



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI**  
**CAMPUS ALTO PARAOPEBA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**Modelagem de uma torre de resfriamento Combinado**

Ouro Branco - MG

2013



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI**  
**CAMPUS ALTO PARAOPEBA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**Modelagem de uma torre de resfriamento de combinado**

**Autor: Ediane de Sá Alves**

**Monografia apresentada ao Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São João Del-Rei como parte dos requisitos necessários à convalidação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química.**

**Ouro Branco - MG**

**2013**

MONOGRAFIA SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA CONVALIDAÇÃO DA DISCIPLINA TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO.

AVALIADORES:

---

Prof. Juan Canellas Bosch Neto  
Orientador (DEQUE/CAP/UFSJ)

---

Prof. Patrícia  
(DEQUE /CAP/UFSJ)

## SUMÁRIO

<b>Ouro Branco - MG .....</b>	I
<b>Ouro Branco - MG .....</b>	II
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	9
<b>2. MODELOS DE TORRE DE RESFRIAMENTO.....</b>	10
<b>2.1 TORRE EVAPORATIVA.....</b>	10
<b>2.2 TORRE NÃO EVAPORATIVA.....</b>	11
<b>2.3 TORRE DE RESFRIAMENTO COMBINADO .....</b>	11
<b>2.4 TORRE DE TIRAGEM MECÂNICA.....</b>	12
<b>2.5 TORRE DE TIRAGEM NATURAL OU ATMOSFÉRICA.....</b>	12
<b>2.6 TORRES CONTRA CORRENTE .....</b>	13
<b>2.7 TORRE DE CORRENTE CRUZADA.....</b>	13
<b>3. DEFINIÇÃO DE GRANDEZAS BÁSICAS .....</b>	13
<b>3.1 PSICROMETRIA.....</b>	13
<b>3.2 PRESSÃO PARCIAL DE VAPOR .....</b>	13
<b>3.3 TEMPERATURA DE BULBO SECO.....</b>	13
<b>3.4 TEMPERATURA DE BULBO ÚMIDO.....</b>	14
<b>3.5 ENTALPIA.....</b>	14
<b>3.6 CALOR SENSÍVEL.....</b>	14
<b>3.7 CALOR LATENTE .....</b>	15
<b>4. CONCEITOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E DE MASSA ENTRE AR E A ÁGUA .....</b>	15
<b>5. FUNCIONAMENTO DA TORRE .....</b>	16
<b>6. MODELAGEM FÍSICA E MATEMÁTICA DO PROCESSO.....</b>	17
<b>6.1 BALANÇO DE MASSA .....</b>	18
<b>6.2 BALANÇO DE ENERGIA .....</b>	19
<b>7. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	20
<b>7.1 DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO .....</b>	20
<b>7.2 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO.....</b>	22
<b>7.2.1 Módulo de troca térmica .....</b>	22
<b>7.2.2 Módulo tanque/ventilador.....</b>	23
<b>7.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....</b>	24
<b>8. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	26
<b>9. PERSPECTIVAS .....</b>	28
<b>10. Conclusão .....</b>	29
<b>11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS: .....</b>	30

## **Lista de Tabelas**

8.1	Constantes utilizadas nos cálculos .....	26
8.2	Valores obtidos nos experimentos .....	27
8.3	Resultados Alcançados .....	28

## **Lista de figuras**

2.1	Torre de resfriamento evaporativa .....	10
2.2	Torre de resfriamento Combinado .....	11
2.3	Torre de resfriamento de tiragem natural ou atmosférica.....	12
4.1	Transferência de calor na interface ar – água.....	16
5.1	Transferência da calor na água, no spray e no ar .....	17
6.1	Volume de controle para a construção do balanço de massa e energia .....	18
7.1	Sistema de troca termica utilizado para obter os dados do trabalho .....	21
7.2	Módulo de troca térmica .....	22
7.3	Módulo tanque/ventilador, apenas ilustrativa .....	23

## **Resumo**

Neste trabalho é apresentado o funcionamento de uma torre de resfriamento combinada evaporativa e não evaporativa, foi desenvolvido modelo matemático do desempenho de um conjunto de torres de resfriamento combinada em sistema de resfriamento do forno elétrico de uma indústria siderúrgica, a fim de quantificar a massa de água que evapora e a influência desta evaporação na remoção do calor da água quente que circula na torre. Por meio do modelo foi possível perceber que a quantidade de água que evapora durante a operação da torre está em torno de 1,89% de toda a água que recircula na torre, sendo esta evaporação a principal forma de remoção da carga térmica presente na água a ser resfriada.

## **Abstract**

This study presents the operation of a combined evaporative and non-evaporative cooling towers, a model of tower with few studies in literature, but with great potential for application in industry. A mathematical model of a set of combined cooling towers performance in a steel industry electric furnace cooling system was developed in order to quantify the water evaporation and its influence in the heat removal from the hot water that circulates in the tower. Through the model was observed that the amount of water that evaporates during operation of the tower is about 1.89% of the recirculating water in the tower and this evaporation principal means of removing the heat load in the water to be cooled.

## **1. INTRODUÇÃO**

Em diferentes processos industriais é necessária a remoção de calor de equipamentos para se realizar o controle de temperatura dos mesmos, como condensadores de torres de destilação, refriadores de gás em compressores, resfriamento de produtos para armazenagem em tanque, retirada de calor de reação em reatores e muitos outros processos (SILVA,2009).

O fluido geralmente utilizado para dissipar esse calor gerado é a água, devido às suas características físicas (alto calor específico, baixa viscosidade, alta condutibilidade térmica e alta densidade), além da facilidade de obtenção e da sua toxicidade. Após sua utilização pode-se eliminar a água do sistema, ou então, resfriá-la e reutilizá-la no sistema de resfriamento novamente. O princípio de recirculação é amplamente utilizado, seja pelos benefícios econômicos, pois muitas vezes é necessário o tratamento desta água antes de retorná-la para seu manancial ou pela crescente limitação na captação de água que as indústrias vem enfrentando, logo a redução do volume utilizado tem se mostrado a melhor alternativa (WAKI,2009).

Dentre as várias metodologias de resfriamento de água existentes, surgiu a torre de resfriamento, um equipamento que utiliza processos de evaporação e transferência de calor sensível para resfriar a água. O modelo de torre mais conhecido e utilizado é a torre evaporativa, onde a água aquecida é gotejada na parte superior da torre e desce lentamente através do “enchimento” em contracorrente com uma corrente de ar frio (normalmente à temperatura ambiente). A fim de acelerar a troca térmica entre a água que se pretende resfriar e o ar, a torre aumenta a área e o tempo de contato dos fluidos, facilitando a transferência de calor. Entretanto, é percebido um aumento no número de outros modelos de torre de resfriamento utilizados na indústria em geral(LIMA JUNIOR, 2009). O presente trabalho irá discutir os fenômenos de troca de massa e calor em torre de troca combinada.

