



Jaqueline Andréa Espósito Jasiulionis

**“Projeto e avaliação de desempenho de torres
de resfriamento de água utilizando redes
neurais artificiais”**

***“Design and analysis of cooling towers
using neural networks”***

Campinas
2012



Universidade Estadual de Campinas

Faculdade de Engenharia Química

Jaqueline Andréa Espósito Jasiulionis

**“Projeto e avaliação de desempenho de torres de resfriamento de água
utilizando redes neurais artificiais”**

Orientador/Supervisor: Prof. Dr. Roger Josef Zemp

***“Design and analysis of cooling towers
using neural networks”***

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, na Área de Concentração Sistemas de Processos Químicos e Informática.

Master Dissertation presented to the Chemical Engineering Postgraduate Programme of the School of Chemical Engineering of the University of Campinas to obtain the Master of Science grade in Chemical Engineering.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA
DISSERTAÇÃO DE Mestrado DE ENGENHARIA QUÍMICA,
DEFENDIDA POR JAQUELINE ANDRÉA ESPÓSITO JASIULIONIS
E ORIENTADA PELO PROF. DR. ROGER JOSEF ZEMP.

A handwritten signature in black ink is located below the text. The signature is cursive and appears to be the name of the author, Jaqueline Andréa Espósito Jasiulionis. Below the signature is a horizontal line.

Campinas
2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA

BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

J31p

Jasiulionis, Jaqueline Andréa Espósito
Projeto e avaliação de desempenho de torres de
resfriamento de água utilizando redes neurais
artificiais / Jaqueline Andréa Espósito Jasiulionis. --
Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Roger Josef Zemp.
Dissertação de Mestrado - Universidade
Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia
Química.

1. Torres de resfriamento. 2. Evaporação. 3.
Redes neurais artificiais. 4. Modelagem de
processos. 5. Simulação por computador. I. Zemp,
Roger Josef, 1962-. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III.
Título.

Título em Inglês: Design and analysis of cooling towers using neural
networks

Palavras-chave em Inglês: Cooling towers, Evaporation, Neural networks,
Process modeling, Computer simulation

Área de concentração: Sistemas de Processos Químicos e Informática

Titulação: Mestra em Engenharia Química

Banca examinadora: Paulo Roberto Alves Pereira, José Vicente Hallak
D'Angelo

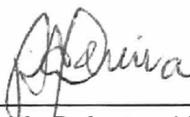
Data da defesa: 30-07-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Química

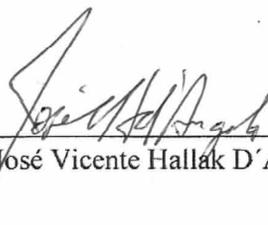
Dissertação de Mestrado defendida por Jaqueline Andréa Espósito Jasiulionis
e aprovada em 30 de julho de 2012 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



Prof. Dr. Roger Josef Zemp
Orientador



Prof. Dr. Paulo Roberto Alves Pereira



Prof. Dr. José Vicente Hallak D'Angelo

Aos meus pais e meu marido

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Prof. Dr. Roger Josef Zemp, por transmitir seus conhecimentos com dedicação e carinho, expresseo meu maior agradecimento e profundo respeito.

Aos meus pais Henry e Aparecida pela compreensão e pelos ensinamentos de viver com dignidade e respeito, agradeço de coração.

Ao meu marido Gustavo pela dedicação, compreensão e principalmente pela paciência, não bastaria um obrigado.

RESUMO

Em muitos processos há necessidade de remover a carga térmica de um dado sistema e utiliza-se, na maioria dos casos, a água como o fluido de resfriamento. Devido à sua crescente escassez e preocupação com o meio ambiente, além de motivos econômicos, a água “quente” que sai desses processos, deve ser aproveitada. Para tanto, ela passa por uma torre de resfriamento e retorna ao processo.

Este trabalho descreve um procedimento para avaliar o desempenho térmico de torres de resfriamento, em duas configurações distintas (escoamento contracorrente e escoamento cruzado), utilizando redes neurais artificiais. A vantagem do procedimento proposto é a possibilidade da avaliação direta do desempenho de uma torre sem a complexidade do uso de procedimentos iterativos para convergência nem a necessidade de rotinas de propriedades físicas e psicrométricas. A avaliação do desempenho é feita pela determinação da temperatura de saída da água para um conjunto de parâmetros de entrada (propriedades de corrente da água e do ar na entrada da torre, dimensões e propriedades do recheio), ou determinação da característica do recheio para uma torre existente, em função das condições operacionais. Para a situação de projeto o procedimento permite estimar a vazão de ar ou altura necessária para a torre satisfazer uma condição operacional exigida. O procedimento proposto se mostrou particularmente eficiente para torres com escoamento cruzado, onde o método tradicional de simulação exige a decomposição da torre em um número elevado de células, cada um como um procedimento iterativo para cálculo do balanço de massa e energia.

A rede rendeu ótimos resultados quando usada para prever a temperatura de saída da água e o coeficiente de transferência de massa. Os resultados mostram que a RNA pode fornecer com precisão o desempenho térmico da torre de resfriamento.

Palavras Chave: torre de resfriamento, resfriamento evaporativo, redes neurais artificiais.

ABSTRACT

In many industrial environments it is necessary to remove the heat load from a given system and in most cases water is used as the coolant. Due to its increasing scarcity and concerns for the environment, and economic reasons, the "hot" water coming out of these processes must be reused. To do so, it passes through a cooling tower and returns to the process.

This paper describes a procedure for evaluating the thermal performance of cooling towers in two different configurations (counter flow and cross flow), using artificial neural networks. The advantage of the proposed procedure is the possibility of direct assessment of the performance of a tower without the complexity due to the required convergence of the iterative procedure or the need for physical properties and psychrometric routines. The performance evaluation is made by computing the temperature of the water outlet for a set of input parameters (flow properties of water and air near the tower, dimensions and properties of the filling), or computing the characteristic of the filling for a existing tower, depending on operating conditions. For the project situation, the procedure allows for the estimate of the air flow or the tower height needed to meet a required operating condition. The proposed procedure proved particularly effective in cross-flow towers, where the traditional method of simulation requires the decomposition of the tower in a large number of cells, each as an iterative procedure for calculating the mass balance and energy.

The network yielded excellent results when used to predict the exit temperature of the water and the coefficient of mass transfer. The results show that the RNA can accurately provide the thermal performance of the cooling tower.

Keywords: cooling tower, evaporative cooling, artificial neural networks.

SUMÁRIO

1 – Introdução	- 1 -
2 – Fundamentação teórica	- 3 -
2.1 – Importância	- 3 -
2.2 – A evaporação psicrométrica	- 8 -
2.3 – Tipos de torres de resfriamento	- 9 -
2.4 – Revisão bibliográfica	- 15 -
2.5 – Fatores que influenciam a operação	- 18 -
2.6 – Fatores que afetam o desempenho da torre de resfriamento	- 19 -
3 – Torres de resfriamento	- 26 -
3.1 – Torre de resfriamento contracorrente - balanço de massa e energia	- 26 -
3.1.1 – Torre de resfriamento contracorrente - transporte de calor e massa	- 27 -
3.1.2 – Projeto preliminar para estimar uma nova torre de resfriamento contracorrente	- 27 -
3.2 – Torre de resfriamento corrente cruzada - transporte de calor e massa	- 40 -
3.3 – Rede neural artificial	- 43 -
4 – Materiais e métodos	- 47 -
4.1 – Escopo do trabalho	- 47 -
4.2 – Simulação com as variáveis agrupadas	- 49 -
4.3 – Simulação com as variáveis sem agrupamento	- 51 -
4.4 – Determinação das variáveis de processo	- 57 -
5 – Resultados e discussões	- 61 -

5.1 – Modelagem para torre de resfriamento	- 61 -
5.1.1 – Modelagem com as variáveis agrupadas	- 61 -
5.1.2 – Modelagem com as variáveis sem agrupamento	- 63 -
5.2 – Exemplo de aplicação do modelo estudado	- 69 -
6– Conclusões	- 73 -
Referências bibliográficas	- 75 -

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – variação entre os dados obtidos de entrada e saída da torre contracorrente – a partir do modelo de curvas de desempenho	58
Tabela 2 – variação entre os dados obtidos de entrada e saída da torre fluxo contracorrente	59
Tabela 3 – variação entre os dados obtidos de entrada e saída da torre fluxo cruzado	59

LISTA DE FIGURAS

2.1 – Relação da temperatura ar-água de uma torre de resfriamento contracorrente	4
2.2 – Análise psicrométrica do ar passando através da torre de resfriamento	5
2.3 – Interface ar-água	7
2.4 – Diagrama psicrométrico	9
2.5 – Esquema de torre mecânica com tiragem forçada	12
2.6 – Torre úmida com acionamento mecânico (induzido) fluxo contracorrente	13
2.7 – Torre úmida com acionamento mecânico (induzido) fluxo cruzado	13
2.8 – Recheio tipo filme	14
2.9 – Enchimento tipo respingo: (a) barras de PVC; (b) barras de madeira	15
2.10 – Diagrama psicrométrico de uma torre de resfriamento	20
2.9 – Psicrômetro giratório	22
3.1 – Fluxo contínuo contracorrente do gás-líquido	22
3.2 – Representação esquemática da transferência de calor de uma gota d'água	28
3.3 – Condições de um umidificador adiabático	28
3.4 – Condições no fundo da torre de resfriamento (a), (b) e no topo da torre (c).	30
3.5 – Área da seção transversal	32
3.6 – Curva de desempenho para Torre de Resfriamento contracorrente	39
3.7 – Modelo de uma célula da torre de resfriamento com corrente cruzada	40
3.8 – Neurônio artificial projetado por McCulloch – Pitts	45
3.9 - Organização de uma RNA em camadas	46
4.1 – Arquitetura da RNA desenvolvida para simulação da altura da torre	49
4.2 - Arquitetura da RNA desenvolvida para simulação da temperatura de <i>approach</i>	50
4.3 - Arquitetura da RNA desenvolvida para simulação da vazão de ar	50
4.4 - Arquitetura da RNA desenvolvida para simulação de projeto	52
4.5 - Arquitetura da RNA desenvolvida para simulação do desempenho térmico	52
4.6 - Arquitetura da RNA desenvolvida para simulação da característica do recheio	53
4.7 - Arquitetura da RNA desenvolvida para simulação da vazão de ar	54

4.8 - Arquitetura da RNA desenvolvida para simulação do projeto da torre com escoamento cruzado	55
4.9 - Arquitetura da RNA desenvolvida para simulação do recheio da torre com escoamento cruzado	56
4.10 - Arquitetura da RNA desenvolvida para simulação da vazão de ar da torre com escoamento cruzado	57
5.1 – Resultado obtido pelo treinamento e teste da rede para determinação da altura da torre .	62
5.2 - Resultado obtido pelo treinamento e teste da rede para temperatura de <i>approach</i> da torre contracorrente	62
5.3 - Resultado obtido pelo treinamento e teste da rede para o projeto da torre Contracorrente	63
5.4 - Resultado obtido pelo treinamento e teste da rede para vazão de ar da torre Contracorrente	64
5.5 - Resultado obtido pelo treinamento e teste da rede para desempenho térmico da torre contracorrente	64
5.6 - Resultado obtido pelo treinamento e teste da rede para característica do recheio da torre ccontracorrente	65
5.7 - Resultado obtido pelo treinamento e teste da rede para avaliar a vazão de ar da torre contracorrente	66
5.8 – Resultado obtido pelo treinamento e teste para desempenho térmico da torre com escoamento cruzado .	67
5.9 – Resultado obtido pelo treinamento e teste para característica do recheio da torre com escoamento cruzado	67
5.10 – Resultado obtido pelo treinamento e teste para avaliar a vazão de ar da torre com escoamento cruzado	68

NOMENCLATURA

a – área específica de contato líquido-gás, m^2/m^3

a_m – área específica de transferência de massa, m^2/m^3

a_t – área específica de transferência de calor, m^2/m^3

c_m – calor específico médio da água, J/kg.K

c_{sa} – calor específico do ar nas condições de saturação adiabática, J/kg.K

cp – calor específico da água de resfriamento, J/kg.K

cp_L – capacidade calorífica do líquido, J/kg.K

cp_G – calor específico do vapor d'água, J/kg.K

cp_{ar} – calor específico do ar, J/kg.K

cp_u – calor específico do vapor, J/kg.K

c_s – calor específico do ar úmido, J/kg.K

D – difusividade de massa, m^2/s

G – vazão de ar, kg/s

G' – vazão de ar por unidade de área, $kg/m^2.s$

H – entalpia específica, kJ/kg

H_G – entalpia específica do ar, kJ/kg

H_i – entalpia específica da interface, kJ/kg

H_{GE} – entalpia específica do ar na entrada da torre de resfriamento, kJ/kg

H_{GS} – entalpia específica do ar na saída da torre de resfriamento, kJ/kg

H_{tG} – altura de unidade de transferência de massa global

h – coeficiente global de transferência de calor, $W/m^2.K$

h_L – coeficiente de transferência de calor da água para interface, $W/m^2.K$

h_G – coeficiente de transferência de calor da interface para o ar, $W/m^2.K$

$h_{ar,con}$ – coeficiente global de transferência de calor por convecção do ar, $W/m^2.K$

$h_{ar,rad}$ – coeficiente global de transferência de calor por radiação do ar, $W/m^2.K$

k – condutividade térmica, W/m.K

k_g – coeficiente de transferência de massa para a fase gasosa, $kg/s.m^2$

L – vazão de água, kg/s

L' – vazão de água por unidade de área, kg/s.m^2
 L'' – velocidade superficial do líquido, m/s
 Le – número de Lewis, adimensional
 $N_{\text{água}}$ – fluxo mássico de água, kg/s.m^2
 N_{tG} – número de unidades de transferência global
 Pr – número de Prandtl, adimensional
 P – pressão, Pa
 P_{vs} – Pressão de vapor saturado, Pa
 Q – carga térmica do sistema, W/m^2
 Q_{ar} – fluxo de calor transmitido pelo ar, W/m^2
 $Q_{\text{água}}$ – fluxo de calor transmitido pela água, W/m^2
 q_i – fluxo de calor transmitido pela interface, W/m^2
 q_L – fluxo de calor transmitido pela água, W/m^2
 q_G – fluxo de calor transmitido pelo ar, W/m^2
 S – área de contato, m^2
 Sc – número de Schmidt, adimensional
 T – temperatura, $^{\circ}\text{C}$
 T_{ar} – temperatura do ar, $^{\circ}\text{C}$
 $T_{\text{água}}$ – temperatura da água, $^{\circ}\text{C}$
 T_i – temperatura na interface, $^{\circ}\text{C}$
 T_G – temperatura do gás, $^{\circ}\text{C}$
 T_{Sa} – temperatura de saturação adiabática, $^{\circ}\text{C}$
 T_{bu} – temperatura de bulbo úmido, $^{\circ}\text{C}$
 T_{Le} – temperatura de entrada da água na torre de resfriamento, $^{\circ}\text{C}$
 T_{Ls} – temperatura de saída da água na torre de resfriamento, $^{\circ}\text{C}$
 Z – altura de recheio da torre de resfriamento, m
 w – vazão total de água de resfriamento, m^3/h
 w' – vazão de água na torre de resfriamento, m^3/h
 Y – umidade, kg de água/kg de ar seco
 Y_{bu} – umidade na temperatura de bulbo úmido, kg de água/kg de ar seco

Y_0 – umidade ambiente, kg de água/kg de ar seco
 Y_i – umidade no ar na interface, kg de água/kg de ar seco
 Y_G – umidade no ar, kg de água/kg de ar seco
 x – variável independente
 y – variável independente
 z – variável independente
 α – difusividade térmica, m^2/s
 α_m – difusividade molecular de massa, m^2/s
 α_{qm} – difusividade de quantidade de movimento, m^2/s
 α_t – difusividade molecular de energia, m^2/s
 λ – calor latente de vaporização da água, J/kg
 μ - viscosidade dinâmica do fluido, kg/ m.s
 ρ – densidade, kg/m^3
 Δ - variação
 ν – viscosidade cinemática, m^2/s

Subscritos

ar – ar
água – água
bu – bulbo úmido
con - convecção
i – interface
l – latente
m – médio
rad – radiação
s – sensível
sa – saturação adiabática
t - total
1 – fundo
2 – topo

1 – INTRODUÇÃO

Dentro do contexto de minimização de custos e máximo retorno econômico aliados ao atual interesse pela preservação ambiental, a minimização energética em uma indústria química vem ao encontro das principais tendências do mercado. Ao minimizar o gasto energético (resfriamento), a indústria estará reduzindo o custo de produção e conseqüentemente alterando diretamente o custo do produto final.

Para as indústrias a torre de resfriamento está associada a fatores de redução de custos operacionais e a fatores ecológicos, pois uma característica importante deste equipamento é a formação de um circuito fechado sem desperdício de água, com reposição da mesma apenas para suprir as perdas devido à evaporação, arraste e purgas.

As torres de resfriamento são usadas em plantas de geração de energia elétrica, instalações de ar condicionado, indústrias químicas, petroquímicas e refinarias.

As variáveis que são estabelecidas na especificação de uma torre de resfriamento de água são a carga térmica a ser removida do processo, a vazão de circulação de água, a diferença das temperaturas de entrada e saída da torre (conhecida como *range*), a diferença entre a temperatura da água que sai da torre e a temperatura de bulbo úmido do ar ambiente (conhecida como *approach*).

