2)-1))/(C(1)+1-C(2))$$

    RETURN
FLASH UID=F1
    FEED A1
    PRODUCT W=A2
    ISO PRESSURE=0.1
    DEFINE TEMP(C) AS CALCULATOR=CA2, R(1)
PUMP UID=P1
    FEED A2_REF
    PRODUCT M=S7
    OPERATION PRATIO=5
END

```