Neste modelo de torre, o fluido a ser resfriado circula internamente às serpentinhas do trocador de calor, não sofre contato com o ar ambiente, nem se evapora. O calor do fluido do processo passa através das paredes da serpentina para água de recirculação, que é levada para baixo em cascatas sobre as paredes dos tubos. O ar é forçado para cima através dos tubos, evaporando uma pequena porcentagem de água de recirculação, absorvendo o calor latente de vaporização, dispersando o calor na atmosfera(FACÃO,1999).

Este modelo de torre apresenta a vantagem de todo o processo de troca térmica ocorrer de forma indireta, evitando sua contaminação e perdas por evaporação, logo se torna um ótima opção para processos que utilizam água com um tratamento especial, consequentemente, mais caras, como a água desmineralizada utilizada no resfriamento de equipamentos de cobre.

Na literatura porém, são poucos os textos que abordam este modelo de torre de resfriamento. A fim de se conhecer melhor o desempenho deste equipamento um modelo matemático foi desenvolvido no presente trabalho descrevendo seu funcionamento.

## 2. MODELOS DE TORRE DE RESFRIAMENTO

Existe uma infinidade de modelos de torres de resfriamento disponível no mercado de formas e tamanhos variados, podendo ser classificadas pelo processo de transferência de calor (evaporativa ou não evaporativa), pelo modo de fornecimento de ar para a torre (forçada ou natural) e de acordo com a direção da corrente de ar (cruzada ou contra corrente) (LIMA JUNIOR, 2009).

### 2.1 TORRE EVAPORATIVA

A troca térmica ocorre pelo contato direto da água com o ar e durante este contato parte da corrente de água evapora, fazendo a temperatura da água diminuir. Desta forma, o ar sai da torre com maior umidade e temperatura. Este modelo de torre é amplamente encontrado por permitir maior transmissão de calor (OLIVEIRA, 2010).

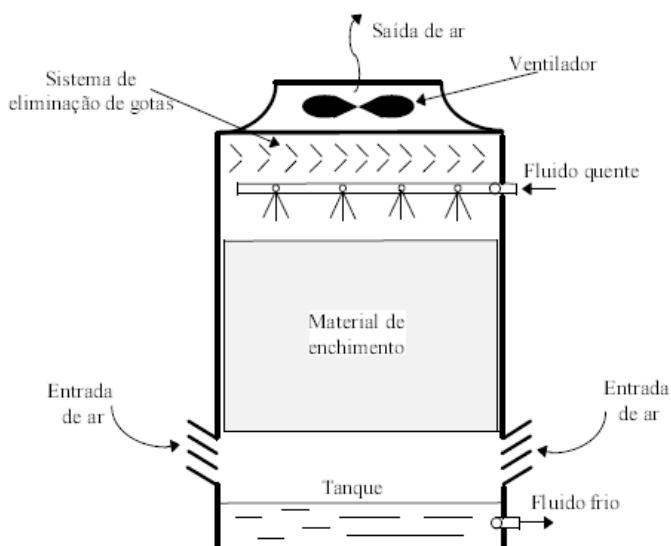


Figura 2.1: Torre de resfriamento evaporativa

Fonte: Facão (1999)

## 2.2 TORRE NÃO EVAPORATIVA

Não ocorre contato direto entre o ar e a água, sendo assim, a água é inteiramente resfriada por calor sensível, ou seja, um trocador de calor indireto. Nas torres de resfriamento não-evaporativas, a água quente ou vapor de exaustão de turbinas passa por uma serpentina em contato com o ar aspirado por ventiladores. (TREYBAL, 1981).

## 2.3 TORRE DE RESFRIAMENTO COMBINADO

Assim como as torres não evaporativas, o fluido quente passa pelo interior de serpentinas impedindo seu contato com o ambiente externo. Nesta serpentina é aspergida água que absorve o calor cedido. Por não ocorrer o contato do fluido com o ambiente evita-se a contaminação da água de processo com as impurezas do ar, como poeira e microrganismos, bem como a concentração de sólidos na água de processo e as incrustações nos equipamentos por onde ela circula, além de minimizar as despesas com tratamento de água(OLIVEIRA, 2010).

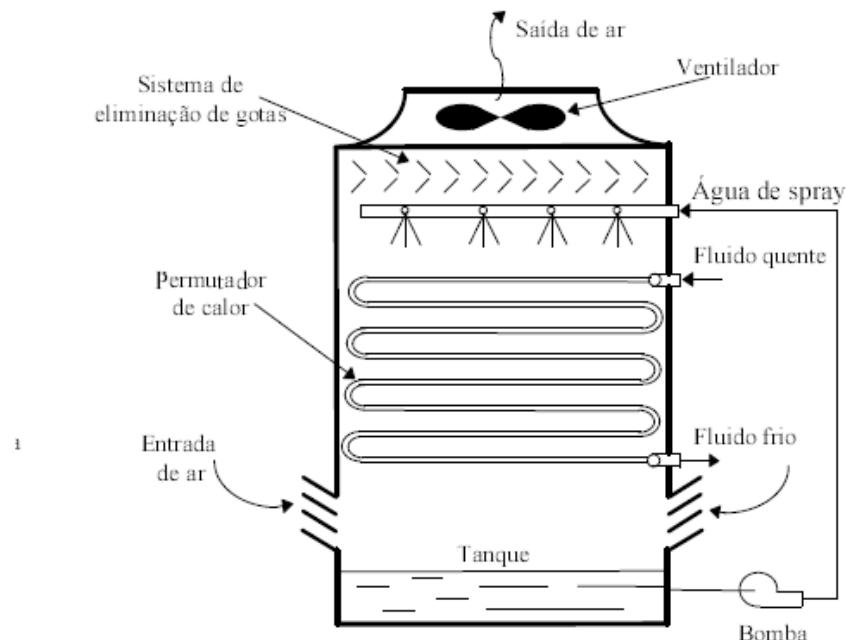


Figura 2.2 - Torre de resfriamento Combinado

Fonte: Facão (1999)

## 2.4 TORRE DE TIRAGEM MECÂNICA

Neste modelo, um ventilador é utilizado para promover a passagem de ar pela torre. O ventilador pode ser instalado no topo ou na base do equipamento, e dependendo da localização do ventilador a tiragem é induzida ou forçada. No primeiro tipo, o ventilador se encontra na base da torre onde o ar entra, fazendo com que o mesmo seja insuflado para dentro do equipamento. Na tiragem forçada, o ventilador funciona como um exaustor forçando a passagem de ar pela torre. Este último modelo é geralmente mais eficiente, já que a velocidade da corrente de ar é convertida em pressão estática, realizando um trabalho útil. Além disso, o ventilador trabalha com ar frio em densidade maior que no caso da tiragem induzida(WAKI,2009).