O desempenho térmico da torre de resfriamento é de vital importância nas unidades industriais e pequenos desvios em relação às especificações de projeto podem provocar implicações graves no funcionamento e na economia de um processo. Por exemplo, a pressão de operação nos condensadores das colunas de destilação ou nos evaporadores de sistemas de concentração é estabelecida a partir da temperatura da água de resfriamento. Nesse caso, quanto mais fria a água, maior poderá ser a produção da unidade e menor o custo operacional (EL-DESSOUKY; et. al.,1997).

Na literatura, encontram-se diversos trabalhos sobre torre de resfriamento. No entanto, nota-se uma carência de estudos sobre variáveis de operação e dados experimentais do seu desempenho.

De fato estes dados baseiam-se nas informações do fabricante (catálogo), sem uma preocupação marcante da sua comprovação na prática.

É bastante difícil modelar com precisão o desempenho de uma torre de resfriamento em corrente cruzada usando técnicas clássicas de modelagem que lidam com a solução de equações diferenciais complexas. Além disso, os modelos matemáticos requerem um grande número de parâmetros geométricos para definir o sistema. Como alternativa, torres de resfriamento podem ser modeladas utilizando Rede Neural Artificial (RNA). Esta técnica permite solucionar problemas através da simulação. Utilizando amostras de experimentos, a RNA fornece um modelo de estrutura aproximado dos dados experimentais, assim, a rede pode ser aplicada em problemas sem solução algorítmica ou soluções muito complexas para serem encontradas.

O procedimento usual na solução dos problemas com RNAs passa por uma fase de aprendizagem, onde um conjunto de exemplos é apresentado à rede, que extrai as características daquele conjunto e que são usadas para gerar respostas ao problema quando são apresentados à rede outros dados de entrada. A capacidade de aprender por exemplos e de generalizar a informação aprendida é o principal atrativo das RNAs.

No presente trabalho, será desenvolvido um modelo empírico para avaliar o desempenho térmico de uma torre de resfriamento do tipo evaporativo, em corrente cruzada, realizando os balanços de massa e energia nas correntes de água e ar na torre. Para a presente tese, desempenho térmico será considerado a estimativa da temperatura de saída para uma dada condição operacional. A proposta consiste em encontrar os valores das principais variáveis de processo na operação de uma torre de resfriamento: a vazão de água, vazão do ar e temperatura de entrada e saída da água. O texto, a seguir, é composto da Revisão Bibliográfica em que serão apresentados os conceitos, as equações básicas e as variáveis de operação de uma torre de resfriamento, modelagem matemática e modelagem com RNA. Em seguida, é feita a determinação das variáveis de processo utilizando RNA.

2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 – IMPORTÂNCIA

As torres de resfriamento desempenham um papel fundamental no controle de temperaturas de uma instalação industrial. Em uma indústria as torres de resfriamento normalmente estão separadas das plantas principais e são geralmente negligenciadas até que algum problema ocorra, prejudicando a operação das unidades principais. Nos dias de hoje tem-se dado muita atenção ao projeto e operação das torres de resfriamento, assegurando seu bom desempenho. Isto porque a água extraída de fontes naturais não está disponível devido à perturbação ecológica causada pelo aumento da temperatura da água de descarte ter se tornado inaceitável.

Torre de resfriamento é um equipamento de remoção de calor de uma corrente de água para o ar atmosférico com conseqüente resfriamento de água (COOLING TOWER INSTITUTE, 2007). Torres de resfriamento refrigeram a água por uma combinação de transferência de calor e de massa. A água a ser resfriada é distribuída na torre por bicos de pulverização, barras de respingo ou tipo filme, que expõe a água a uma área de superfície grande para o ar atmosférico. O ar atmosférico circula por ventiladores, correntes de convecção, correntes de vento natural, ou efeito de indução de sprays. Uma parte da água absorve calor para haver a mudança do estado líquido para o vapor em pressão constante.

A figura a seguir mostra a relação entre a temperatura da água e do ar à medida que passam através de uma torre de resfriamento contracorrente. As curvas (A para B) indicam a queda na temperatura da água e (C para D) o aumento da temperatura de bulbo úmido do ar em suas respectivas passagens pela torre. A diferença entre as temperatura de entrada e saída de água da torre de resfriamento (A menos B) é conhecida como *range*.

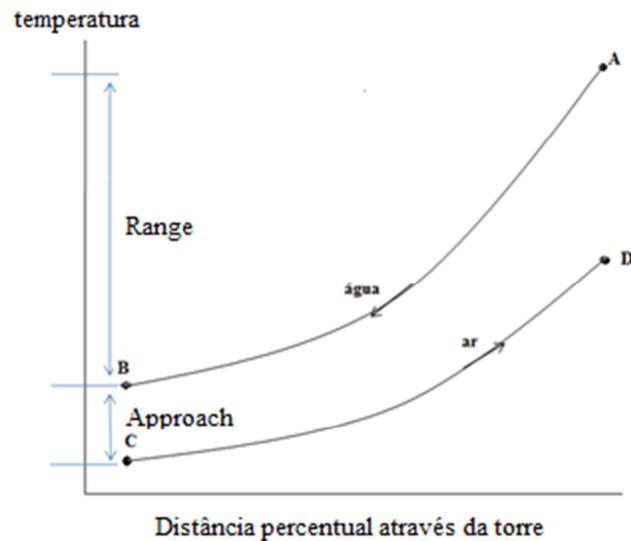


Figura 2.1 – Relação da temperatura ar – água de uma torre de resfriamento contracorrente (ASHRAE, 2008)

A diferença entre a temperatura da água que deixa a torre e a temperatura de bulbo úmido de ar que entra na torre (B menos C) é conhecido como *approach*. O *approach* é uma função da capacidade da torre de resfriamento e uma torre maior produz um *approach* menor (água de saída mais fria) para uma dada carga térmica, taxa de fluxo, e condição de entrada do ar. Então, a quantidade de calor transferido para a atmosfera pela torre de resfriamento é sempre igual à carga térmica imposta na torre, enquanto que o nível de temperatura na qual o calor é transferido é determinado pela capacidade térmica da torre de resfriamento e temperatura de bulbo úmido que entra na torre.

O desempenho térmico de uma torre de resfriamento depende principalmente da temperatura de entrada de bulbo úmido. Uma análise psicrométrica do ar passando através da torre de resfriamento é demonstrada na Figura 2.2. O ar entra na condição ambiente no ponto A, absorve calor e massa (mistura) da água e sai no ponto B na condição saturada. A quantidade de calor transferido da água para o ar é proporcional à diferença de entalpia do ar entre a condição de entrada e saída ($h_B - h_A$).

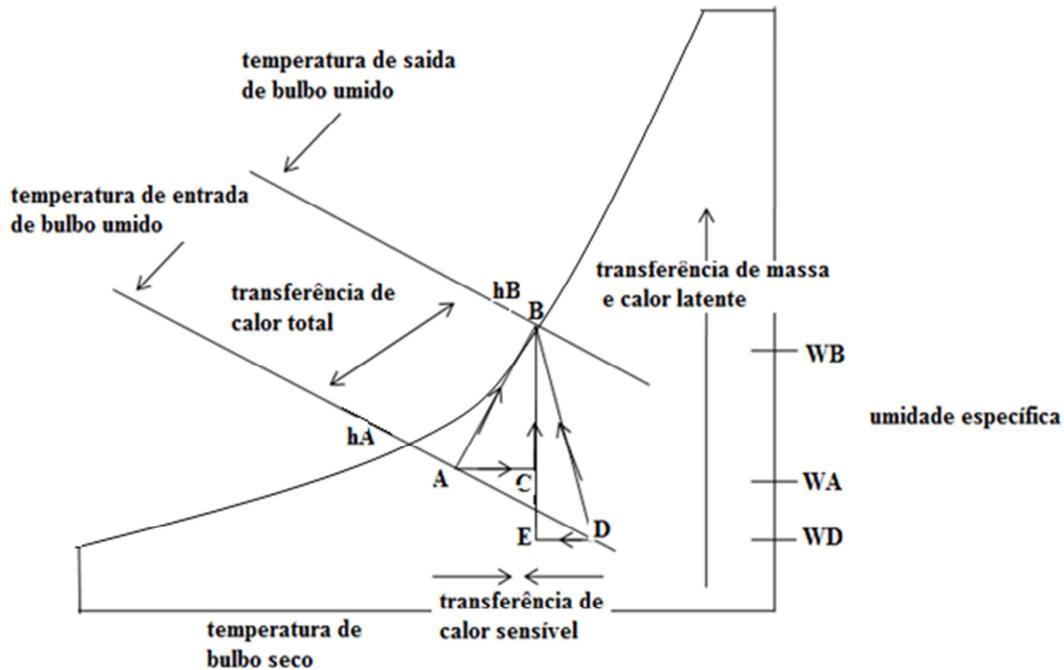


Figura 2.2 – Análise psicrométrica do ar passando através da torre de resfriamento.

O ar quente (vetor AB na Figura 2.2) pode ser separado em componente AC, que representa a porção sensível do calor absorvido pelo ar quando a água é resfriada, e componente CB, que representa a porção latente. Se a condição de entrada do ar mudar para o ponto D com a mesma temperatura de bulbo úmido, mas uma temperatura de bulbo seco maior, a transferência de calor total continua a mesma (vetor DB), porém o componente sensível e latente muda drasticamente. O vetor DE representa o resfriamento do ar sensível, enquanto o vetor EB representa o calor latente. Assim, para a mesma carga de água de resfriamento, a razão de transferência de calor sensível para latente pode variar significativamente. A razão de calor latente para calor sensível é importante na análise do uso de água na torre de resfriamento. A transferência de massa (evaporação) ocorre somente na porção latente da transferência de calor e é proporcional à mudança da umidade específica. Porque a temperatura de bulbo seco ou umidade relativa afeta a razão de transferência de calor latente para sensível, também afeta a razão de evaporação. Na Figura 2.2, a taxa de evaporação no caso AB ($W_A - W_B$) é menor do que no caso DB ($W_B - W_D$)

porque a transferência de calor latente (transferência de massa) representa uma porção menor do total.

A capacidade térmica de qualquer torre pode ser definida pelos seguintes parâmetros:

- Temperatura de entrada e saída de água;
- Temperatura de bulbo úmido ou temperatura de bulbo úmido e seco na entrada;
- Taxa de fluxo de água.

A temperatura de bulbo seco afeta a quantidade de evaporação da água de qualquer torre de resfriamento evaporativa.

Teoricamente a temperatura de bulbo úmido é a temperatura mais baixa à qual se pode resfriar a água. Na prática a temperatura de água fria se aproxima, mas não atinge a temperatura de bulbo úmido numa torre de resfriamento; isto se deve ao fato de ser improvável o contato de toda a água com o ar ambiente, quando esta cai pela superfície do recheio molhado até a bacia de água fria.

Teoria de Merkel

A teoria mais aceita do processo de transferência de calor em torre de resfriamento é a desenvolvida por Merkel. Ela considera como força motriz no processo a diferença potencial de entalpia. Merkel (1925) combina os coeficientes de transferência de calor sensível e massa num único coeficiente global, baseado no potencial entálpico como força motora. A teoria proposta por Merkel requer algumas hipóteses simplificadoras que têm sido universalmente adotadas para o cálculo do desempenho de uma torre de resfriamento.

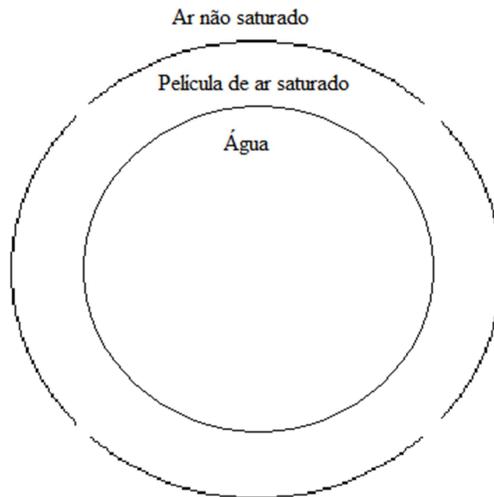


Figura 2.3 – Interface ar-água (Fonte: MTL engenharia Ltda).

Conforme mostrado na Figura 2.3, de acordo com a teoria de Merkel, a gota de água está envolta por uma película de ar saturado e na mesma temperatura que a água. O cálculo das transferências de calor e massa considera a interface entre o ar e esta película.

Supõe-se que cada gotícula de água está cercada por uma película de ar na temperatura da água e a diferença de entalpia entre a película e o ar ambiente proporciona a força motriz para o processo de resfriamento.

Em sua forma integrada a equação de Merkel é:

$$\frac{k_G \cdot a \cdot Z}{L} = cp \cdot \int_{T_2}^{T_1} \frac{dT}{h' - h} \quad 2.1$$

onde:

k_G = coeficiente de transferência de massa, kg/h.m²

a = área de contato por unidade de volume, m²/m³

L = taxa de água, kg/h.m²

h' = entalpia do ar saturado na temperatura da água, kJ/kg

h = entalpia da corrente do ar, kJ/kg

$T1$ e $T2$ = temperatura da água na entrada e saída, °C

Z = altura da torre, m.

c_p = calor específico da água de resfriamento, J/kg.K

O lado direito da equação só depende das propriedades do ar e da água e é independente das dimensões da torre.

2.2 – A EVAPORAÇÃO PSICROMÉTRICA

Antes de abordar os tipos de torres de resfriamento é necessário apresentar o diagrama psicrométrico. A obtenção das propriedades psicrométricas é de fundamental importância nos processos psicrométricos de climatização, refrigeração, resfriamento e congelamento, umidificação e desumidificação do ar, secagem e desidratação de produtos úmidos, como também em controle ambiental e em meteorologia. As variáveis mais comuns nestes processos são: temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido, umidade relativa, umidade absoluta, pressão de vapor, volume específico, entalpia específica, calor sensível e temperatura do ponto de orvalho.

O recheio tipo barra de respingo, em uma torre contracorrente realiza esta função básica pelas finas gotas do spray de água, e estas gotas de caem através de uma aspiração mecânica. O efeito de resfriamento global seria melhorado através do aumento da altura da torre, aumentando assim a distância de queda de água e maximizar o tempo total de contato entre o ar e a água. Utilizando este método de evaporação, limitações estruturais e econômicas seriam logo alcançadas.

Uma maneira mais eficiente para aumentar o tempo de contato é através da instalação de um recheio dentro da torre para impedir o processo de queda de água. Pode-se dizer que o recheio tipo barra de respingo retarda o caimento da água e aumenta a área de superfície para o ar, assim promove o processo de evaporação.

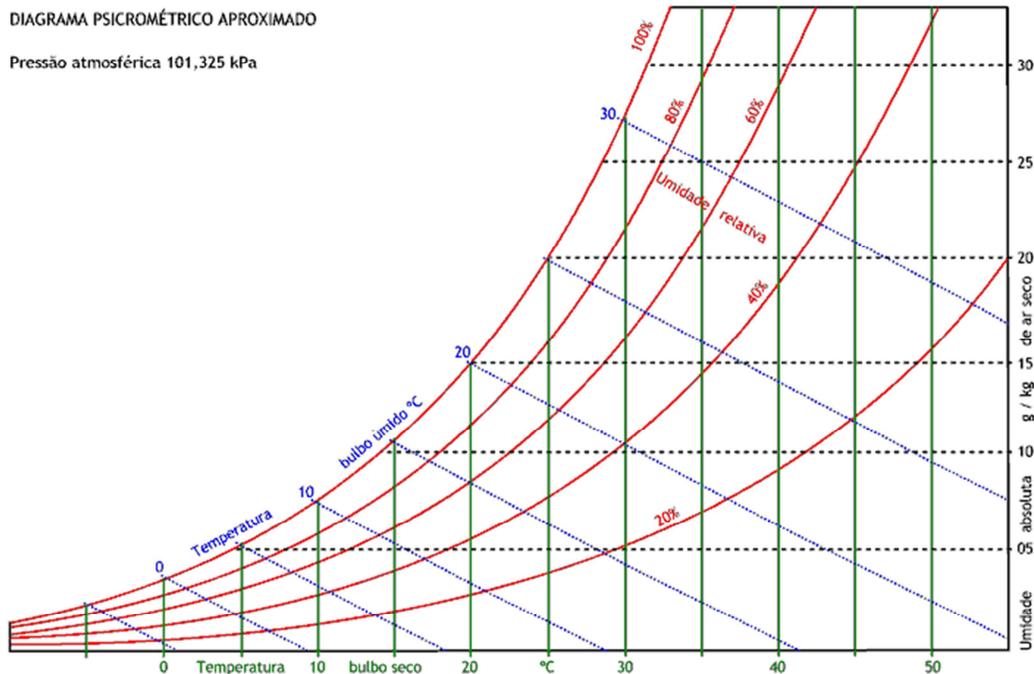


Figura 2.4 – Diagrama Psicrométrico (Fonte: www.mspsc.eng.br).

A compreensão do processo de resfriamento evaporativo pode ser melhorada, analisando o gráfico psicrométrico (Fig. 2.4). Para encontrar os valores das variáveis de operação, basta colocar no gráfico psicrométrico os pontos dados, como a temperatura de bulbo seco e o percentual de umidade relativa, tendo um ponto, é possível encontrar as outras propriedades.

A Psicrometria pode ser expressa como “o ramo da física relacionado com a medição das condições do ar atmosférico, principalmente com respeito à mistura ar seco – vapor d’água”, ou ainda, “aquela parte da ciência que está de certa forma intimamente preocupada com as propriedades termodinâmicas do ar úmido, dando atenção especial às necessidades ambientais, humanas e tecnológicas”.