## 2.5 TORRE DE TIRAGEM NATURAL OU ATMOSFÉRICA

Neste tipo de torre, o movimento do ar é criado pela diferença de densidade do ar frio e seco do exterior da torre, com o ar úmido e quente do interior da torre, sendo que o ar entra pelo fundo da torre e sai aquecido e umidificado pelo topo. Caso a temperatura do ar ou sua umidade relativa aumente, o funcionamento da torre estará comprometido. Normalmente, essas torres são utilizadas em climas frios, onde o ar ambiente possui uma temperatura bem menor que a da água quente. São ainda mais cumpridas e estreitas quando comparadas com as torres de tiragem mecânica. Seu custo inicial é maior, e pode ser ineficiente quando o ar tem velocidade baixa, mas o seu custo de operação é muito reduzido por não ser necessário fornecer energia para o funcionamento dos ventiladores (FOUST,1982).

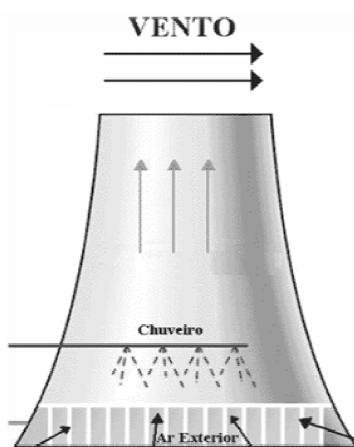


Figura 2.3 - Torre de resfriamento de tiragem natural ou atmosférica.

## **2.6 TORRES CONTRA CORRENTE**

Neste modelo, a água e o ar se cruzam no mesmo direção, porém com sentidos contrários, a água desce do topo para a base da torre e o ar segue da base para o topo.

## **2.7 TORRE DE CORRENTE CRUZADA**

A torre possui aberturas laterais por onde entra o ar, e passa perpendicularmente com à água quente que desce do topo(SILVA, 2009).

O enfoque deste trabalho serão os modelos de torre de resfriamento combinado de tiragem mecânica em contra corrente.

## **3. DEFINIÇÃO DE GRANDEZAS BÁSICAS**

### **3.1 PSICROMETRIA**

A psicrometria é o estudo das propriedades termodinâmicas de misturas de ar seco e de vapor de água e é utilizada para analisar os processos que envolvem ar úmido. Desta forma, é possível descrever o comportamento de um sistema ar-água e determinar suas propriedades. A seguir estão apresentados alguns conceitos básicos da psicrometria. (ALMEIDA, 2008)

### **3.2 PRESSÃO PARCIAL DE VAPOR**

A pressão parcial de vapor é a pressão exercida pelo vapor de água no ar úmido. O ar úmido é uma mistura de ar seco e vapor de água, e embora a mistura de ar seco e água não siga rigorosamente a lei dos gases ideais, esta permanece uma boa aproximação do comportamento do ar úmido a pressões baixas (ALMEIDA, 2008).

### **3.3 TEMPERATURA DE BULBO SECO**

É a temperatura do ar medida com um termômetro comum, não sendo influenciada pela umidade relativa do ar (McCABE, 2005).

### **3.4 TEMPERATURA DE BULBO ÚMIDO**

É a temperatura mais baixa que pode atingir o ar úmido e é medida por um termômetro com um algodão umedecido. Quando o ar não está saturado, algum líquido se evapora, o líquido que resta no algodão se resfria por ter cedido o calor necessário para a mudança de fase. A temperatura indicada no termômetro é a temperatura de bulbo úmido, que é geralmente menor que a temperatura de bulbo seco, exceto quando o ar está saturado, neste caso as duas temperaturas são iguais (McCABE, 2005).

### **3.5 ENTALPIA**

Entalpia é uma propriedade de um corpo ou fluido, refere-se à energia que ele possui. Para uma mistura de gases perfeitos é igual à soma das entalpias de cada componente. Assim, a entalpia do ar úmido a uma dada temperatura é a entalpia do ar seco mais a entalpia do vapor de água presente (SMITH, 2007).

### **3.6 CALOR SENSÍVEL**

Calor sensível é a quantidade de calor necessária para variar a temperatura de um corpo sem que haja variação do estado físico da matéria, ou seja, se um corpo está no estado sólido, sua temperatura pode variar para mais ou para menos e seu estado de agregação das moléculas continua o mesmo (sólido) (INCROPERA, 2008):

A equação que mede a quantidade de calor cedida ou recebida por um corpo é:

$$Q = m \cdot C \cdot \Delta T \quad (1)$$

Onde:

Q = quantidade de calor;

M = massa da substância;

C = calor específico;

$\Delta T$  = variação da temperatura.

O calor específico é a quantidade de calor necessária para variar um grau Célsius a temperatura de um corpo. Essa grandeza é específica de cada material.

### **3.7 CALOR LATENTE**

É a quantidade de calor necessária para variar o estado físico da matéria sem variar a temperatura. Como exemplo têm-se o derretimento do gelo, onde podemos analisar a água no estado líquido e no estado sólido à mesma temperatura(INCROPERA, 2008).

O calor latente pode ser calculado usando a equação:

$$Q = m \cdot L \quad (2)$$

Onde:

Q = quantidade de calor;

M = massa da substância;

L = calor latente.

## **4. CONCEITOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E DE MASSA ENTRE AR E A ÁGUA**

A transferência de calor e de massa é o princípio fundamental do funcionamento de uma torre de resfriamento. Para entender esta transferência pode-se considerar uma gota suspensa no ar(FOUST, 1982).

A interface entre a gota e o ar apresenta propriedades específicas. Considere-se que as duas fases estão em equilíbrio e não há resistência ao transporte de calor e massa, mas existe um gradiente de temperatura e massa entre as fases. Admite-se que a temperatura na interface do ar e da água são iguais, pois a resistência à transferência de massa na fase líquida é desprezível com relação a fase ar(CREMASCO,1998).

Ao se colocar em contato uma corrente de água quente com uma corrente de ar, o calor é transferido da fase líquida para o gás por meio da evaporação de parte da água para o ar. A transferência de massa e calor está representada na figura 4.1.

A umidade absoluta na interface é maior que a umidade média do ar, isso é a força motriz para a transferência de massa do vapor de água para o ar. A temperatura do ar é menor que a temperatura da água que está saindo, desta forma, ocorre transferência de calor sensível para o ar. Quando o ar está no topo da torre, após percorrer seu interior, está com elevada temperatura e pressão de vapor, consequentemente, o valor da umidade relativa cai,

ocorrendo a evaporação do spray e a diminuição da temperatura da água(LIMA JUNIOR, 2009).

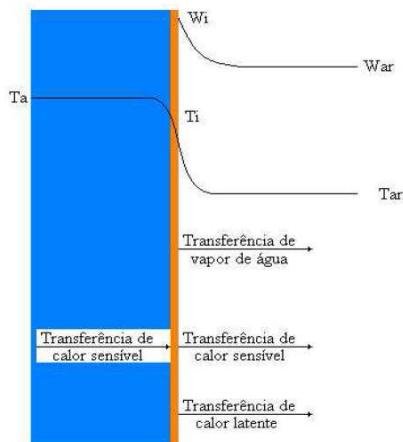


Figura 4.1 - transferência de calor na interface ar – água.

Fonte: Lima Junior (2009).

## 5. FUNCIONAMENTO DA TORRE

O fluido a ser resfriado circula internamente aos tubos da torre de resfriamento, o que impede o contato do mesmo com o ambiente, e na parte superior da torre entra água fria, água de recirculação ou água do spray, que é aspergida na serpentina e desce pela torre, o calor do fluido do processo passa através das paredes da serpentina para água de recirculação, a presença da água na parede do tubo proporcionando uma troca de calor mais efetiva da água quente com a vizinhança. A água do spray é colhida em uma caixa no fundo da torre e é recirculada para novamente resfriar a serpentina. O ar entra pela parte inferior da torre e flui para cima através da água descendente, um ventilador insufla o ar através do equipamento. A corrente de ar proporciona maior troca térmica, evaporando uma pequena porcentagem de água de recirculação, absorvendo o calor sensível e latente de vaporização, lançando o calor na atmosfera(SEMCO,2009).

A figura 5.1 representa a variação de temperatura tanto da água quente, quanto do spray. A medida que a água percorre a serpentina sua temperatura vai diminuindo, a água no interior do tubo transfere calor por convecção até a superfície do tubo, este calor é transferido por condução pela espessura do mesmo e então é transmitido para a água do spray que escorre pela serpentina. Essa água recebe o calor do processo e o transmite por convecção até a interface da água com o ar, assim como em uma torre de resfriamento evaporativa a

água de recirculação troca calor e massa com o ar, retirando o calor e dispersando-o para o meio ambiente(GEANKOPLIS, 1998).

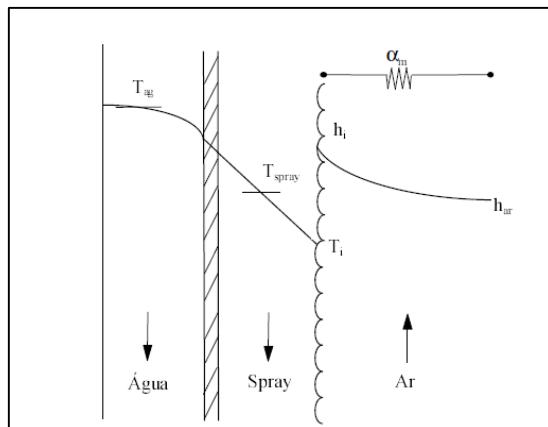


Figura 5.1: transferência da calor na água, no spray e no ar.

Fonte: Facão(1999).

A água a ser resfriada perde calor apenas sensível enquanto a água do spray troca tanto calor sensível quanto calor latente da sua evaporação, porém, a variação de temperatura da água de spray é insignificante, fato que será apresentado nos valores de dados obtidos nos experimentos. Essas ocorrências estão relacionadas ao tamanho do reservatório da torre, e por ele ser pequeno o calor que é absorvido pelo spray não é dissipado até ele ser novamente aspergido na serpentina.

## 6. MODELAGEM FÍSICA E MATEMÁTICA DO PROCESSO

Os balanços de massa e energia apresentados seguem as seguintes hipóteses:

- 1- A torre é termicamente isolada, despreza-se a transferência de calor através do corpo da torre de arrefecimento.
- 2- O feixe de tubos completamente molhado, e de modo uniforme.
- 3- Escoamento do ar uniforme.
- 4- Propriedades físicas constantes ( $\rho$ ,  $C_{p,ag}$ ,  $C_{p,ar}$ ).
- 5- Coeficiente de transferência de massa e calor constantes ao longo do feixe de tubos.
- 6- Análise em regime permanente.

Sendo o pontilhado da figura 6.1 a superfície do volume de controle.

## 6.1 BALANÇO DE MASSA

Massa de água interior do tubo.

$$\dot{m}_{ag,ent} = \dot{m}_{ag,sai} = \dot{m}_{ag} \quad (3)$$

Massa de água no exterior do tubo, onde  $\dot{m}_{evap}$  representa a quantidade de água evaporada do sistema.

$$\dot{m}_{spray,ent} = \dot{m}_{spray,sai} + \dot{m}_{evap} \quad (4)$$

Massa de ar que atravessa a torre.

$$\dot{m}_{ar,ent} = \dot{m}_{ar,sai} = \dot{m}_{ar} \quad (5)$$

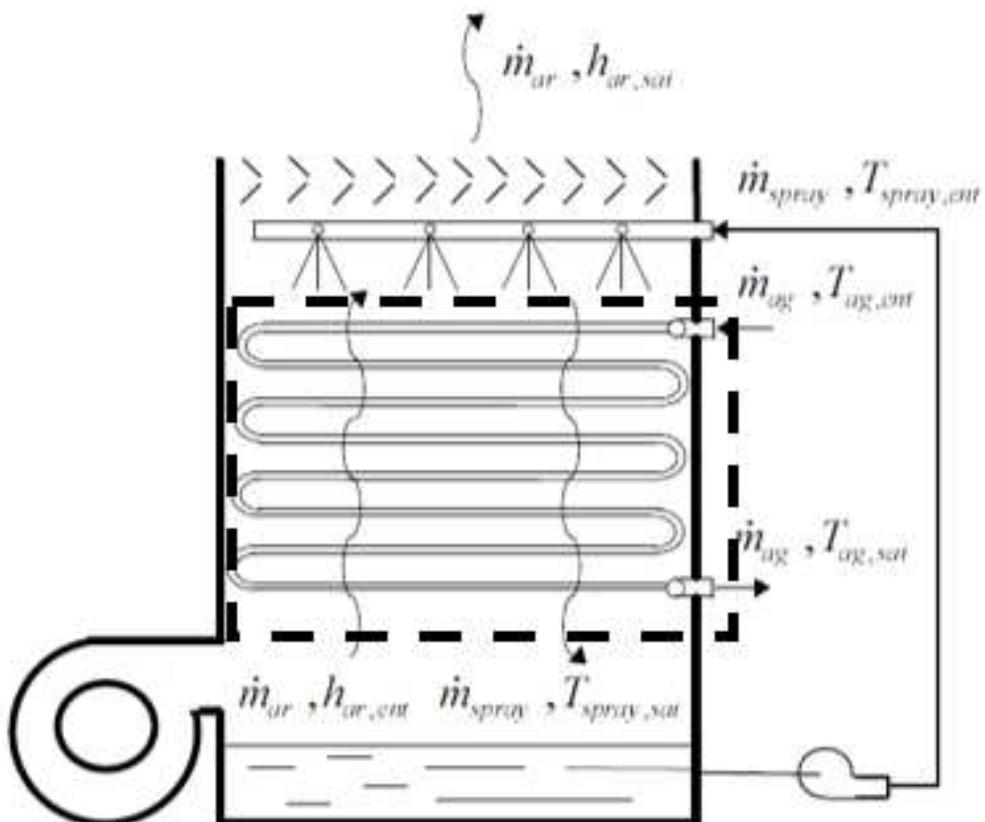


Figura 6.1 - Volume de controle para a construção do balanço de massa e energia.