Na Figura 2.4 está representado o Diagrama Psicrométrico, onde as propriedades termodinâmicas da mistura ar seco – vapor d’água que constituem o ar atmosférico podem ser convenientemente apresentadas em forma de diagramas, denominados Diagramas Psicrométricos (Cartas Psicrométricas). Estes são construídos para determinada pressão atmosférica, embora, às vezes, haja curvas de correção disponível para outras pressões.

2.3 – TIPOS DE TORRES DE RESFRIAMENTO

As torres de resfriamento podem ser classificadas de acordo com a maneira em que há movimentação do ar.

- a) **Torre de ventilação natural (ou atmosférica)** - Torre de resfriamento de água através da qual a movimentação do ar é induzida pelo jato de água produzido por bicos de pulverização. É a mais simples de todas, o ar passa horizontalmente pela torre, enquanto a água cai verticalmente. Pode apresentar ou não enchimento. As perdas por arraste são enormes. Possui bicos pulverizadores e venezianas para reduzir os respingos. A quantidade de bicos e a altura da torre irão determinar seu desempenho.

- b) **Torre de tiragem natural (torre hiperbólica)** – Torre de resfriamento de água através da qual a movimentação do ar é obtida por meio da diferença de densidade entre o ar no interior da mesma e o ar no exterior, também sem a presença de ventiladores, o que resulta em custo operacional menor que o das torres convencionais, porém geralmente são de concreto e apresentam dimensões gigantescas de dezenas de metros de altura e de igual largura da bacia. Nesse tipo de torre, constrói-se uma chaminé no topo da torre, de modo a proporcionar uma melhor tiragem do ar quente, que por apresentar uma densidade reduzida tende a subir.

É utilizada em regiões de clima frio. É extremamente alta e, às vezes, apresenta a altura de dezenas de metros e largura na bacia de dimensões similares, muito comum na Europa, mas de uso limitado nos Estados Unidos, salvo para grandes termelétricas. As torres hiperbólicas podem ser de concepção em contracorrente ou em fluxo cruzado. Elas serão econômicas quando uma fábrica puder amortizar os custos de construção em um período mais longo. As usinas termelétricas têm-se utilizado com vantagem das torres hiperbólicas em áreas onde a altura das torres eleva a coluna de vapor para eliminar a recirculação e contato com as áreas de carga próximas. Por outro lado, as unidades industriais que têm tempos de amortização mais reduzidos e cargas térmicas muito menores e

conseqüentemente menores colunas de vapor constroem geralmente unidades de tiragem mecânica.

- c) **Torre de tiragem mecânica** – Ao contrário das torres de tiragem natural que são utilizadas para grandes capacidades e em clima frio, principalmente na Europa, as torres de resfriamento com tiragem mecânica são hoje largamente utilizadas no Brasil (GOMES,1997) e não possuem restrição para localização. A vazão de ar é facilmente controlada, o que proporciona maior controle da temperatura de água fria. É definida como torre de resfriamento através da qual a movimentação do ar é obtida por meio de um ou mais ventiladores ou outro processo mecânico. O ar que deixa a torre é descarregado em um ponto longe o bastante da entrada de ar para evitar que ele seja conduzido novamente à torre de refrigeração. As dimensões da torre dependem de:
1. Faixa de resfriamento (diferença entre as temperaturas da água quente e fria);
 2. Aproximação (*approach*) em relação à temperatura de bulbo úmido (diferença entre a temperatura de água quente e a temperatura de bulbo úmido);
 3. Quantidade de água a ser resfriada;
 4. Temperatura de bulbo úmido;
 5. Quantidade de ar através do enchimento;
 6. Altura da torre.

Elas podem ser classificadas também pelo arranjo construtivo:

- a. **Torre de tiragem forçada** - com um ou mais ventiladores localizados na entrada de ar onde o ar é insuflado na torre por ventiladores na sua base ou nos lados. Dessa forma, o ar é obrigado a entrar horizontalmente e depois subir para encontrar as gotículas descendentes de água. Não há muito problema de corrosão nas pás do ventilador por ele não estar na zona de contato ar-água. A Figura 2.5 ilustra a torre de tiragem forçada.

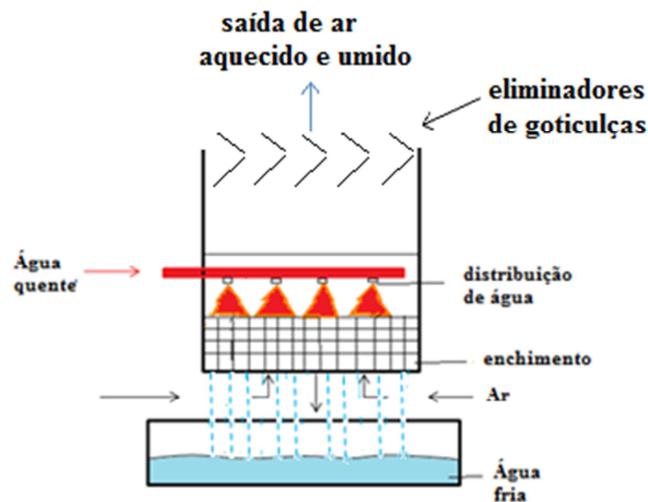


Figura 2.5 – Esquema de torre mecânica com tiragem forçada (adaptado pela autora de Mello,2008).

- b. **Torre de tiragem induzida** - o ar é aspirado na torre por exaustores no topo do equipamento, na saída de ar. Nessa configuração a corrosão nas hélices é mais preocupante.

Quanto aos movimentos relativos entre o ar e a água, classificam-se em:

- a) **Torre em contracorrente** - Torre de resfriamento de água através da qual o ar flui em sentido contrário à corrente de água. Esse projeto utiliza venezianas na entrada de ar. Os eliminadores de gotas são colocados no topo da torre. A Figura 2.6 ilustra uma torre contracorrente.

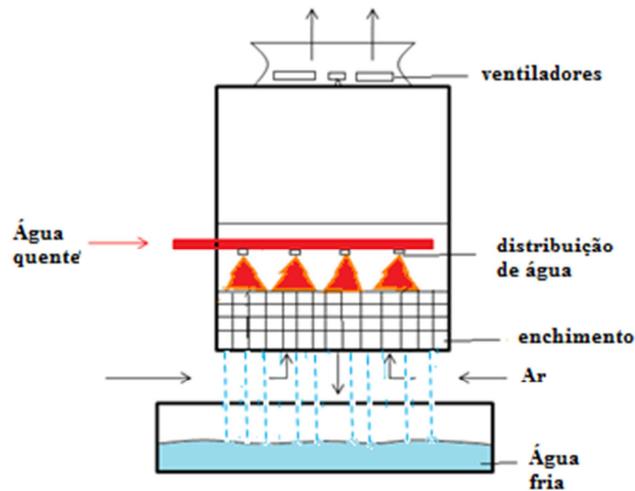


Figura 2.6: Torre úmida com acionamento mecânico (induzido) fluxo contracorrente (adaptado pela autora de Mello,2008).

b) Torre em corrente cruzada – Torre de resfriamento de água através da qual o ar flui perpendicularmente à corrente da água. Esse projeto utiliza venezianas ao longo das paredes da torre e os eliminadores de gotas são colocados no centro da torre. A Figura 2.7 ilustra uma torre corrente cruzada.

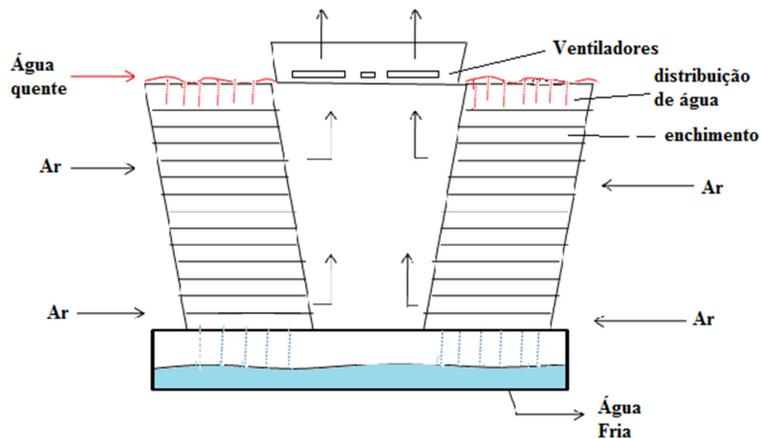


Figura 2.7: Torre úmida com acionamento mecânico (induzido) fluxo cruzado (adaptado pela autora de Mello,2008).

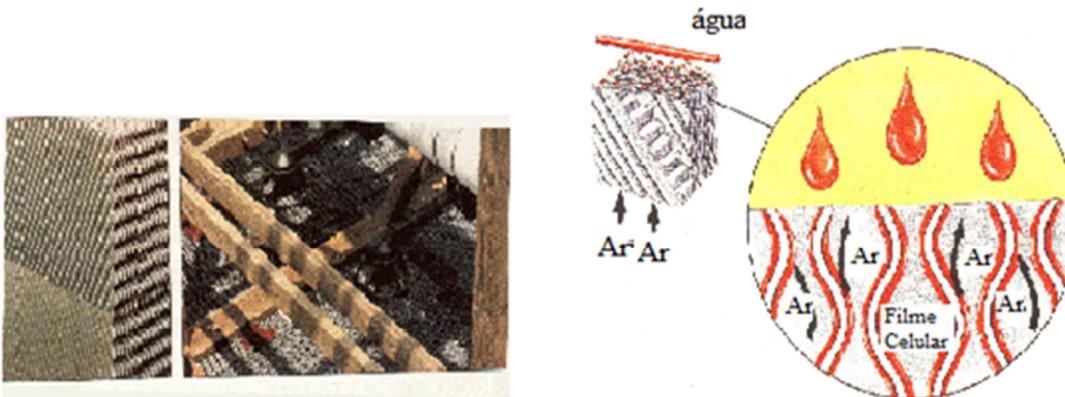
Podem ser classificadas quanto ao número de células:

a) **Unicelulares** – Possuem apenas uma célula, que é a menor subdivisão 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 fluxos de ar e água.

b) **Multicelulares** – Possuem várias células.

O recheio da torre pode ser:

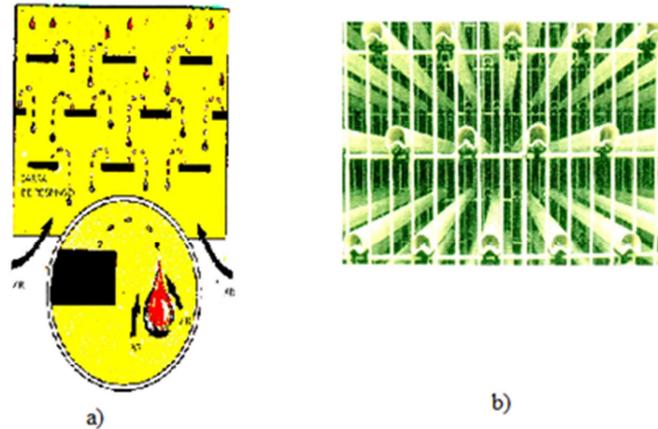
- Colméia (ou filme): maximiza a área e o tempo de contato. O recheio tipo filme faz com que a água flua em uma camada fina sobre folhas espaçadas onde há maior transferência de calor;



Fonte: www.seeds.usp.br/pir/arquivos/congressos/CLAGTEE2003/Papers/EUE B-245.pdf

Figura 2.8: recheio tipo filme.

- Barra de respingo: quando a água escoar, forma várias gotículas, deste modo ela entra em contato com o ar com melhor eficiência.



Fonte: www.seeds.usp.br/pir/arquivos/congressos/CLAGTEE2003/Papers/EUE B-245.pdf

Figura 2.9. Enchimento tipo respingo: (a) barras de PVC; (b) barras de madeira.

Como foi dito anteriormente, o recheio tipo filme possui algumas desvantagens, porque se houver impurezas na água, lodo, incrustações biológicas podem entupir a colméia.

As torres também podem ser caracterizadas pelos locais da construção: torres em campo erguido são aquelas em que a atividade de construção primária ocorre no local de uso final. Todas as torres grandes, e a maioria das pequenas, são pré-fabricadas, pré-moldadas e enviadas para o local de montagem final. O trabalho e a supervisão da montagem são geralmente fornecidos pelo fabricante da torre de resfriamento. Já as torres montadas na fábrica, submetem-se praticamente toda a montagem em seus pontos de fabricação, quando então são enviadas para o local em poucas seções por um meio de transporte. Uma torre pequena seria enviada intacta. Torres grandes, com multi-células, são montadas como “células” ou “módulos” e são enviadas para serem montadas pelo usuário. Torres montadas na fábrica são também conhecidas como torre ‘empacotadas’ ou ‘unitária’.

2.4 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Estudos já foram feitos utilizando RNA em torres de resfriamento com tiragem mecânica em escoamento contracorrente. A seguir serão mostrados três exemplos de estudos realizados com escoamento contracorrente.

O primeiro, utilizando RNA em torres de resfriamento contracorrente os autores M. Hosoz, H.H. Ernunc e H. Bulgurcu (2006) encontraram o desempenho térmico da torre sob uma ampla variação de condições de operação.

Eles também constataram que é bastante difícil modelar com precisão o desempenho de uma torre de resfriamento usando técnicas clássicas, as equações diferenciais são complexas, a alternativa foi utilizar RNA. A rede neural é usada para estimar os parâmetros de saída do sistema desejado quando dados experimentais são fornecidos. Na pesquisa realizada por eles, uma RNA foi usada para prever o desempenho de uma torre de resfriamento contracorrente. Foram utilizados 81 dados experimentais, sendo 70% dos dados para treinamento da rede e o restante para o teste. Os dados experimentais foram normalizados, para um melhor treinamento da rede.

Os autores obtiveram um bom desempenho utilizando a RNA, com um coeficiente de correlação na *range* entre 0,975 – 0,994, um erro relativo médio na *range* entre 0,89 – 4,64% e uma fração absoluta na *range* entre 0,9978 – 0,994. Chegaram à conclusão que este pode como alternativa, usar RNA para obter o desempenho de uma torre de resfriamento com um alto grau de precisão.

O segundo estudo foi realizado por Yasar Islamoglu (2007), que usou a RNA para avaliar o desempenho térmico de uma torre de resfriamento contracorrente. Segundo o autor, a maioria das torres possui recheio para aumentar a área de contato entre o ar e a água, melhorando a transferência de calor e massa, porém, quando se usa recheio, é muito difícil prever analiticamente o verdadeiro desempenho da torre. Yasar também fez análise de outros autores que utilizaram RNA para seus estudos. Sreekanth usou RNA para avaliar o coeficiente de transferência de calor superficial entre a interface líquido-sólido. Diaz simulou o desempenho de um trocador de calor. Kalogirou usou RNA para prever o desempenho um tipo de aquecedor solar de água com circulação forçada. Pacheco-Vega modelou o fenômeno de transferência de calor em um sistema de trocador de calor usando RNA.

O autor desenvolveu um modelo de RNA com algoritmo *BackPropagation* para determinar o desempenho térmico da torre de resfriamento contracorrente. Ele mostrou que uma rede bem

treinada fornece resultados rápidos e consistentes e é um ótimo recurso para avaliar o desempenho da torre.

O terceiro estudo, segundo a pesquisa de Xiaoni Qi, Zhenyan Liu, Dandan Li (2006), que desenvolveram um modelo dimensional e analisaram o processo de transferência de calor e massa de uma torre de resfriamento com spray. Foi usado o conceito RNA para propor um desenvolvimento computacional para ajudar a avaliação da temperatura de saída da água de um dado sistema, com dados obtidos experimentalmente. A função do recheio na torre é distribuir o fluxo de água e proporcionar uma maior área de contato entre o ar e água. Porém pode haver incrustações, que afetam o desempenho térmico reduzindo a eficiência e capacidade da torre. Nas torres convencionais, devido à deposição de sal no recheio e subsequente bloqueio do fluxo de ar, o desempenho térmico diminui depois de um tempo.

Para estes autores, encontrar os valores de transferência de calor e massa entre o ar e a água com um modelo matemático exige muitos cálculos. Assim, eles usam RNA para estimar valores atuais dentro de certo limite de erro, quando dados experimentais são fornecidos. A vantagem de usar RNA para simular processos térmicos é que, depois de treinado, elas representam um caminho rápido e confiável para predizer seu desempenho. O modelo RNA aplicado para simular as características na torre de resfriamento sem recheio foi alcançado pelo treinamento *BackPropagation* da rede neural. O programa computacional foi realizado sob o ambiente do MatLab. Para predizer os fins, o modelo foi construído para identificar oito variáveis de entrada e 1 de saída, sendo 17 nós na camada intermediária, encontrado por tentativa e erro. Os dados experimentais foram fornecidos por Jiangsu Seagull Cooling Tower Co., LTD in China.

Os autores fizeram uma comparação entre os modelos de RNA e o modelo HMT (*Hypermedia Modeling Technique*) e constataram que o modelo RNA é bem melhor, com um erro relativo médio de 1,13% e o modelo HMT ficou com um erro relativo médio de 9,42%. Este estudo mostrou que o modelo RNA pode ser usado por fabricantes com um alto grau de precisão e confiabilidade para determinar a temperatura de saída da água. Além disso, a RNA apresentada não requer de uma compreensão de transferência de calor e massa, que na verdade é um

fenômeno muito complexo para ser expresso por formulas matemáticas. E os autores concluíram que a RNA é confiável para determinar o desempenho térmico da torre de resfriamento com spray, sob varias condições operacional.