## 6.2 BALANÇO DE ENERGIA

Como não há geração ou consumo de energia toda a energia que entra no sistema é transferida da água que passa pela serpentina para a água de spray e o ar.

$$\dot{m}_{ag} \cdot h_{ag,ent} + \dot{m}_{spray,ent} \cdot h_{spray,ent} + \dot{m}_{ar} \cdot h_{ar,ent} = \dot{m}_{ag} \cdot h_{ag,sai} + \dot{m}_{spray,sai} \cdot h_{spray,sai} + \dot{m}_{ar} \cdot h_{ar,sai} \quad (6)$$

Substituindo a eq. (4) na eq. (6),

$$\dot{m}_{ag} \cdot h_{ag,ent} + \dot{m}_{spray,ent} \cdot h_{spray,ent} + \dot{m}_{ar,ent} \cdot h_{ar,ent} = \dot{m}_{ag} \cdot h_{ag,sai} + \dot{m}_{spray,ent} \cdot h_{spray,sai} - \dot{m}_{evap} \cdot h_{spray,sai} + \dot{m}_{ar} \cdot h_{ar,sai} \quad (7)$$

Simplificando,

$$\dot{m}_{ag}(h_{ag,ent} - h_{ag,sai}) + \dot{m}_{spray,ent}(h_{spray,ent} - h_{spray,sai}) + \dot{m}_{ar}(h_{ar,ent} - h_{ar,sai}) + \dot{m}_{evap} \cdot h_{evap} = 0 \quad (8)$$

Sabendo que,

$$h = c_p \cdot \Delta T \quad (9)$$

$$\dot{m}_{ag} \cdot c_{p,ag}(T_{ag,ent} - T_{ag,sai}) + \dot{m}_{spray,ent} \cdot c_{p,ag}(T_{spray,ent} - T_{spray,sai}) + \dot{m}_{ar} \cdot c_{p,ar}(T_{ar,ent} - T_{ar,sai}) + \dot{m}_{evap} \cdot h_{evap} = 0 \quad (10)$$

Ao realizar os experimentos, observou-se que:

$$T_{spray,ent} = T_{spray,sai} \quad (11)$$

Então, a equação 10 pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\dot{m}_{ag} \cdot C_{p,ag} (T_{ag,ent} - T_{ag,sai}) + \dot{m}_{ar} \cdot C_{p,ar} (T_{ar,ent} - T_{ar,sai}) + \dot{m}_{evap} \cdot h_{evap} = 0 \quad (12)$$

Isolando a massa de água que evapora temos:

$$\dot{m}_{evap} = \frac{\dot{m}_{ag} \cdot C_{p,ag} (T_{ag,ent} - T_{ag,sai}) + \dot{m}_{ar} \cdot C_{p,ar} (T_{ar,ent} - T_{ar,sai})}{h_{evap}} \quad (13)$$

## 7. MATERIAIS E MÉTODOS

### 7.1 DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO

A instalação utilizada nos experimentos é a estação de tratamento de água de troca térmica indireta do Forno Elétrico, em um indústria siderúrgica. A planta possui capacidade nominal total do sistema implantado de 1200m<sup>3</sup>/h e foi projetada para resfriar o efluente de 50°C para 35°C, por meio de torres de resfriamento combinado. Após resfriada, a água retorna ao sistema de troca térmica indireta do alto forno elétrico da usina, que passa pela carcaça do forno, por meio de tubulações que são distribuídas por toda a estrutura do forno. Desta maneira, a água percorre resfriando o equipamento, sendo que a água utilizada no sistema é desmineralizada e não tem nenhum contato direto com o equipamento, o que justifica a utilização de uma torre de troca térmica indireta.

O efluente que vem do sistema de troca térmica indireta do alto forno elétrico chega ao sistema de resfriamento constituído de três torres em operação e um módulo de reserva. Com a finalidade principal de manter o circuito pressurizado e também complementação de água (reposição), foi instalado a montante das bombas de retorno do processo (após as torres) um tanque de compensação. Este tanque apresenta-se parcialmente pressurizado por nitrogênio e pela água de compensação (neste circuito desmineralizada). O mesmo mantém o circuito estável para sempre trabalhar nas condições de pressão desejadas e fornecer água caso ocorra uma perda não prevista ou não localizada.

Seu funcionamento se dá como se segue:

- a) A água de reposição vinda do reservatório de água desmineralizada alimenta o tanque sob uma pressão maior do que a do circuito e é mantida por sistema de válvulas.
- b) O nível de água é mantido entre 50 e 60% da capacidade do tanque de compensação sendo o restante preenchido por nitrogênio.

- c) O nitrogênio garante que a pressão no tanque esteja equalizada com a pressão do circuito.
  - d) Ocorrendo redução na pressão do circuito, o nitrogênio força a alimentação da água para o mesmo, evitando a falta de fluxo.
  - e) Quando o nível do tanque atinge valores abaixo de 50%, as válvulas de entrada de água são abertas e assim se mantém, até que o nível do tanque de compensação retorne ao seu valor normal.
  - f) Qualquer perda de nitrogênio que venha a ocorrer é compensada por sua respectiva linha de alimentação.
  - g) Quando ocorrer acréscimo de pressão no circuito, o tanque de compensação irá absorvê-la e liberar parte do nitrogênio presente em seu interior equalizando a pressão do sistema.

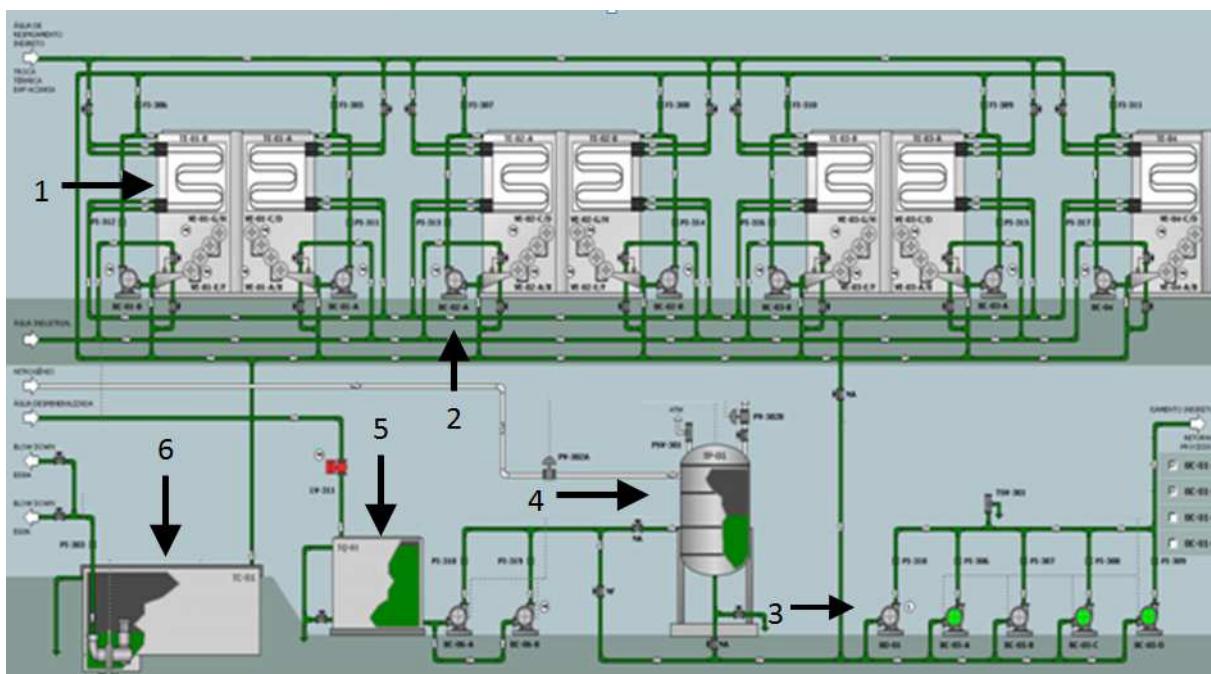


Figura 7.1 - Sistema de troca térmica utilizado para obter os dados do trabalho.