O *Hypermedia Modeling Technique* (HMT) é um método orientado a objetos, desenvolvido com uma grande base de pesquisas envolvendo modelagem de dados e projetos de aplicações multimídia. Segundo seu autor Nemetz, 1995, o método HMT possui quatro fases para a descrição de uma aplicação:

- Modelo de Objetos: descreve os objetos do domínio da aplicação e seus relacionamentos;
- Modelo de Hiper objetos: refina o modelo de abjetos, adicionando maior semântica aos relacionamentos;
- Modelo de Navegação: descreve os elos e as estruturas de acesso;
- Modelo de Interface: descreve como o usuário percebera os objetos hipermídia.

2.5 – FATORES QUE INFLUENCIAM A OPERAÇÃO

O desempenho de uma torre de resfriamento varia conforme a temperatura do ar ambiente, umidade do ar, temperatura de bulbo úmido, ou seja, com o clima. No verão, a temperatura de saída da água aumenta, comprometendo a operação de um condensador em uma coluna de destilação, por exemplo. Pode-se aumentar a vazão de água no sistema, visando compensar o aumento de temperatura. Em países de clima quente como o Brasil, os principais problemas de queda de desempenho na operação de torres de resfriamento ocorrem durante o verão.

No inverno, ocorre o contrário, a temperatura do ar cai e a temperatura de saída da água também cai, caso a carga térmica seja mantida constante. Para manter a temperatura da água de saída constante, pode-se diminuir a vazão de água que recircula no sistema de refrigeração.

A direção dos ventos deve ser considerada durante o projeto e instalação de uma torre de resfriamento. Deve-se também observar que fontes de calor próximas às torres de resfriamento podem influenciar sua operação. Problemas de recirculação e interferência são os mais comuns em torres de resfriamento de aspiração mecânica (BURGER, 1993).

A recirculação ocorre quando o ar quente e úmido que deixa a torre contamina o ar que está entrando na torre. Esta situação pode ocorrer devido à direção dos ventos, dificuldades de dispersão do ar de saída e formação de neblina (*fog*) (EVANS JR., 1980).

A interferência ocorre quando o ar que sai de uma torre contamina o ar de entrada de outra torre próxima; a direção dos ventos causa problemas de interferência (EVANS JR., 1980).

A formação de neblina (*fog*) ocorre quando parte do vapor de água que sai da torre condensa em pequenas gotas, devido ao contato com o ar ambiente mais frio, tornando o ar supersaturado. A formação de neblina ocorre com mais frequência no inverno, dificultando a dispersão do ar quente que sai da torre.

2.6 – FATORES QUE AFETAM O DESEMPENHO DA TORRE DE RESFRIAMENTO

O ar atmosférico que entra na torre de resfriamento possui diversas variáveis de propriedades psicrométricas e a torre reage termicamente ou fisicamente a cada uma dessas propriedades. A torre aumenta a velocidade do ar; o ar passa através da estrutura e do recheio da torre; é aquecido e expandido, satura com a mistura, é comprimido e responde a todos os efeitos térmicos e aerodinâmicos que a torre pode produzir. Finalmente, o ar retorna para a atmosfera como vapor.

A carga térmica, o *range* e a temperatura de bulbo úmido são variáveis que afetam o tamanho da torre de resfriamento. Isto pode ser notado quando a temperatura de bulbo úmido diminui a temperatura da água resfriada também diminui mantendo fixas as demais condições (PANNKOKE, 1996).

A temperatura de bulbo úmido é um fator importante no desempenho operacional de uma torre de resfriamento, bem como no seu dimensionamento e seleção.

A escolha do valor da temperatura de bulbo úmido para o projeto não é simples, pois esta variável está em função das condições ambientais locais que variam de lugar para lugar e também dependendo da hora.

No diagrama mostrado na Figura 2.10, estão indicadas as variações das condições térmicas do ar ao passar por uma torre de resfriamento (considerando que o ar deixa a torre de resfriamento com umidade relativa igual a 100%). Na entrada da torre, para o ponto E do diagrama psicrométrico, o ar está na condição ambiente, na saída, no ponto S do referido diagrama, o ar está saturado ($Y_r = 100\%$).

O aumento de entalpia ΔH_{ar} verificado é aquele correspondente à quantidade total de calor trocado com a água, provocando a elevação da temperatura de bulbo seco do ar.

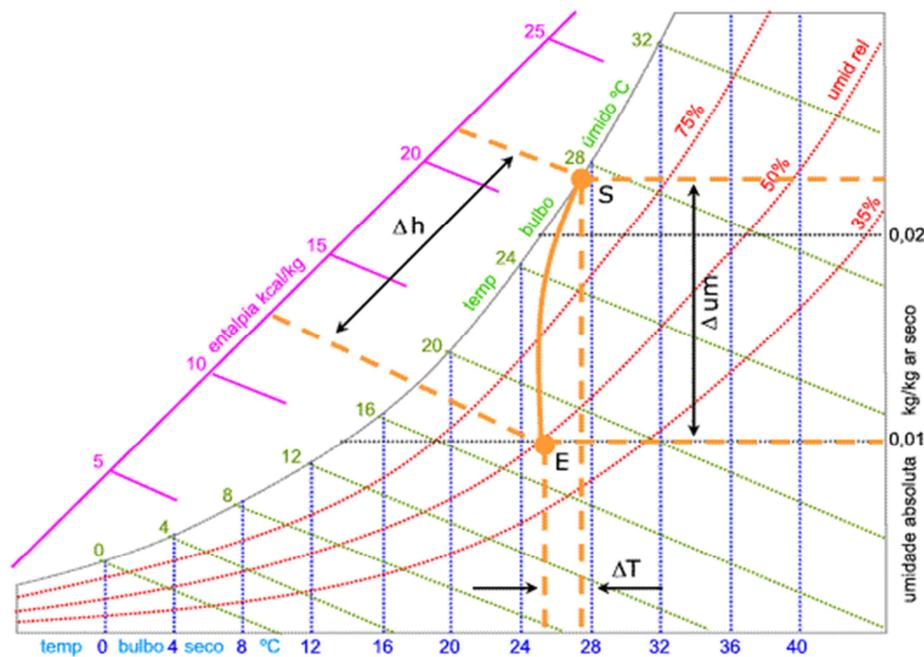


Figura 2.10 – Diagrama psicrométrico de uma torre de resfriamento. (Fonte: Mello, 2008).

Para torre de resfriamento com escoamento cruzado, uma característica importante é a baixa perda de carga apresentada pelo equipamento. Este fato possibilita o emprego de vazões mais elevadas, e conseqüentemente uma melhoria no desempenho do resfriamento.

Em torres de resfriamento com escoamento cruzado, há possibilidade de se instalarem os ventiladores na parede lateral; desta maneira, pode-se aumentar a altura do recheio sem a necessidade de alterar a posição do ventilador.

Outra informação importante são as curvas de desempenho, que estão relacionadas às seguintes condições de operação: temperatura de bulbo úmido, range e *approach*, fluxo volumétrico de água e o fator de avaliação. Este fator representa o número de unidades de torre requerido para a situação (EVANS, 1980). Essas curvas de desempenho dependem da característica do recheio na torre e das vazões de ar e água pelo equipamento (CASTRO, et. al., 2000).

A Pressão de Vapor saturado (P_{vs}) é a máxima pressão possível de vapor de água em certa temperatura. Para temperatura de 0 a 200°C, (ASHRAE, 2009).

$$\ln(P_{vs}) = \frac{C8}{T} + C9 + C10 \cdot T + C11 \cdot T^2 + C12 \cdot T^3 + C13 \cdot \ln \cdot T \quad 2.2$$

onde:

P_{vs} = pressão de saturação, Pa

T = temperatura absoluta, K = °C + 273,15

C8= -5,8002206E+03

C9= 1,3914993E+00

C10= -4,864023E-02

C11= 4,1764768E-05

C12= -1,4452093E-08

C13= 6,5459673E+00

A Temperatura de bulbo úmido é a temperatura do ar (no estado estacionário) medida com um termômetro comum, cujo bulbo de vidro foi coberto por uma gaze úmida. Essa temperatura tem essa denominação pelo fato do bulbo do termômetro estar úmido quando é feita a leitura da

temperatura. Este termômetro é acoplado a um psicrômetro giratório, conforme a Figura 2.11, submetida a uma corrente de ar não saturada.

O psicrômetro giratório é um aparelho composto por dois termômetros, um de bulbo úmido e outro de bulbo seco, acoplados em um suporte giratório. Para acelerar o regime permanente e para intensificar o transporte de calor por convecção (tornando os efeitos de radiação térmica desprezível), os termômetros são agitados, girando-se o suporte pelo cabo. As leituras são realizadas quando os valores das temperaturas se estabilizam.

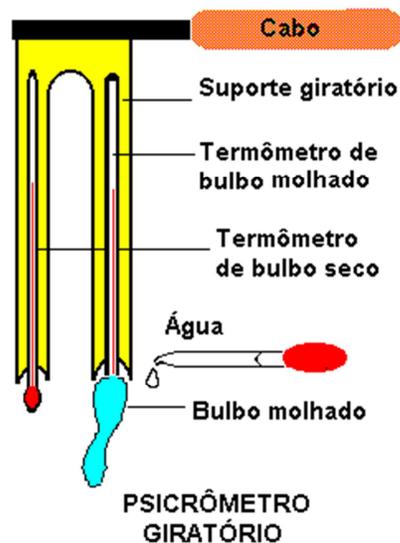


Figura 2.11 – Psicrômetro giratório (Fonte: Mello,2008).

Na temperatura de bulbo úmido, a taxa de calor transferido do gás para o líquido pode ser igualada pelo produto da taxa de vaporização e a soma do calor latente de vaporização na temperatura de T_{BU} e o calor sensível de vapor; desde que a radiação possa ser negligenciada.

Os fluxos de calor transferidos pelo ar (para a mecha) e pela água (para o ar) são expressos, respectivamente:

$$Q_{ar} = (h_{ar,con} + h_{ar,rad}) \cdot (T_{ar} - T_{BU}) \quad 2.3$$

$$Q_{\acute{a}gua} = N_{\acute{a}gua} \cdot [\lambda_{bu} + c_m \cdot (T_{\acute{a}gua} - T_{BU})] \quad 2.4$$

A equação (2.3) expressa o fluxo de calor transferido pelo ar, onde $h_{ar,con}$ e $h_{ar,rad}$ são os coeficientes de transferência de calor por convecção e por radiação para o ar, respectivamente, T_{BU} é a temperatura de bulbo úmido (temperatura da interface ar - líquido) e T_{ar} é a temperatura do ar que circula em torno da mecha. A temperatura da interface água-ar (T_i) é igual à temperatura de bulbo úmido. A equação (2.4) expressa o fluxo de calor transferido pela água, onde $N_{\acute{a}gua}$ é o fluxo mássico de água, $T_{\acute{a}gua}$ é a temperatura inicial da água, λ_{bu} é o calor latente de vaporização na temperatura de bulbo úmido e c_m é o calor específico médio da água.

O termo $c_m \cdot (T_{\acute{a}gua} - T_{BU})$] da equação (2.4) que representa o fluxo de calor sensível transferido pode ser desprezado, porque é muito pequeno em relação ao calor latente de evaporação; assim a equação torna-se:

$$Q_{\acute{a}gua} = N_{\acute{a}gua} \cdot \lambda_{bu} \quad 2.5$$

Em regime permanente, admitindo-se processo adiabático, tem-se $Q_{ar} = Q_{\acute{a}gua}$; igualando-se as equações (2.3) e (2.5), tem-se:

$$(h_{ar,con} + h_{ar,rad}) \cdot (T_{ar} - T_{BU}) = N_{\acute{a}gua} \cdot \lambda_{bu} \quad 2.6$$

O transporte de massa ($N_{\acute{a}gua}$) é expresso por:

$$N_{\acute{a}gua} = K_x \cdot (Y_{bu} - Y_0) \quad 2.7$$

onde Y_{bu} é a umidade na interface, K_x é o coeficiente global de interferência de massa e Y_0 é a umidade ambiente.

Substituindo a equação (2.7) na equação (2.6) e desprezando o coeficiente de transferência de calor por radiação, tem-se:

$$h_{con} \cdot (T_{ar} - T_{BU}) = K_x \cdot \lambda_{bu} \cdot (Y_{bu} - Y_0) \quad 2.8$$

$$(T_{ar} - T_{BU}) = \frac{K_x \cdot \lambda_{bu}}{h_{con}} \cdot (Y_{bu} - Y_0) \quad 2.9$$

Para o caso de escoamento turbulento ao redor de um cilindro úmido, como é o termômetro de bulbo úmido, considerando-se ar como gás não-condensável, dados experimentais mostram que (FOUST ET al., 1982):

$$\frac{h_{con}}{K_x} = c_{sa} \cdot \left(\frac{Sc}{Pr}\right)^{0,56} \quad 2.10$$

c_{sa} = calor específico do ar nas condições de saturação adiabática, J/kg.K

Os números de Schmidt (Sc) e Prandtl (Pr) são expressos como:

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{k} = \frac{\alpha_{qm}}{\alpha_t} \quad 2.11$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho \cdot D} = \frac{\alpha_{qm}}{\alpha_m} \quad 2.12$$

O número de Prandtl é adimensional que propaga a razão entre a difusividade molecular do momento (α_{qm}) e a difusividade molecular térmica (α_t). O numero de Schmidt é a razão entre a difusividade molecular do momento e a difusividade molecular mássica (α_m).

Para o sistema vapor d'água-ar, podemos considerar a relação $\frac{Sc}{Pr} = 1$. Assim, o valor de $\frac{h_{con}}{K_x}$, pode ser razoavelmente substituído por c_{sa} , dentro de faixas moderadas de temperatura e umidade, desde que o escoamento seja turbulento (FOUST et AL., 1982).

A analogia entre $\frac{h_{con}}{K_x}$ e c_{sa} foi descoberta por W.K. Lewis e por isso é denominada relação de Lewis. O número de Lewis é definido como $Le = \frac{h_{con}}{K_x \cdot c_{sa}}$ e expressa a razão entre a transferência de calor por convecção e transferência de calor que ocorre devido à transferência de massa. Quando Le é igual a 1, a relação de Lewis é válida.

3 – TORRES DE RESFRIAMENTO

A seguir serão demonstrados os balanços de massa e energia de dois tipos de torres de resfriamento, com escoamento contracorrente e com escoamento cruzado. Fazendo uma breve introdução sobre o transporte de calor e massa das duas torres. Explicando como determina o projeto para cada uma delas.

3.1 – TORRE DE RESFRIAMENTO CONTRACORRENTE - BALANÇO DE MASSA E ENERGIA

A Figura 3.1 é um esquema de uma torre com área transversal S . Na torre contracorrente a área de escoamento do gás-líquido é constante. Nos balanços de massa e energia mostrados nas equações (3.1) à (3.25), considera-se que a vazão de água adicionada ao sistema para repor as perdas de água por evaporação, arraste e purga (*make-up*) é igual à vazão da água evaporada. CHEREMISINOFF (1986, In: EL-DESSOUKY; AL HADDAD; AL JUWAYHEL,1997) relata que em condições normais de operação, as perdas por evaporação e arraste são inferiores a 2%.

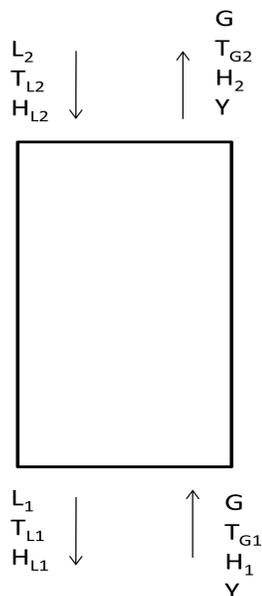


Figura 3.1: Fluxo contínuo contracorrente do gás-líquido.

O balanço de massa de água pode ser expresso por:

$$L_2 + G \cdot Y_2 = L_1 + G \cdot Y_1 \quad 3.1$$

$$L_2 - L_1 = G \cdot (Y_2 - Y_1) \quad 3.2$$

onde

- 1 fundo da torre
- 2 topo da torre
- L vazão de água, kg/s
- G vazão do ar, kg/s
- Y umidade, kg de água/kg de ar seco

Para o balanço de energia global da torre:

$$L_2 \cdot H_{L2} + G \cdot H_1 = L_1 \cdot H_{L1} + G \cdot H_2 \quad 3.3$$

$$L \cdot dH_L = G \cdot dH \quad 3.4$$

Uma vez que a evaporação é muito pequena, pode-se aproximar $L_2 \approx L_1$.

3.1.1 – TORRE DE RESFRIAMENTO CONTRACORRENTE - TRANSPORTE DE CALOR E MASSA

Para que um método de caracterização de desempenho de uma torre de resfriamento possa ser obtido, é necessário compreender o que acontece no seu interior. Seja uma gota de água em contato com uma corrente de ar, conforme a Figura 3.2.

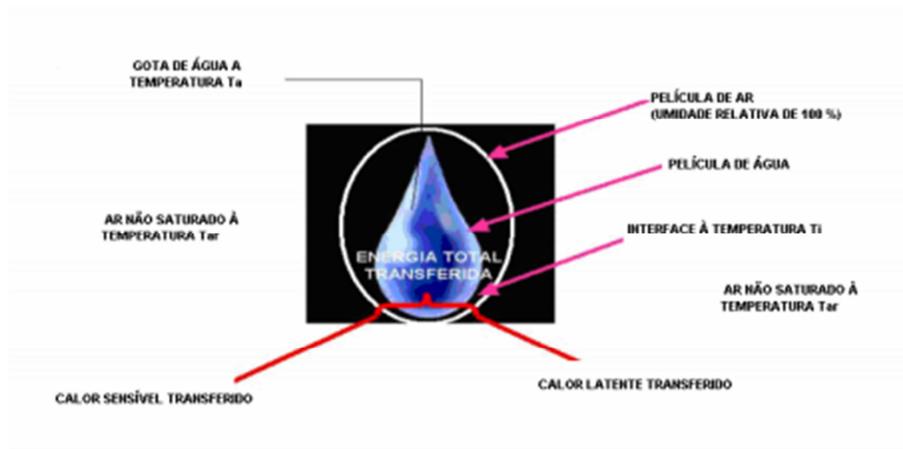


Figura 3.2 – Representação esquemática da transferência de calor de uma gota d'água

FONTE –MELLO,2008, p.43.

Entre a massa de água (gota) e a massa de ar, supõe-se a existência de uma película água-ar, separada por uma interface. A transferência de massa da fase líquida para a fase gasosa ocorre devido à transferência de concentração (ou diferença de pressão de vapor) entre as fases; a esse processo de transferência de massa dá-se o nome de difusão (CHEREMISINOFF;CHEREMISINOFF, 1981; KERN, 1990).

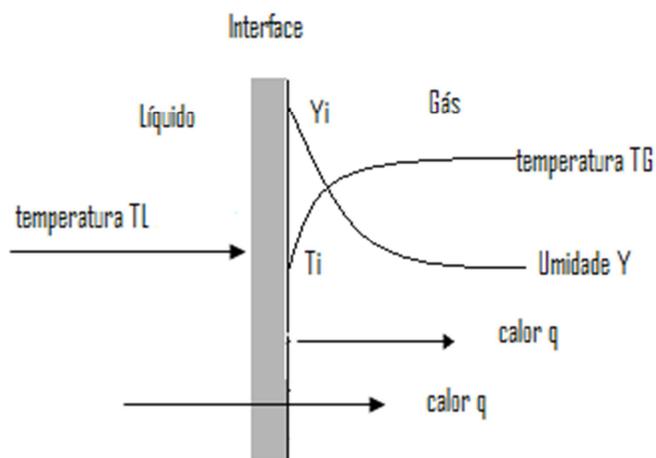


Figura 3.3: Condições de um umidificador adiabático.

Em uma torre de resfriamento, ocorre a difusão da água para o ar, sendo o ar considerado insolúvel em água. A força motriz ($Y - Y_i$) varia em função da altura da torre, à medida que ocorre a transferência da água para o ar. A transferência de massa é acompanhada da transferência de calor sensível e calor latente entre a água e o ar.

Em uma torre de resfriamento em contracorrente, a temperatura do ar está acima da temperatura da interface, mas a água continua sendo resfriada, pois a temperatura da interface é inferior à temperatura da fase líquida. Por outro lado haverá fluxo de calor sensível da fase gasosa para a interface. Calor latente é transferido da fase líquida para a interface, que por sua vez transmite calor latente da interface para a fase gasosa. Como mostra a Figura 3.3.

Na Figura 3.4, estão representados o topo e o fundo de uma torre de resfriamento com escoamento de água – ar em contracorrente. O fundo está representado na Figura 3.4 (a); neste ponto, tem-se o ar entrando com uma temperatura que pode ser maior que a temperatura da água, mas a água está saindo resfriada, pois a temperatura da interface é menor que a temperatura média da água. A umidade na interface é maior do que a média do gás, isto constitui a força motriz para a transferência de massa do vapor d'água para o ar.

Existem casos em que, no fundo da torre, a temperatura do ar que está entrando é menor que a temperatura da água que está saindo, conforme a Figura 3.4 (b), mas ainda acima da temperatura da interface; com isso, continua havendo transferência de calor sensível do filme de gás, embora em menor escala, pois a força motriz diminui.

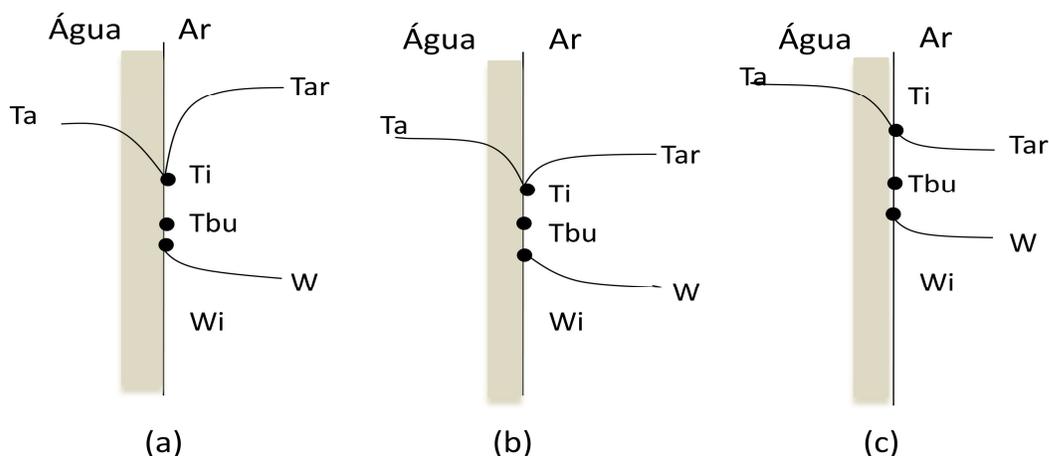


Figura 3.4 – Condições no fundo da torre de resfriamento (a), (b) e no topo da torre (c) (adaptado pela autora de Mello,2008).

A Figura 3.4 (c) representa o topo de uma torre de resfriamento. No topo, a água de entrada está “quente” porque vem do processo e o ar está em princípio com umidade relativa “elevada”, pois já percorreu todo o enchimento da torre, trocando calor e massa com a água em contracorrente. Mas estes dois fluidos, ao entrarem em contato, provocam o seguinte fenômeno: a água que está com temperatura maior do que a temperatura do ar cede calor para o ar, elevando a sua temperatura e sua pressão de vapor, diminuindo conseqüentemente a umidade relativa. Com isso, ocorre a evaporação da parte de água em contato com este gás, resfriando assim a água líquida (MELLO,2008).

O fluxo da transferência de calor da fase líquida para a interface é expresso por:

$$q_L = h_L \cdot (T_L - T_i) \quad 3.5$$

onde:

T_L temperatura do líquido, °C

T_i temperatura na interface, °C

q_L fluxo de calor transmitido pela água, $W \cdot m^2$

h_L coeficiente de transferência de calor, água para interface, $W/m^2 \cdot K$

De acordo com CHEREMISINOFF; CHEREMISINOFF (1981) e KERN (1990), a vazão de água pode ser considerada constante sem acarretar erros, pois a perda de água por evaporação atinge menos de 2% da água que alimenta a torre, a variação de H da água é expressa por:

$$dH_L = L \cdot cp_L \cdot dT_L \quad 3.6$$

O balanço de energia na torre de resfriamento pode ser expresso por:

$$L \cdot cp_L \cdot dT_L = G \cdot dH \quad 3.7$$

O fluxo de calor recebido pelo ar pode ser expresso por:

$$q_G = h_G \cdot (T_i - T_G) \quad 3.8$$

A variação de entalpia da água é igual à quantidade de calor transferida pela fase líquida em um comprimento de recheio dz e área de secção transversal S , com área específica de transferência de calor a_t , assim a taxa de transferência de calor sensível do líquido para a interface é:

$$L \cdot cp_L \cdot dT_L = h_L \cdot a_t \cdot (T_L - T_i) \cdot S \cdot dz \quad 3.9$$

onde:

a_t área específica de transferência de calor, m^2/m^3

cp_L capacidade calorífica do líquido, $J/kg \cdot K$

T_G temperatura do ar, °C

S área de seção transversal, m²

h_G coeficiente de transferência de calor, interface para o ar, W/m².K

q_G fluxo de calor transmitido pelo ar, W/m²

Dividindo a equação (3.7) por S , temos:

$$L'' \cdot cp_L \cdot dT_L = h_L \cdot a_t \cdot (T_L - T_i) \cdot dz \quad 3.10$$

onde:

L'' é a velocidade superficial do líquido (velocidade superficial de um fluxo é definida pela relação entre a vazão L pela área de seção transversal S).

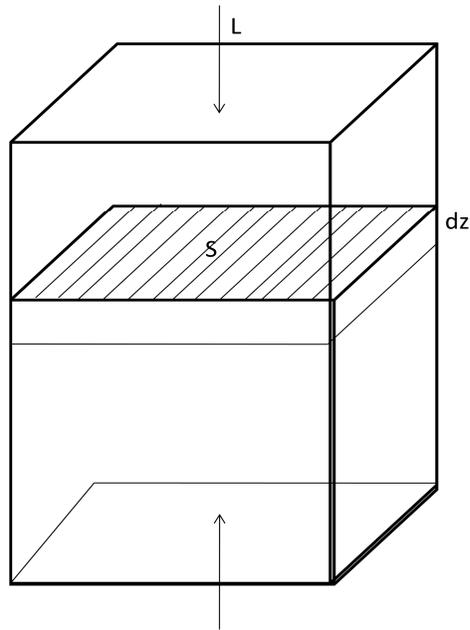


Figura 3.5: área da seção transversal.

O fluxo da transferência de calor da interface para o ar é expresso por:

$$q_i = h_G \cdot a_t \cdot (T_i - T_G) \cdot dz \quad 3.11$$

O fluxo de transferência de massa da interface para o ar é expresso por:

$$q_G = k_G \cdot a_m \cdot (Y_i - Y_G) \cdot \lambda \cdot dz \quad 3.12$$

onde:

k_G coeficiente de transferência de massa, interface para ar, kg/s. m²

a_m área específica de transferência de massa, m²/m³

λ calor latente de vaporização da água, J/kg

Z altura, m

q_i fluxo de calor transmitido pela interface, W/m²

A variação de entalpia da fase gasosa é expressa por:

$$dH = cp_G \cdot dT_G + \lambda \cdot dY \quad 3.13$$

A quantidade de calor transferida para o ar é igual à variação de entalpia do ar, portanto, pode-se substituir q_G da equação (3.11) por dH , assim:

$$dH = h_G \cdot a_t \cdot (T_i - T_G) \cdot dz + k_G \cdot a_m \cdot \lambda \cdot dY \cdot dz \quad 3.14$$

Considerando o processo adiabático, tem-se que $dH_L = dH$, igualando as equações (3.6) e (3.14), obtém:

$$L \cdot cp_L \cdot dT_L = h_G \cdot a_t \cdot (T_i - T_G) \cdot dz + k_G \cdot a_m \cdot \lambda \cdot dY \cdot dz \quad 3.15$$

Na equação (3.15) foi considerado que o calor específico de ar úmido é igual ao calor específico de ar seco (cp_G).

Substituindo a equação (3.15) na (3.7), temos:

$$G \cdot dH = h_G \cdot a_t \cdot (T_i - T_G) \cdot dz + k_G \cdot a_m \cdot \lambda \cdot dY \cdot dz \quad 3.16$$

A equação (3.16) é a relação fundamental para o processo adiabático gás - líquido contracorrente.

Resfriamento da água com ar

Assumindo como o recheio da torre completamente molhado, podemos reorganizar a equação (3.16), colocando k_G em evidência e aplicando a relação de Lewis, obtém:

$$\begin{aligned} G \cdot dH &= k_G \cdot a \cdot \left[\frac{h_G}{k_G} \cdot (T_i - T_G) + \lambda \cdot (Y_i - Y_G) \right] \cdot dz & 3.17 \\ &= k_G \cdot a \cdot [c_s \cdot (T_i - T_G) + \lambda \cdot (Y_i - Y_G)] \cdot dz \\ &= k_G \cdot a \cdot [H_i - H_G] \cdot dz \end{aligned}$$

onde:

c_s calor específico do ar úmido, J/kg.K

Lembrando que:

$$C_s = cp_G + Y \cdot cp_u \quad 3.18$$

A equação (3.17) baseia-se na hipótese de que a área para transferência de massa é a mesma para a transferência de calor, ou seja, $a_t = a_m = a$. A hipótese é válida quando a vazão de líquido é suficientemente alta para que o recheio da torre esteja completamente molhado (CORTINOVIS, 2004).

Lembrando que na equação (3.17), o coeficiente de transferência de massa (k_G) é usado como Força Motriz.

Como já foi explicado anteriormente, é necessário conhecer o valor de $\frac{h_G}{k_G}$, conhecido como razão psicométrica. Valores de h_G e k_G podem ser estimados por uma forma particular de superfície molhada, usando a analogia de transferência de calor e de massa. Utilizando o número de Schmidt (Sc) e o número de Prandtl (Pr):

$$Sc = \frac{\nu}{D} = \frac{\mu}{\rho \cdot D} = \frac{\text{taxa de difusão viscosa}}{\text{taxa de difusão massica}} \quad 3.19$$

onde:

- ν viscosidade cinemática, m^2/s
- D difusividade de massa, m^2/s
- μ viscosidade dinâmica do fluido, $kg/m.s$
- ρ densidade, kg/m^3

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{cp \cdot \mu}{k} = \frac{\text{taxa de difusão viscosa}}{\text{taxa de difusão termica}} \quad 3.20$$

onde:

- α difusividade térmica, m^2/s

cp calor específico, J/kg.K
 k condutividade térmica, W/m.K

Observando as equações (3.19) e (3.20), Lewis notou semelhança entre elas, e dividindo o número de Schmidt pelo número de Prandtl tem a relação de Lewis:

$$Le = \frac{Sc}{Pr} = \frac{\text{difusividade termica}}{\text{difusividade massica}} \quad 3.21$$

O número Lewis (Le) é um número adimensional definido como a relação de difusividade térmica e da difusividade mássica. É utilizado para caracterizar os fluxos onde há processos simultâneos de transferência de calor e massa por convecção.

A temperatura de saturação adiabática, T_{sa} , seria idêntica à temperatura de bulbo úmido, T_{BU} , se $C_s = h_G/k_G$. Para sistemas ar-água, estas temperaturas são quase iguais para umidades moderada; que é: $h_G/k_G \cdot C_s \approx 1$. Esta equação é chamada relação de Lewis (Lewis,1922). Isto deve ser enfatizado que é apenas para sistemas ar-água, não para outros sistemas.

Como alternativa, valores experimentais da razão psicrométrica podem ser usados. Henry e Epstein (1970) examinaram dados e métodos de medidas e encontraram algumas medidas próprias. O resultado a partir de dados de 18 sistemas gás-vapor são correlatados por:

$$\frac{h_G}{k_G \cdot C_s} = \left(\frac{Sc}{Pr}\right)^{0,567} = Le^{0,567} \quad 3.22$$

Simplificando a equação (3.17), temos:

$$G \cdot dH = k_G \cdot a \cdot [H_i - H_G] \cdot dz \quad 3.23$$

Integrando a equação (3.23), e assumindo que $H_i = H_L = H'$, obtém:

$$Z = \frac{G}{a.k_G} \cdot \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H'-H_G} = H_{tG} \cdot N_{tG} \quad 3.24$$

A integral $\int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H'-H}$ é definida como o número de unidades de transferência global (N_{tG}).

Já a relação $\frac{G}{a.k_G}$ é conhecida como a altura de uma unidade de transferência de massa global (H_{tG}).

Assim, a altura total da torre pode ser calculada por:

$$Z = H_{tG} \cdot N_{tG} \quad 3.25$$

A equação (3.25) é considerada a equação de projeto e de análise de desempenho de uma torre de resfriamento contracorrente.

3.1.2 – PROJETO PRELIMINAR PARA ESTIMAR UMA TORRE DE RESFRIAMENTO CONTRACORRENTE

Para o projeto de uma torre de resfriamento é necessário seguir alguns passos (Ludwig, Ernest., 1995):

1. Determinar a temperatura de entrada da água para a torre;
2. Determinar a carga de calor a ser executada pela torre, baseado na necessidade da temperatura de entrada e saída de água e taxas de fluxo;
3. Estabelecer a temperatura de bulbo úmido para o ar no local geográfico da torre. Usar os registros meteorológicos se outros dados não estão disponíveis;

4. Preparar um gráfico de curva de saturação para ar-água. Estabelecer a linha de operação iniciando-se pelo conjunto de pontos da temperatura de saída de água fria e entalpia do ar pela temperatura de bulbo úmido.
5. Integrando pelo gráfico: $1/h'-h$ versus Temperatura, determina-se o número de unidades de transferência;
6. O valor da integral é o número de unidades de transferência, equação de Merkel, com esse valor encontrar-se o número de recheio;
7. Se o número de plataformas calculado der exorbitante para a altura da torre, o procedimento deve ser repetido utilizando um novo valor de L/G ou um novo valor de *approach*, ou um novo valor de Temperatura de bulbo úmido ou alguma combinação destas;
8. Para o valor de L/G assumido e conhecendo o valor de L , calcule a vazão de ar G necessária.

Existe uma alternativa para o projeto de uma torre de resfriamento sem precisar usar a equação de Merkel, podem-se usar curvas de desempenho:

1. Siga os passos (1), (2) e (3) do procedimento esboçado;
2. Para evitar os passos da integração, a curva de desempenho, Figura 3.6, deve ser usada;
3. Na Figura 3.6 a intersecção com o *approach* dá o valor de L/G que substitui a integral de Merkel.
4. A partir da vazão do líquido L conhecida e o valor de L/G assumido, dá para calcular o valor necessário da vazão de ar G .