- 1- Torre de resfriamento combinado;
  - 2- Bomba que recircula água de spray;
  - 3- Bomba que envia água para resfriar o forno elétrico;
  - 4- Tanque de compensação;
  - 5- Tanque de água desmineralizada;
  - 6- Tanque que recebe a purga da torres de resfriamento.

Para evitar a concentração de sais no circuito, uma purga foi instalada. A mesma direciona tal fluxo para um poço de recebimento com um tempo de detenção hidráulico de aproximadamente 1 (uma) hora, uma bomba é acionada, a qual direciona este fluxo para a bacia das torres de outro sistema de troca térmica instalado nesta mesma estação de tratamento de efluente, como água de reposição, por ser um sistema que utiliza uma água menos nobre.

A água fria que sai das torres de resfriamento combinado retorna através de bombas, para o sistema de troca térmica indireta do alto forno elétrico da Usina. A figura 7.1 traz um diagrama de todo o sistema de troca térmica.

## 7.2 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

A água a ser resfriada é distribuída igualmente em de 4 torres em paralelo, sendo três de 2 módulos e uma de apenas 1 módulo. Cada módulo possui 4 ventiladores, um tanque de 1,500 m<sup>3</sup>, e as seguintes dimensões. Comprimento 3,545, largura 2,397 e altura 2,477. As torres possuem dois módulos: o de troca térmica e o módulo tanque/ventilador (SEMCO,2009).

### 7.2.1 Módulo de troca térmica

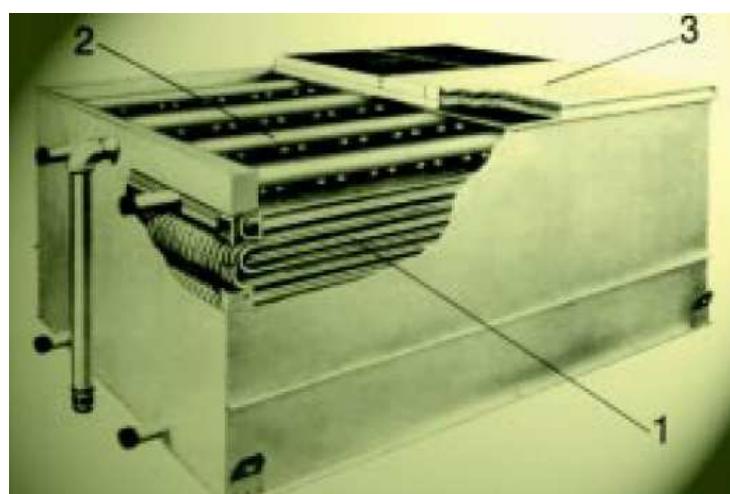


Figura 7.2 - módulo de troca térmica.

Fonte: SEMCO(2009).

1 - A serpentina é constituída de uma tubulação de aço de diâmetro externo de 26,7mm, projetada para uma baixa perda de carga, com tubos em espiral, a fim de possibilitar o rápido escoamento do fluido resfriado. O comprimento total da serpentina é de 54255 mm por circuito (SEMCO, 2009).

2 - O sistema de distribuição de água, consiste em distribuidores e ramais de pulverização em tubos de PVC, permitindo uma distribuição uniforme de água sobre a serpentina sob quaisquer condições de operação. A água sai do bico a uma vazão de 1,69 m<sup>3</sup>/h (SEMCO, 2009).

3 - Os eliminadores separam de forma eficaz as gotas de água do fluxo de ar através de três deflexões direcionais. O formato das lâminas na saída do ar aumenta a velocidade de descarga, direcionando-a para longe da tomada de ar dos ventiladores.

#### 7.2.2 Módulo tanque/ventilador

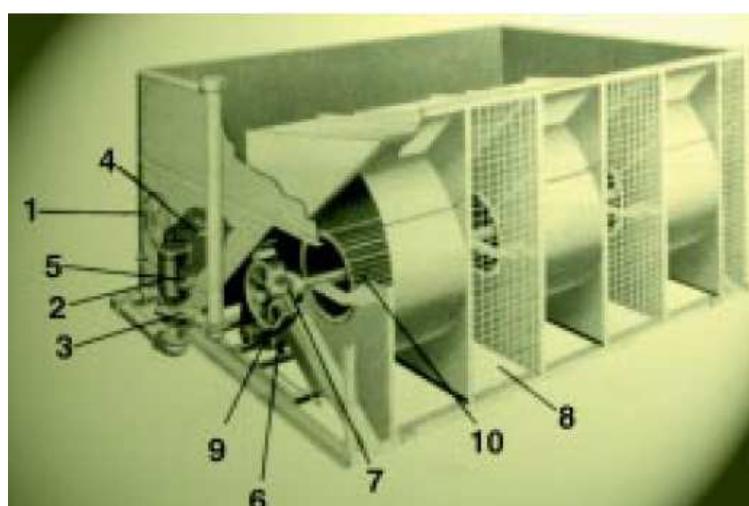


Figura 7.3 - módulo tanque/ventilador, apenas ilustrativa.  
Fonte: SEMCO(2009).

1 - Portas circulares de acesso ao tanque de água de spray.

2 - A bomba d'água de recirculação transporta a água do tanque para os spray.

3 - Uma linha de sangria com válvula.

4 - A válvula de água de reposição é controlada por uma boia de plástico de grande diâmetro.

5 - O filtro.

6 - O motor “standard” dos ventiladores.

7 - Os mancais do ventilador.

8 - A proteção para as partes móveis é feita através de telas metálicas situadas na face frontal das unidades, e painéis cegos nas faces laterais.

9 - Polias e correias.

10 - Os ventiladores centrífugos de pás curvadas para a frente e insufla uma carga de vento de 35 m/s.

### **7.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

Os experimentos realizados tem como objetivo medir as variáveis utilizadas no cálculo da massa de água evaporada durante a operação da torre e a quantidade de calor removido por meio da evaporação.

As instalações possuem as seguintes variáveis mensuráveis:

- temperatura de bulbo úmido e seco;
- temperatura do ar na saída;
- temperatura da água na entrada e na saída;
- temperatura do spray;
- vazões de água de resfriamento e aquecimento.