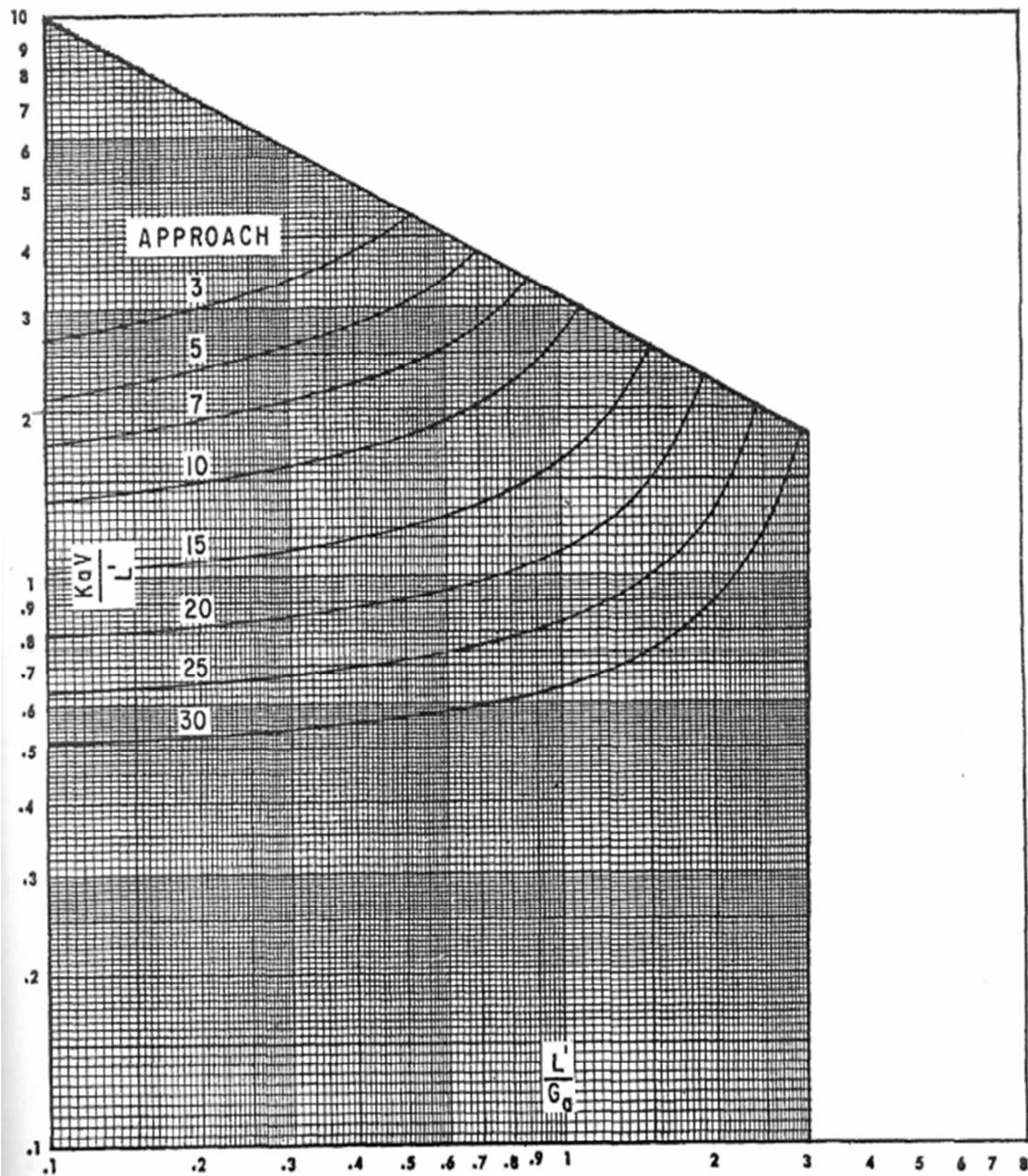


Figure 9-126A. 65°F wet bulb; 30°F range, counterflow cooling tower performance curves. Used by permission of Counterflow Cooling Tower Performance, The Pritchard Corp. (now, Black and Veatch Pritchard Corp.) (1957).

Figura 3.6 – Curva de desempenho para Torre de Resfriamento contracorrente (Ludwig, Ernest., 1995).

3.2 – TORRE DE RESFRIAMENTO CORRENTE CRUZADA - TRANSPORTE DE CALOR E MASSA

Para torre com fluxo cruzado a área de escoamento do líquido não é necessariamente a mesma do gás, portanto não podemos utilizar a equação (3.24), ou seja, teremos que levar em conta o volume da torre, dx , dy e dz .

Como o escoamento é cruzado dividiremos a torre em várias células, conforme Figura 3.7. Um número igual de células horizontal e vertical é usado, assim facilita os cálculos. E quanto maior o número de células que utilizarmos, menor será o erro.

Na torre com escoamento cruzada o procedimento é na realidade uma sucessão de etapas de avaliação, onde para uma dada configuração de torre (altura, largura, comprimento, etc) é estimada a temperatura de água fria. Se não for aceitável, muda-se o projeto e repete-se a avaliação. O procedimento de avaliação consiste no cálculo de todas as células. Os valores calculados para a célula A são diferentes dos calculados para a célula B.

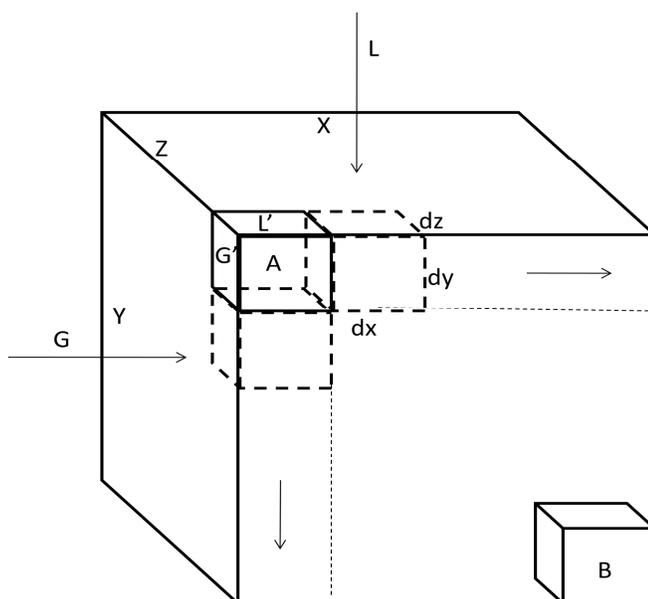


Figura 3.7: modelo de uma célula da torre de resfriamento com corrente cruzada.

- Para um elemento de volume da torre, a vazão L que entra no elemento é dada por:

$$q_L = L' \cdot c_{pL} \cdot dT_L \cdot dz \cdot dx \quad 3.26$$

Onde:

$L' = \frac{L}{x.z}$ - é a vazão de água por unidade de área.

$$dT_L = T_{Le} - T_{Ls}$$

-Para a entrada de ar no elemento:

$$q_G = G' \cdot dH \cdot dz \cdot dy \quad 3.27$$

Onde:

$G' = \frac{G}{y.z}$ - é a vazão de ar por unidade de área.

$$dH = H_{Gs} - H_{Ge}$$

-Para a interface no elemento:

$$q_i = k_G \cdot a \cdot (H_i - H_{Ge}) \cdot dz \cdot dy \cdot dx \quad 3.28$$

Assim:

$$L' \cdot cp_L \cdot dT_L \cdot dz \cdot dx = G' \cdot dH \cdot dz \cdot dy = k_G \cdot a \cdot (H_i - H_{Ge}) \cdot dz \cdot dx \cdot dy \quad 3.29$$

Dividindo a equação (3.29) por dz:

$$L' \cdot cp \cdot dT_L \cdot dx = G' \cdot dH \cdot dy = k_G \cdot a \cdot (H_i - H_{Ge}) \cdot dx \cdot dy \quad 3.30$$

A dificuldade no uso destas equações reside na determinação da entalpia do ar na interface H_i para cada célula. Este problema pode ser resolvido considerando a transferência de calor no líquido. Para isso, é necessário seguir alguns passos.

- O primeiro passo é separar o que precisa ser encontrado: da equação (3.28) precisa encontrar o valor de T_{LS} . Na equação (3.29) é necessário encontrar o valor de H_{GS} , já a equação (3.30) não tem o valor de H_i . Portanto, as variáveis que precisam ser encontradas já estão destacadas.
- O segundo passo é calcular por tentativa e erro a temperatura de saída da água T_{LS} , pois a temperatura de entrada é conhecida.
- Dada uma T_{LS} , pode-se calcular a H_{GS} .
- Em seguida, pode-se calcular a entalpia e temperatura média da célula, para poder encontrar o valor de H_i .
- O próximo passo é confirmar se a T_{LS} estimada está correta. Para tal confirmação, é preciso que: $q_L = q_G = q_i$.
- Caso o passo anterior não se confirme, é necessário estimar outra T_{LS} , até chegar ao resultado esperado, utilizando um método numérico.

Com o resultado esperado, agora é necessário calcular para cada célula, tanto na vertical, quanto na horizontal. Exemplo: se for dividido em 5 (cinco) células na vertical e 5 (cinco) na horizontal, será necessário 25 (vinte e cinco) repetições do teste mencionado anteriormente.

3.3 – REDE NEURAL ARTIFICIAL

A modelagem matemática é uma ferramenta muito útil em todas as áreas da engenharia química, desde pesquisa e desenvolvimento até operação de plantas, além de avaliações de custos. A simulação matemática consiste na resolução de sistema de equações algébricas ou diferenciais, geralmente não lineares, que constituem a modelagem matemática do processo real. O objetivo da modelagem e simulação de processos é prever o comportamento do processo estudado, sem que seja necessária a realização de testes em plantas industriais, geralmente difíceis de serem realizados (LUYBEN, 1990).

LUYBEN (1990) enumerou os princípios de formulação de um modelo matemático:

- Base. As bases para os modelos matemáticos são as leis físicas e químicas fundamentais, como as leis de conservação de massa, energia e momento.
- Hipóteses. Um modelo matemático deve tentar incorporar todos os fenômenos que acontecem no processo, descrevendo-o da melhor maneira possível. No entanto, um modelo extremamente detalhado pode ser muito complexo, demorando muito tempo para ser desenvolvido e gerando dificuldades em sua resolução, tornando a solução pouco prática até mesmo inviável. As hipóteses admitidas têm como objetivo simplificar os modelos ou restringir o seu campo de aplicação. O impacto de uma hipótese em um modelo matemático deve ser cuidadosamente estudado para não prejudicar a representatividade do modelo.
- Consistência matemática. O número de variáveis deve ser igual ao número de equações do sistema, isto é, o grau de liberdade do sistema deve ser zero para se obter uma única solução.
- Solução das equações do modelo. Os principais métodos de resolução de sistemas não lineares são: substituição direta, Wegstein, Newton-Raphson, Broyden, quasi-Newton, Marquardt e Powell.
- Verificação. Para que um modelo matemático tenha validade, é necessário comprovar que o modelo desenvolvido descreve a situação real. A validação do modelo pode ser realizada mediante o uso de dados experimentais obtidos em testes em plantas industriais

ou em escala piloto. Técnicas de projetos de experimentos e a comparação com trabalhos similares da literatura também podem validar um modelo.

O procedimento usual na solução dos problemas com RNAs passa por uma fase de aprendizagem, onde um conjunto de exemplos é apresentado à rede, que extrai as características daquele conjunto e que são usadas para gerar respostas ao problema quando são apresentados à rede outros dados de entrada. A capacidade de aprender por exemplos e de generalizar a informação aprendida é o principal atrativo das RNAs.

Uma rede neural artificial é composta por várias unidades de processamento, as quais geralmente são conectadas por canais de comunicação que estão associados a determinado peso (valores atribuídos). As unidades fazem operações apenas sobre seus dados locais, que são entradas recebidas pelas suas conexões. O comportamento inteligente de uma Rede Neural Artificial vem das interações entre as unidades de processamento da rede.

A operação de uma unidade de processamento, proposta por McCulloch e Pitts em 1943, pode ser resumida da seguinte maneira:

Sinais são apresentados à entrada (X);

Cada sinal é multiplicado por um número, ou peso (w), que indica a sua influência na saída da unidade;

É feita a soma ponderada (Σ) dos sinais que produz um nível de atividade;

Se este nível de atividade exceder certo limite (*threshold*) a unidade produz uma determinada resposta de saída (y).

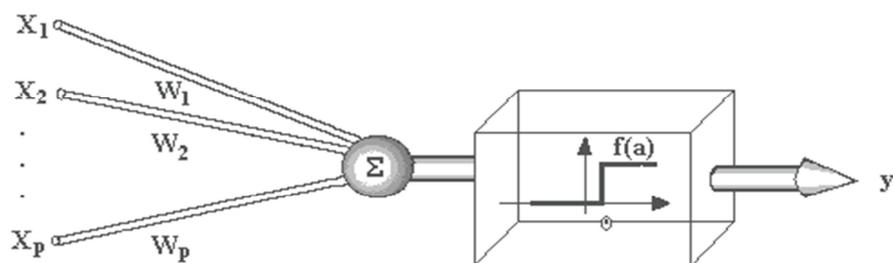


Figura 3.8 – neurônio artificial projetado por McCullock - Pitts.

Neste modelo, Figura 3.8, o nível de atividade a é dado por:

$$a = w_1X_1 + w_2X_2 + \dots + w_pX_p + bias$$

A maioria dos modelos de redes neurais possui alguma regra de treinamento, onde os pesos de suas conexões são ajustados de acordo com os padrões apresentados. Em outras palavras, elas aprendem através de exemplos.

Usualmente as camadas são classificadas em três grupos:

- Camada de Entrada: onde os padrões são apresentados à rede;
- Camadas Intermediárias ou Escondidas: onde é feita a maior parte do processamento, através das conexões ponderadas; podem ser consideradas como extratoras de características;
- Camada de Saída: onde o resultado final é concluído e apresentado.

Uma demonstração de como é esquematizada a arquitetura de uma Rede Neural Artificial está na Figura 3.9.

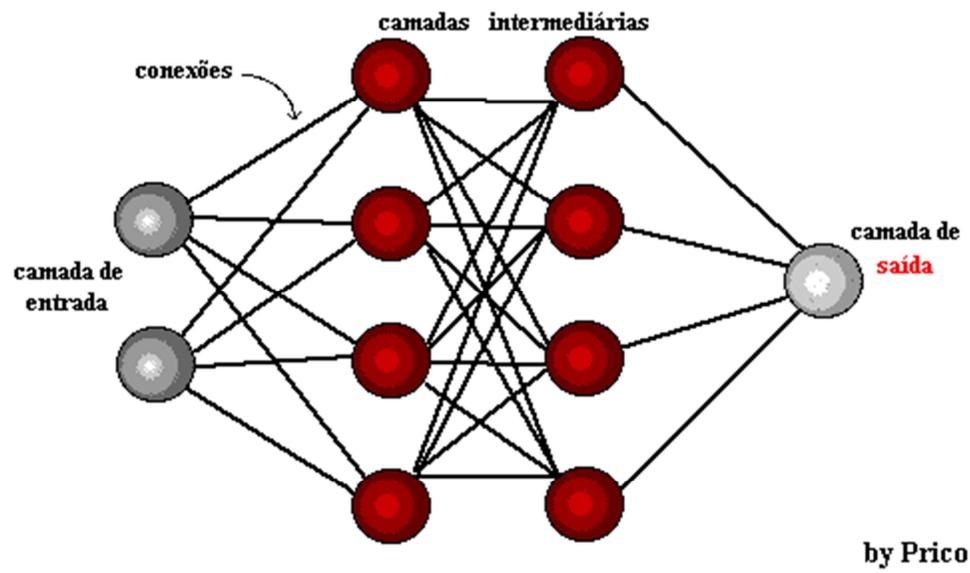


Figura 3.9: organização de uma RNA em camadas.

4 – MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 – ESCOPO DO TRABALHO

O objetivo do trabalho é desenvolver um modelo empírico para avaliar o desempenho térmico de uma torre de resfriamento do tipo evaporativo com escoamento contracorrente e cruzado, realizando os balanços de massa e energia nas correntes de água e ar na torre.

É possível avaliar o desempenho de uma torre de resfriamento com modelos matemáticos, porém os mesmos são complexos.

É bastante difícil modelar com precisão o desempenho de uma torre de resfriamento em corrente cruzada usando técnicas clássicas de modelagem que lidam com a solução de equações diferenciais complexas. Além disso, os modelos matemáticos requerem um grande número de parâmetros geométricos para definir o sistema. Como alternativa, torres de resfriamento podem ser modeladas utilizando Rede Neural Artificial (RNA). Esta técnica permite solucionar problemas através da simulação. Utilizando um conjunto de dados fornecido, a RNA fornece um modelo de estrutura aproximado dos dados experimentais, assim, a rede pode ser aplicada em problemas sem solução algorítmica ou soluções muito complexas para serem encontradas.

Nas torres de resfriamento com escoamento contracorrente há duas maneiras tradicionais de se avaliar o desempenho térmico, pode ser:

1. Pelas curvas de desempenho;
2. Pelo método analítico;

E uma maneira proposta, sendo um método alternativo:

1. Pela Rede Neural Artificial.

Para o projeto, o problema das curvas de desempenho é que o gráfico não serve para determinar a vazão de água que pode ser resfriada e quando há necessidade de saber o valor da temperatura de

saída da água. Por exemplo, para certa vazão de entrada da água, qual será a temperatura de saída? Pela curva de desempenho não dá para saber, é necessário utilizar o método proposto.

No método analítico podem-se encontrar os valores de todas as variáveis, porém é mais complexo, conforme foi descrito anteriormente.

Nas torres de resfriamento com escoamento cruzado há uma única maneira de se avaliar o desempenho térmico:

- Pelo método analítico;

E uma maneira proposta, sendo um método alternativo:

- Pela Rede Neural Artificial.

A arquitetura da RNA para a torre de resfriamento com os nomes dos parâmetros de entrada e saída será demonstrado a seguir. Os parâmetros de entrada de uma RNA devem ser selecionados com cuidado, porque eles podem afetar o desempenho da adaptação do peso algoritmo usados para atualizar os pesos de rede. A arquitetura da RNA para a torre de resfriamento com os nomes dos parâmetros de entrada e saída é demonstrada na Figura 3.9. Os parâmetros de entrada de uma RNA devem ser selecionados com cuidado porque eles podem afetar o desempenho da adaptação do peso algoritmo usado para atualizar os pesos de rede. Neste trabalho os parâmetros que serão usados para analisar o desempenho da torre na simulação serão:

-para torre contracorrente: vazão de entrada da água (L) e do ar (G), temperatura de entrada (T_{Le}) e saída da água (T_{Ls}), temperatura de entrada do ar (T_{Ge}), temperatura de bulbo úmido (T_{BU}), coeficiente de transferência de massa ($kg.a$), altura da torre (z).

-para torre com escoamento cruzado: vazão de água (L') e do ar (G'), temperatura de entrada (T_{Le}) e saída da água (T_{Ls}), temperatura de entrada do ar (T_{Ge}), temperatura de bulbo úmido (T_{BU}), coeficiente de transferência de massa ($kg.a$), área de escoamento vertical (y) e horizontal (x).

4.2 – SIMULAÇÃO COM AS VARIÁVEIS AGRUPADAS

Primeiramente foram feitas três simulações utilizando a Rede Neural Artificial, com o princípio das curvas de desempenho, utilizando cinco variáveis e apenas para escoamento contracorrente.

Foram utilizadas quatro variáveis de entrada (TBU, Trange, Tapproch, L/G) e uma variável de saída ($kg.a \cdot Z/L$), mudando a variável de saída para cada simulação. Na camada intermediária, por tentativa e erro o melhor número de camadas para as três simulações foi de apenas uma camada.

A primeira simulação foi para determinar a altura da torre, com a variável de saída sendo a altura da torre, ou $kg.a \cdot Z/L$. O número de neurônios encontrado para a camada intermediária é de 18 neurônios. A função de ativação determinada para cada camada é a “*tansig*” determinada por tentativa e erro e o algoritmo de treinamento escolhido é o “*trainbr*”. Pode-se analisar essa simulação na Figura 4.1.

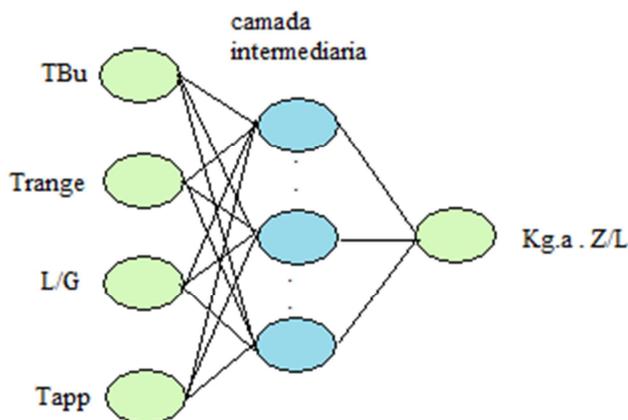


Figura 4.1: arquitetura da RNA desenvolvida para simulação da altura da torre.

A segunda simulação foi para encontrar a temperatura de *approach* (temperatura de saída da água – temperatura de bulbo úmido) de uma torre de resfriamento contracorrente. O número de neurônios encontrado para a camada intermediária é de 18 neurônios, a função de ativação determinada para cada camada é a “*tansig*” e o algoritmo de treinamento escolhido é o “*trainbr*”, demonstrado na Figura 4.2.

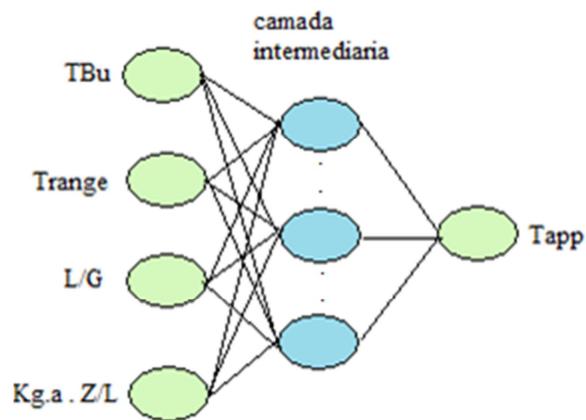


Figura 4.2: arquitetura da RNA desenvolvida para simulação da temperatura de *approach*.

A terceira e ultima simulação utilizando os dados das curvas de desempenho foi para prever a quantidade necessária de ar para uma torre funcionar. Assim como nas outras simulações, o número de neurônios encontrado para a camada intermediária é de 18 neurônios, a função de ativação determinada para cada camada é a “*tansig*” e o algoritmo de treinamento escolhido é o “*trainbr*”.

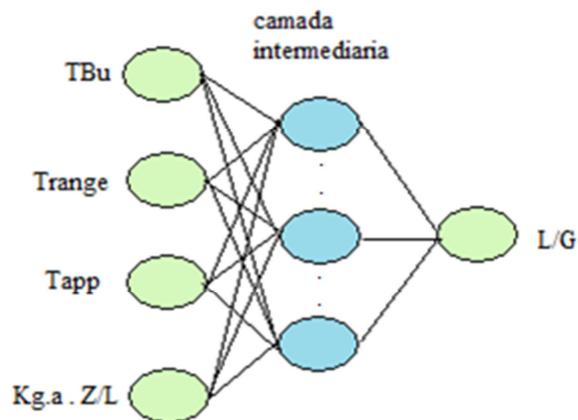


Figura 4.3: arquitetura da RNA desenvolvida para simulação da vazão de ar.

4.3 – SIMULAÇÃO COM AS VARIÁVEIS SEM AGRUPAMENTO

Utilizando todo o conjunto de variáveis sem agrupamento foram feitas sete simulações utilizando a Rede Neural Artificial, sendo elas, quatro simulações em torres com escoamento contracorrente e três simulações em torres com escoamento cruzado.

Nas simulações contracorrente foram utilizadas sete variáveis de entrada e uma variável de saída, sendo que para cada simulação foi mudada a variável de saída. Nas camadas intermediárias, por tentativa e erro, o melhor número de camadas para as quatro simulações foi de uma camada intermediária.

A primeira simulação foi a de projeto, com a variável de saída sendo a altura da torre. O número de neurônios encontrado para a camada intermediária é de 18 neurônios, a função de ativação determinada para cada camada é a “*tansig*” e o algoritmo de treinamento escolhido é o “*trainbr*”. Essa simulação é mostrada na Figura 4.4.

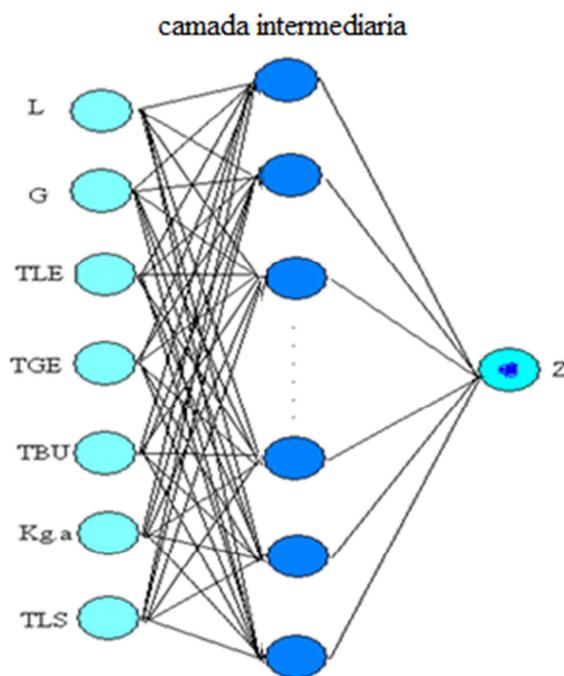


Figura 4.4: arquitetura da RNA desenvolvida para simulação do projeto.

A segunda simulação foi para prever o desempenho térmico de uma torre de resfriamento contracorrente. O número de neurônios encontrado para a camada intermediária é de 18

neurônios, a função de ativação determinada para cada camada é a “*tansig*” e o algoritmo de treinamento escolhido é o “*trainbr*”, ilustrado na Figura 4.5.

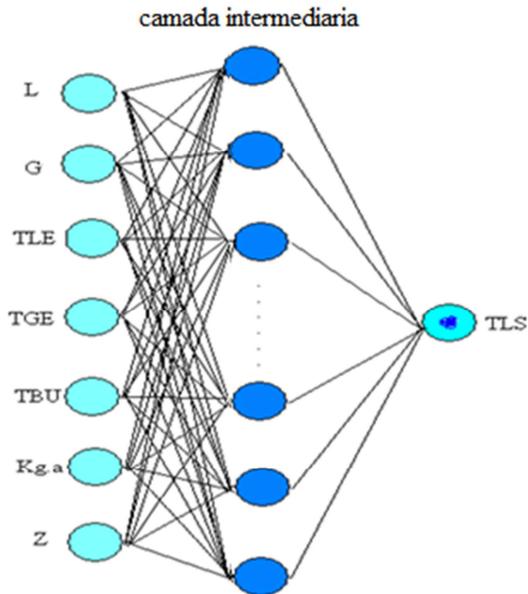


Figura 4.5: arquitetura da RNA desenvolvida para simulação do desempenho térmico.

A próxima simulação foi desenvolvida para avaliar a característica do recheio. Novamente o melhor número de neurônios encontrado foi de 18, a função de ativação determinada para cada camada é a “*tansig*” e o algoritmo de treinamento escolhido é o “*trainbr*”. conforme Figura 4.6.

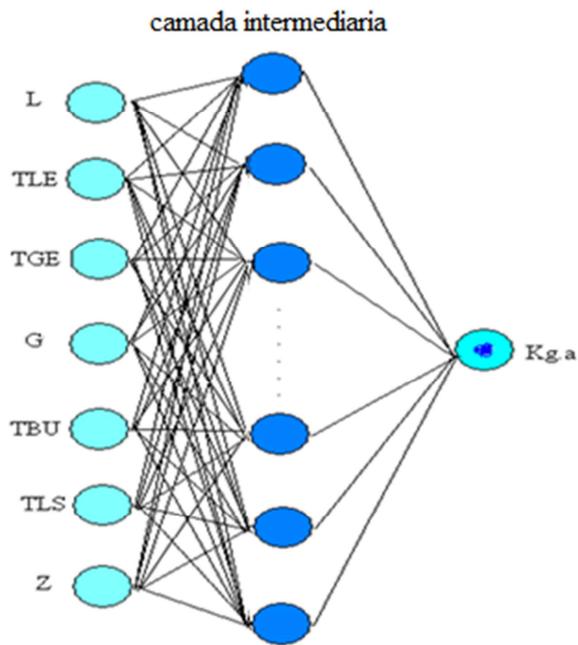


Figura 4.6: arquitetura da RNA desenvolvida para simulação da característica do recheio.

Para finalizar a análise em torres de resfriamento contracorrente, a figura a seguir mostra a simulação para avaliar quantidade necessária de ar para a torre funcionar. O número de neurônios encontrado para a camada intermediária é de 18 neurônios, a função de ativação determinada para cada camada é a “*tansig*” e o algoritmo de treinamento escolhido é o “*trainbr*”.

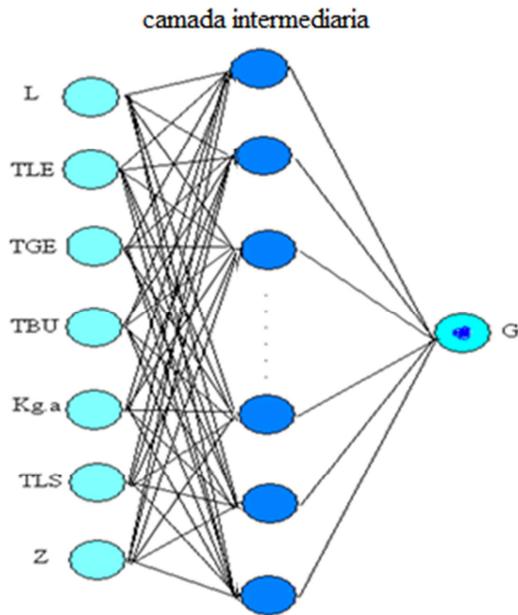


Figura 4.7: arquitetura da RNA desenvolvida para simulação da vazão de ar.

Para as simulações com escoamento cruzado, foram utilizadas oito variáveis na camada de entrada e uma variável na camada de saída. Na camada intermediária, para a simulação para avaliar o desempenho térmico, a característica do recheio e vazão de ar, uma camada intermediária foi suficiente para a simulação da rede.

Para torre de resfriamento com escoamento cruzado a altura da torre não é a variável de projeto e sim a temperatura de saída da água. O número de neurônios encontrado para a camada intermediária é de 10 neurônios, a função de ativação determinada para cada camada é a “*tansig*” e o algoritmo de treinamento escolhido é o “*trainbr*”. Na Figura 4.8 pode-se visualizar esta variável.

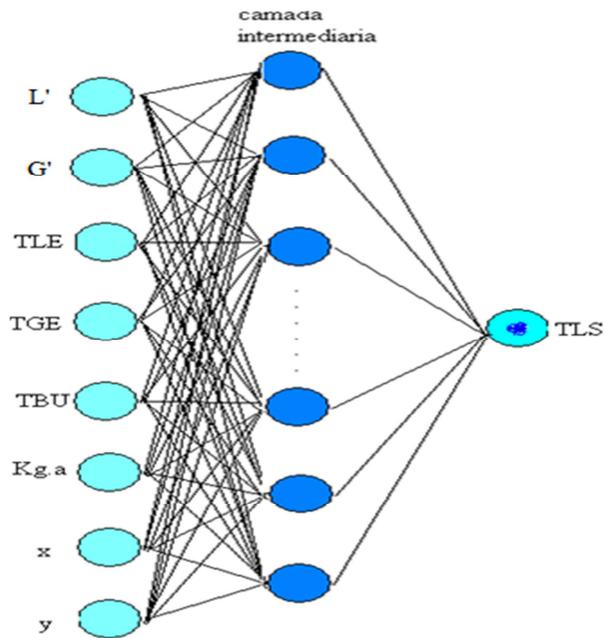


Figura 4.8: arquitetura da RNA desenvolvida para simulação do projeto da torre com escoamento cruzado.

Mantendo a mesma linha de raciocínio, a Figura 4.9 ilustra a RNA para determinar a característica do recheio. O número de neurônios encontrado para a camada intermediária é de 19 neurônios, a função de ativação determinada para cada camada é a “*tansig*” e o algoritmo de treinamento escolhido é o “*trainbr*”.

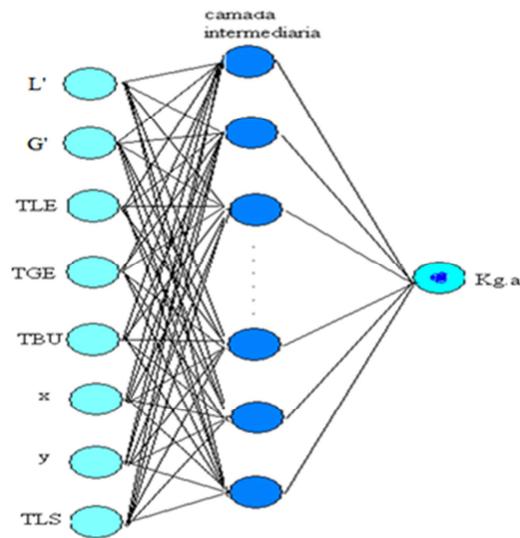


Figura 4.9: arquitetura da RNA desenvolvida para simulação da característica do recheio da torre com escoamento cruzado.

Para finalizar as simulações, a próxima análise foi realizada para prever a vazão do ar. O número de neurônios encontrado para a camada intermediária é de 18 neurônios, a função de ativação determinada para cada camada é a “*tansig*” e o algoritmo de treinamento escolhido é o “*trainbr*”.

O desempenho de uma torre é afetado pelas características da rede, tais como o número de camadas ocultas e número de nós em cada camada oculta. Como foi dito anteriormente, por tentativa e erro, com diferentes configurações de RNA, podem-se definir quantas camadas intermediárias e quantos neurônios a rede terá. O algoritmo de *Backpropagation*, que é o algoritmo mais usado em aplicações de engenharia e o programa computacional utilizado foi o MATLAB.

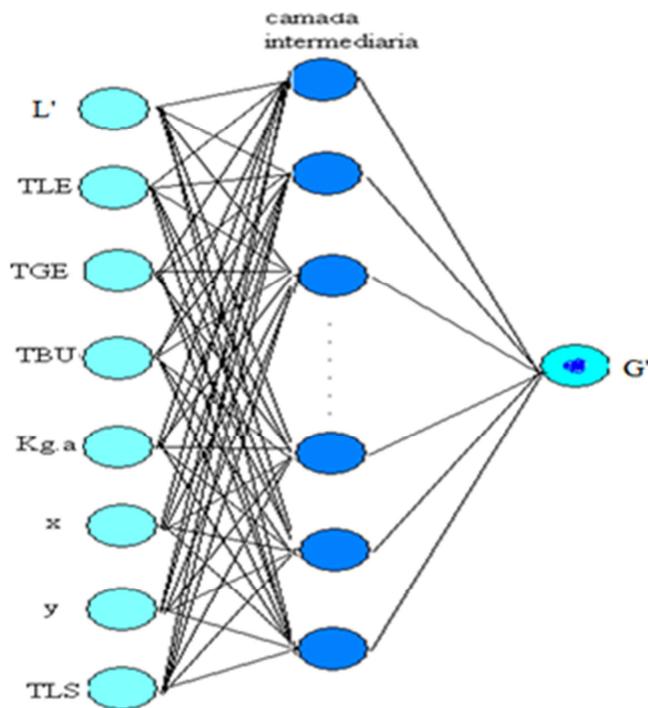


Figura 4.10: arquitetura da RNA desenvolvida para simulação da vazão de ar da torre com escoamento cruzado.