As temperaturas de bulbo seco e úmido são medidas com um psicrômetro, que consiste em um termômetro comum e um termômetro com bulbo envolvido em tecido úmido. Os termômetros são calibrados e apresentam incerteza de 0,5°C. A temperatura de bulbo seco é utilizada para definir as propriedades entálpicas do ar que entra na torre de resfriamento.

As medições foram realizadas no início e término de cada experimento. Não foi observada variação nos valores medidos das temperaturas de bulbo seco e úmido ao longo do ensaio, uma vez que os experimento tinha um tempo de duração curto.

A temperatura da saída do ar no topo da torre é medida utilizando um pirômetro ou termômetro infravermelho, que é um dispositivo que mede temperatura sem contato com o corpo/meio do qual se pretende conhecer a temperatura.

No circuito são instalados termopares que medem a temperatura de entrada e saída da água a ser resfriada, eles se localizam na entrada e saída do conjunto de torres, por isso no

momento que realizaram-se os experimentos, todas as torres estavam em funcionamento, não sendo o modo de operação rotineiro, que sempre opera o circuito com uma torre reserva. Esta medida foi tomada para garantir que a troca de calor fosse realizada de maneira uniforme em todos os trocadores.

Para medir a temperatura do spray são retiradas amostras de água, antes de serem aspergidas nas serpentinas e exatamente depois de escorrer por elas. Essas temperaturas são medidas com um termômetro conveniente de mercúrio calibrado e que apresenta incerteza de 0,5 °C. As amostra do spray na entrada é recolhida de um ponto de coleta já instalado no recalque da bomba, a qual envia a água para os bicos aspersores. As amostras da saída do spray foram retiradas na parte inferior da torre, acessado por meio da uma porta de visita indicada por 1 na figura 7.3. A água retirada do reservatório não é válida, pois a temperatura da água naquele ponto tende a ser diferente da temperatura da água que passa sobre a serpentina devido à interferência térmica da massa de água.

Porém ao se medir as temperaturas de entrada e saída do spray percebeu-se que a quantidade de massa de água presente no reservatório não é suficiente para interferir na temperatura da água do spray, em todas as medidas a temperatura de entrada e saída foram iguais, logo, as últimas medidas foram realizadas somente com amostras do ponto de coleta instalado no recalque da bomba devido a dificuldade de coleta da água de saída do spray.

A vazão da água é medida por um medidor magnético já instalado na entrada do sistema de resfriamento. Outras variáveis são necessárias para realização dos cálculos, mas como não é possível medi-las, elas foram retiradas dos dados técnicos do equipamento.

Por ser uma instalação industrial não é possível realizar alterações bruscas, as alterações apresentadas nos experimentos foram provenientes do momento de operação do forno, partida, operação, descarregamento e novo carregamento do forno, que alteram a temperatura da água a ser resfriada, além das alterações de temperatura ambiente, que variam ao longo do dia.

A sequência de passos realizado em cada experimento são:

- a) Medir temperatura de bulbo seco e úmido.
- b) Registrar o valor da temperatura na entrada e saída e vazão da água a ser resfriada.
- c) Coletar amostra da água de spray e medir sua temperatura, simultaneamente realizar a medição da temperatura da saída do ar.
- d) Registrar o valor da temperatura na entrada e saída e vazão da água a ser resfriada, novamente.

- e) Medir temperatura de bulbo seco e úmido.

Os dois últimos passos são realizados para garantir que nenhum das variáveis medidas em duplicata tiveram alteração durante o experimento, pois variações de temperatura da água ocorriam com grande rapidez, logo foi necessário descartar alguns experimentos para garantir valores em regime permanente.

## 8. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os experimentos foram realizados durante cinco dias, com três medições ao dia, sendo uma no período da manhã, uma no período da tarde e uma intermediária às duas. Medidas em horários muito próximos não são viáveis, pois não são observadas alterações significativas da condição de operação. Para realização dos cálculos da massa de água que evapora são necessárias variáveis específicas do equipamento, vazão da água do spray e da corrente de ar insuflada pelos ventiladores. Estes dados são apresentados na tabela 8.1, junto com valores das constantes utilizadas nos cálculos.

Tabela 8.1 - constantes utilizadas nos cálculos

Variável	Valor
Vazão do spray	946,40 m <sup>3</sup> /h
Vazão de ar	1373,40 m <sup>3</sup> /h
C <sub>p,ag</sub> (cal/kg°C)	1,00 kCal/Kg°C
C <sub>p,ar</sub> (cal/kg°C)	0,24 kCal/Kg°C

Para o cálculo da massa de água que evaporou é utilizada a equação 13 apresentada na seção 6.2. Assim como foi feito na realização dos experimentos foi considerado todo o equipamento como um só, porque as medidas das temperaturas são na entrada e saída do conjunto das torres. Foi calculado também o percentual de água evaporada da corrente do spray, o calor removido pela evaporação da água e o seu percentual no total do calor removido.

Torres de resfriamento são equipamentos que sofrem grandes interferências das condições de operação, sendo que algumas delas são influenciadas pelo clima, logo, é pouco confiável fazer generalizações sobre sua operação, mesmo assim algumas considerações são aceitáveis e são discutidas a seguir.

Tabela 8.2 – Temperaturas e vazão medidas

Dados		$\dot{m}_{ag}$ ( $m^3/h$ )	$T_{ag,ent}$ ( $^{\circ}C$ )	$T_{ag,sai}$ ( $^{\circ}C$ )	$T_{spray}$ ( $^{\circ}C$ )	$T_{ar,ent}$ ( $^{\circ}C$ )	$T_{ar,sai}$ ( $^{\circ}C$ )	Temperatura de bulbo úmido
1º dia	09:58	1295,0	45,2	34,2	30,0	25,0	34,0	22,0
	11:20	1294,0	43,5	34,0	29,5	28,0	31,0	22,0
	15:15	1288,0	43,3	35,0	29,0	28,0	32,0	22,5
2º dia	10:36	1296,0	39,5	33,0	29,0	26,0	29,0	21,0
	14:30	1314,0	45,0	33,0	30,5	29,5	36,0	23,0
	15:20	1307,0	42,3	33,4	29,0	29,0	30,5	23,0
3º dia	09:50	1289,0	44,4	33,9	30,0	25,5	32,6	21,0
	13:20	1304,0	43,3	34,2	30,0	28,0	31,2	22,5
	14:45	1297,0	38,7	33,3	28,5	29,0	31,8	23,0
4º dia	10:00	1287,0	39,7	33,4	28,5	25,0	31,0	20,0
	14:25	1298,0	40,5	33,8	30,0	28,0	31,2	23,0
	15:00	1278,0	43,7	34,8	29,0	28,3	31,8	23,0
5º dia	09:30	1284,0	39,2	33,1	30,0	24,5	30,0	21,0
	14:40	1298,0	41,5	33,5	30,5	28,0	31,4	23,0
	15:30	1302,0	43,6	35,0	29,0	28,0	32,0	24,0

Como pode ser observado na tabela 8.3 o valor da quantidade de massa que evapora não é um valor alto, em torno 1,89 % da vazão de água de spray que é recirculada na torre operando em regime permanente. Já era esperado um valor pequeno, uma vez que de acordo com o fabricante do equipamento 1,80% da água do spray evapora durante seu funcionamento(SEMCO, 2009). Assim como as torre evaporativas a maior parte do calor removido durante a operação da torre de resfriamento combinado é transferido na forma de calor latente, por meio da evaporação da água de spray.

Este fato mostra as vantagens de se utilizar a torre combinada ao invés da torre não evaporativa, pois além de não contaminar o fluido resfriado, promove um troca térmica mais eficiente, visto que 99,00% do calor é removido devido a presença da água que resfria externamente os tubos.

Outro fato interessante é que em diferentes cargas térmicas que entraram no conjunto de torre, a água de spray que percorre os tubos resfriando-os não altera sua temperatura em muitos graus, variando de 28,5°C a 30,5°C, apenas 2 grau, como é mostrado na tabela 8.2. Diferente de outras variáveis que seguem a tendência da temperatura de entrada da água quente, se ela estiver com uma temperatura mais alta, certamente o valor da temperatura do

ar de saída também será maior. Episódio que demonstra que a água do spray absorve o calor da água quente e o utiliza para evaporar a água, sendo assim, maior será a massa de água evaporada e a temperatura do ar umidificado pelo vapor, quando a temperatura da água quente for alta.

Tabelo 8.3 – quantidade de água evaporada e calores removido do processo

Experimento	Massa de água evaporada kg/h	% de massa de spray evaporado	Calor total removido (Kcal/h)	Calor removido pela evaporação da água (Kcal/h)	% de calor removido por evaporação
1	23.290,00	2,46	14.245.000,00	14.220.783,01	99,83
2	20.119,56	2,13	12.293.000,00	12.284.927,67	99,93
3	17.503,52	1,85	10.690.400,00	10.679.636,89	99,90
4	13.793,38	1,46	8.424.000,00	8.415.927,67	99,90
5	25.795,30	2,73	15.768.000,00	15.750.509,95	99,89
6	19.058,28	2,01	11.632.300,00	11.628.263,84	99,97
7	22.134,75	2,34	13.534.500,00	13.515.395,49	99,86
8	19.420,02	2,05	11.866.400,00	11.857.789,52	99,93
9	12.104,33	1,28	7.392.900,00	7.385.365,83	99,90
10	13.262,41	1,40	8.108.100,00	8.091.955,34	99,80
11	14.228,70	1,50	8.696.600,00	8.687.989,52	99,90
12	19.254,82	2,03	11.757.600,00	11.748.182,28	99,92
13	12.803,23	1,35	7.832.400,00	7.817.600,73	99,81
14	16.991,35	1,80	10.384.000,00	10.374.851,36	99,91
15	18.227,45	1,93	11.132.100,00	11.121.336,89	99,90
Média	17.865,81	1,89	10.917.153,33	10.905.367,73	99,89
<b>Desvio Padrão</b>	4.072,77	0,43	2.490.309,46	2.487.913,14	0,05

## 9. PERSPECTIVAS

Apesar de o tema torre de resfriamento ser discutido há muitos anos ele ainda tem muito campo para estudo, pois a grande maioria dos trabalhos foi realizada em torres de resfriamento evaporativas.

Para o modelo da torre desenvolvido neste trabalho, existem muitas perspectivas de melhoramento, todos os cálculos foram efetuados em regime permanente, sendo muito interessante realizar cálculos em regime transitório. Outra possibilidade é utilizar a equação de Merkel no modelo matemático para a torre combinada, apesar da equação ter sido desenvolvida para torres evaporativas. Podem também ser criados modelos que discretizem em incremento a temperatura pela extensão do tubo, a fim de descrever a transferência de calor e quantificá-lo em diferentes pontos da serpentina.

## 10. CONCLUSÃO

O modelo desenvolvido neste trabalho é simples, porém dele se extraiu informações importantes sobre o mecanismo de troca térmica em torres de resfriamento combinado, não evaporativa e evaporativa. Com os dados obtidos pode-se concluir que, a quantidade de água que evapora durante a operação da torre de resfriamento é pequena se comparada ao volume de água que percorre o sistema de resfriamento, mas é o fator mais importante para a diminuição da temperatura da água quente, aproximadamente 99% de todo o calor removido. Outro ponto importante é a confirmação da simplificação para modelos matemáticos de se desprezar a variação de temperatura na água do spray.

## **11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:**

FOUST, A. S., WENZEL, L. A., CLUMP, C. W., MAUS, L., ANDERSEN, L. B. Princípios das Operações Unitárias. 2<sup>a</sup> Edição. Rio de Janeiro: LTC, 1982, 670p.

McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. Operaciones unitarias em ingenieriaquímica. 7<sup>a</sup> edição. Boston: McGraw-Hill, 2005, 1140 p.

INCROPERA, F. P.; et al. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. LTC, 6a edição. Rio de Janeiro, 2008.

SMITH,J.M;VANNESS,H.C;ABBOTT,M.M.Introduçãօàtermodinâmicadaengenhariaquímica.7 .ed.RiodeJaneiro:LTC,2007.626p.

GEANKOPLIS,C.J.ProcesosdeTransporteyOperacionesUnitarias.3.ed.Mexico:CECSA,1998.

CREMASCO, MARCO AURÉLIO. Fundamentos de transferência de massa. Campinas: INICAMP, 1998. 741 p.

KERN, DONALD Q. Processos de Transmissão de Calor, Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980, 671p.

LIMA JUNIOR, RAFAEL CANDIDO. Modelagem fenomenológica do desempenho de torre de resfriamento de água acoplada e estudo de casos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

OLIVEIRA, VAGNER F. Diagnóstico de eficiência energética da uma torre de resfriamento de água da Arcelormittal Inox Brasil. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

FACÃO, JORGE MANUEL R.V. Comportamento térmico de torres de arrefecimento indiretas para aplicação a sistemas de arrefecimento ambiental. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Porto, Porto, 1999.

SILVA, JULIO AUGOSTO M. Sistema de informação para monitoramento e diagnóstico de desempenho de unidades termelétricas de ciclo combinado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, 2009.

ALMEIDA, DOMINGOS P. F. Psicometria apontamentos de apoio às aulas de tecnologia pós-colheita. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologias Pós-Colheita) – Universidade Federal de São Paulo, 2008.

WAKI, RENATA. Montagem e avaliação de uma torre de resfriamento para uso em atividades de ensino de graduação. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

BENNETT, C. O; MYERS. Fenômenos de transporte: quantidade de movimento calor e massa. São Paulo: McGraw-Hill, 1978. 812 p.

EQUIPAMENTOS SEMCO. **Manual de Operação e Manutenção**. São Paulo, 2009, 18p.

TREYBAL, ROBERT E. Mass-transfer operations. 2<sup>a</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 1968. 717p.