4.4 – Determinação das variáveis de processo

Um modelo de RNA foi usado para avaliar o desempenho de uma torre de resfriamento com escoamento cruzado.

As variáveis para a torre com escoamento contracorrente utilizando o modelo de curva de desempenho: razão da vazão de água pela vazão de ar (L/G), temperatura de *range* (T_{range}), temperatura de bulbo úmido (T_{Bu}), temperatura de *approach* ($T_{approach}$) e a multiplicação do coeficiente de transferência de massa pela razão da altura pela vazão de água ($kg.a \cdot Z/L$)

Para torres contracorrente utilizando o modelo analítico: vazão da água (L), vazão do ar (G), temperatura de entrada da água (T_{Le}), temperatura de entrada do ar (T_{Ge}), temperatura de bulbo

úmido (T_{BU}), coeficiente de transferência de massa ($kg.a$), temperatura de saída do líquido (T_{Ls}) e altura da torre (z).

Os valores dessas variáveis foram fornecidos pelo professor Roger Josef Zemp, sendo que o mesmo as adquiriu construindo curvas de desempenho para diversos casos e resolvendo a equação 3.25 pelo programa desenvolvido por ele, que está disponível no laboratório da Faculdade de Engenharia Química.

O programa foi validado para alguns casos da literatura. Nas Tabelas 1, 2 e 3 estão representados os valores mínimos e máximos da faixa de cada variável. Esses valores foram normalizados entre 0 e 1 para o treinamento da rede.

Tabela 1

Variação entre os dados obtidos de entrada e saída da torre contracorrente – a partir do modelo de curvas de desempenho					
	L/G (g/s)	T _{Bu} (°C)	T _{rango} (°C)	T _{approach} (°C)	Kg.a · Z/L (m)
Mínimo	0,4015	8,24	0,07	0,09	0,01
Máximo	19,99	33,31	33,22	6,98	18,81

TABELA 2

Variação entre os dados obtidos de entrada e saída da torre contracorrente								
	L(g/s)	Tle(°C)	Tls(°C)	G(g/s)	Tge(°C)	Tbu(°C)	kg.a (kg/s)	z(m)
Mínimo	1,8	35,01	10,38	1,001	15	8,24	1	1,016
Maximo	2,7	44,99	38,96	6,517	34,98	33,31	2,497	19,955

Para torres com escoamento cruzado: vazão da água (L'), vazão do ar (G'), temperatura de entrada da água (T_{Le}), temperatura de entrada do ar (T_{Ge}), temperatura de bulbo úmido (T_{BU}), área escoamento horizontal (x), área de escoamento vertical (y), coeficiente de transferência de massa ($kg.a$), estas são as variáveis de entrada, as de saída são: temperatura de saída do líquido (T_{Ls}), temperatura de saída do ar (T_{Gs}) e carga térmica do sistema (q).

Para encontrar estes valores, foi usado o mesmo programa do professor Roger, resolvendo a equação 3.30.

TABELA 3

Variação entre os dados obtidos de entrada e saída da torre fluxo cruzado									
	L'(kg/s.m ²)	G'(kg/s.m ²)	Tle(°C)	Tge(°C)	Tbu(°C)	x	y	kg.a(kg/s)	Tls(°C)
Mínimo	1,5	1,046	35	15	7,41	1,001	1,009	1,002	10,79
Maximo	7,995	19,365	45	34,93	33,72	5	10	2,5	41,41

Neste estudo, a RNA foi usada para prever o desempenho de uma torre de resfriamento de água, primeiramente em torres com escoamento contracorrente e como objetivo do estudo em torres com escoamento cruzado.

Pode-se resumir a metodologia utilizada nos seguintes passos:

- Programa desenvolvido rigorosamente para encontrar os valores das variáveis da torre;
- Geração de aproximadamente 1000 dados de operação;
- Uso de parte destes dados para treinamento da rede;

- Uso dos dados restantes para teste da rede;
- Verificação dos resultados da rede.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 – MODELAGEM PARA TORRE DE RESFRIAMENTO

Foram obtidos valores diferentes para todas as simulações, essas diferenças podem ser notadas a partir dos gráficos obtidos através de cada simulação feita, porém os melhores gráficos foram os realizados a partir do método da curva de desempenho para escoamento contracorrente.

Pode-se observar o bom resultado de cada simulação por meio das retas em cada figura mostrada. Para o resultado ser excelente é necessário que seja uma reta na diagonal passando pelos pontos 1 e -1 (em x e y) e que estes pontos não estejam espalhados.

5.1.1-MODELAGEM COM AS VARÁVEIS AGRUPADAS

Na simulação para determinar a altura da torre, temperatura de *approach* e vazão do ar, onde os dados foram obtidos por meio do método das curvas de desempenho, os resultados obtidos foram excelentes, pois atendem todos os requisitos necessários. Somente na simulação da vazão de ar que alguns pontos ficaram um pouco afastados, mas continua sendo um bom resultado, porque é uma reta na diagonal.

Para determinação da altura da torre, o erro médio quadrático sobre o conjunto de dados de treinamento é de 10^{-6} . Pela observação da Figura 5.1, esse resultado já era esperado, porque tanto no gráfico do treinamento quanto do teste a reta está ótima, na diagonal e quase não possui ponto fora da reta.

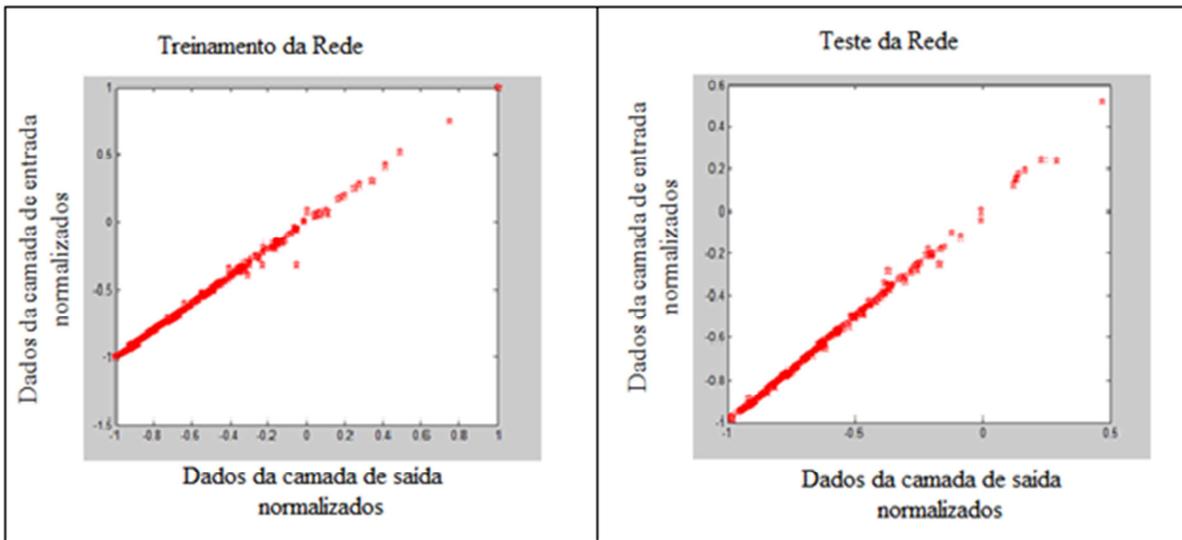


Figura 5.1 – resultado obtido pelo treinamento e teste da rede para determinação da altura da torre contracorrente.

Para determinação da vazão de ar o erro médio quadrático é de 10^{-5} . Assim como para a determinação da altura da torre, o resultado foi bom, nota-se apenas um pequeno desvio da simulação do teste, porque a maioria dos pontos ficou concentrada no começo do teste, conforme Figura 5.2, mesmo com esse pequeno desvio, o resultado foi como o esperado.

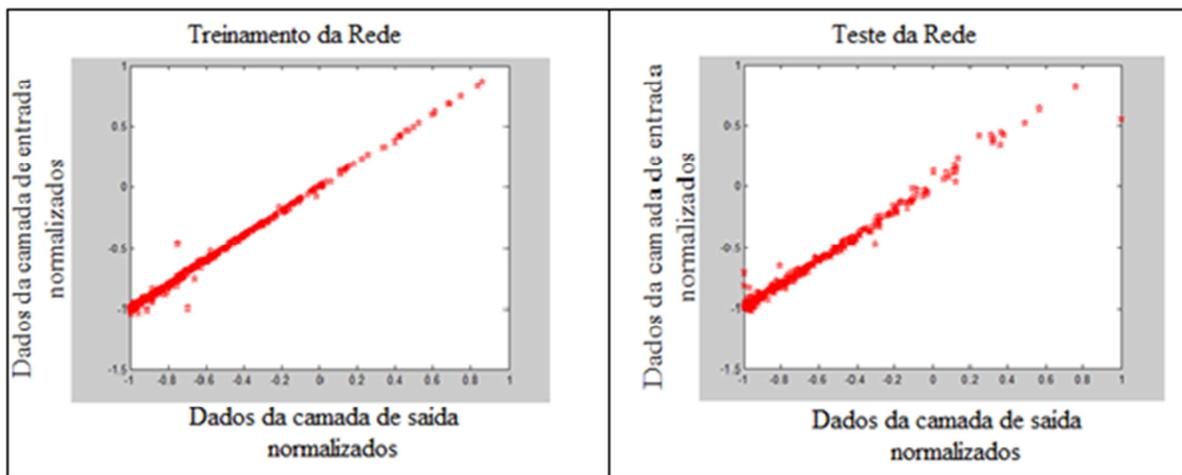


Figura 5.2 – resultado obtido pelo treinamento e teste da rede para vazão de ar da torre contracorrente.

Na determinação da temperatura de *approach* o erro médio quadrático é de 10^{-5} . Assim como na determinação da altura da torre, o resultado foi ótimo, observando a Figura 5.3 nota-se que o resultado foi melhor do que na determinação da altura porque na reta do treinamento não tem nenhum ponto fora, o erro médio quadrático deu igual nos dois casos porque alguns pontos desta simulação ficaram fora da reta.

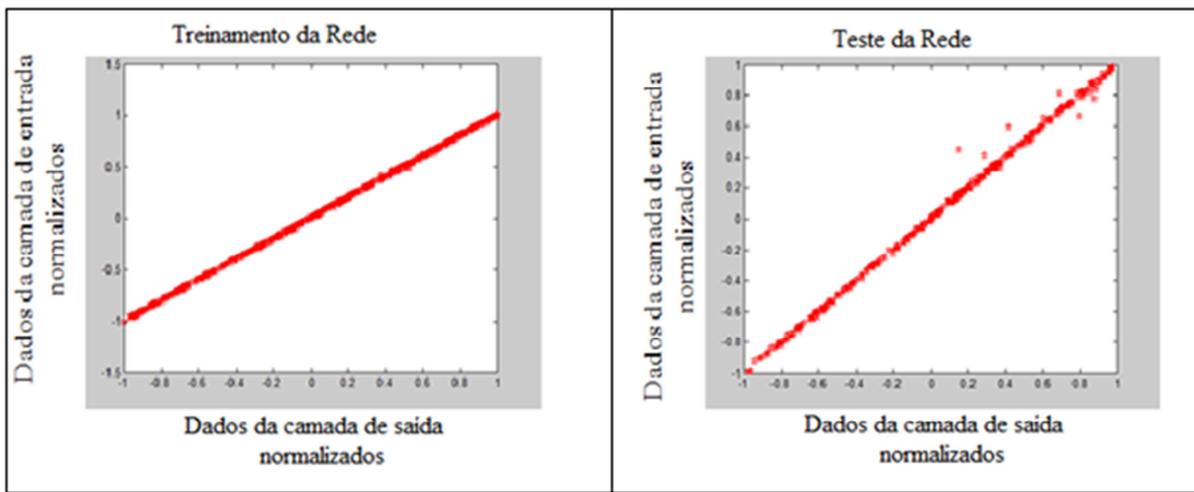


Figura 5.3 – resultado obtido pelo treinamento e teste da rede para temperatura de *approach* da torre contracorrente.

5.1.2 – MODELAGEM COM AS VARIÁVEIS SEM AGRUPAMENTO

Na simulação de projeto (determinação da altura da torre), de desempenho térmico (determinação da temperatura de saída da água), na determinação do valor do recheio da torre e na determinação da vazão de ar para torres de resfriamento com escoamento contracorrente, os resultados obtidos foram diferentes para cada simulação.

Para a simulação de projeto o erro médio quadrático é de 10^{-5} . É um bom resultado, nota-se pela figura que a simulação não foi melhor porque alguns pontos, tanto no treinamento quanto no teste, estão espalhados, conforme Figura 5.4.

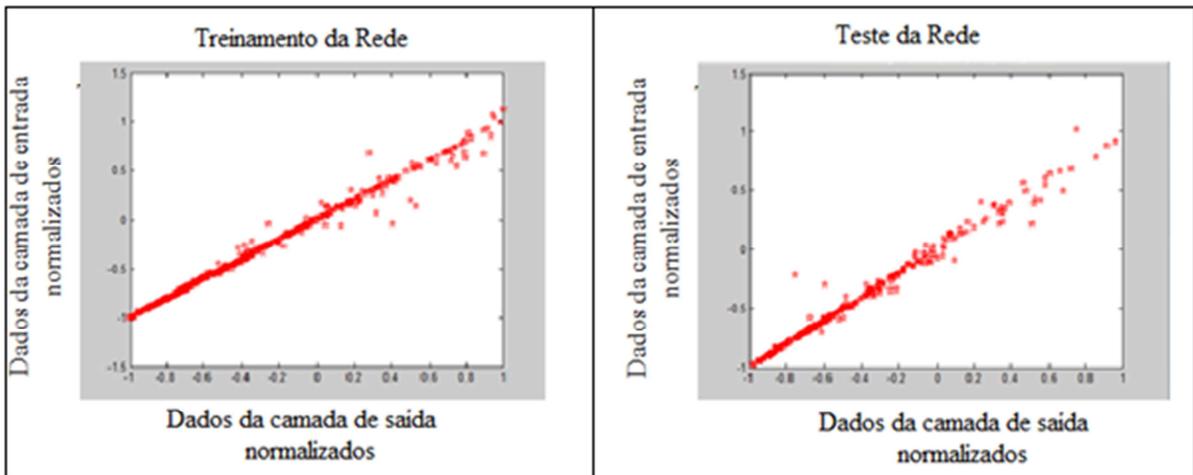


Figura 5.4 – resultado obtido pelo treinamento e teste da rede para o projeto da torre contracorrente.

Para a simulação de desempenho térmico o erro médio quadrático é de 10^{-11} . Um excelente resultado, a Figura 5.5 mostra esse excelente resultado, sendo uma reta na diagonal sem nenhum ponto fora da reta.

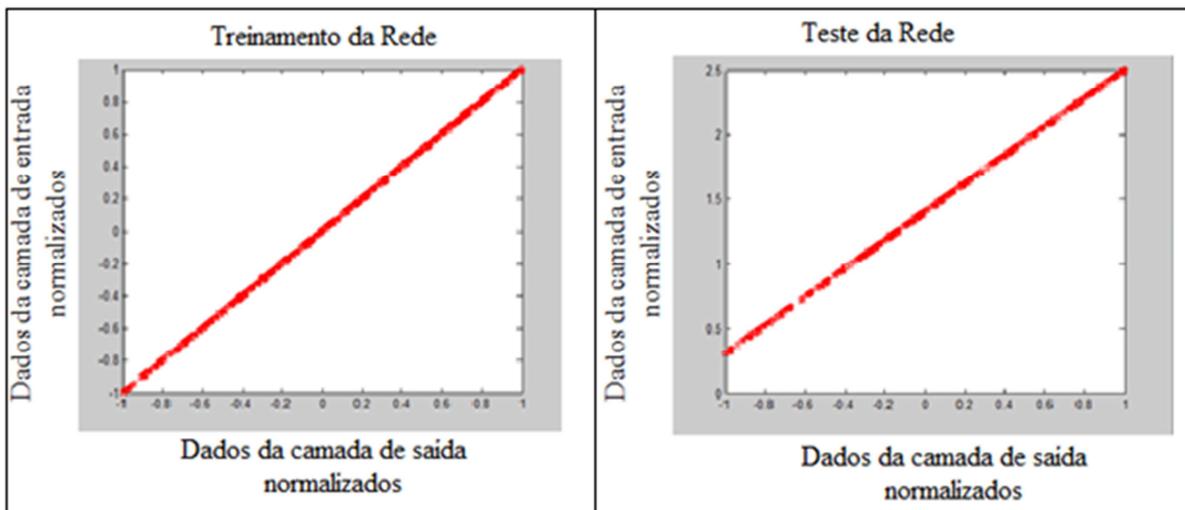


Figura 5.5 – resultado obtido pelo treinamento e teste da rede para desempenho térmico da torre contracorrente.

Na determinação da característica do recheio da torre de resfriamento, o resultado foi similar ao da simulação de projeto da torre, com erro médio quadrático igual a 10^{-5} . Isso porque os pontos da reta ficaram um pouco espalhados, conforme Figura 5.6.

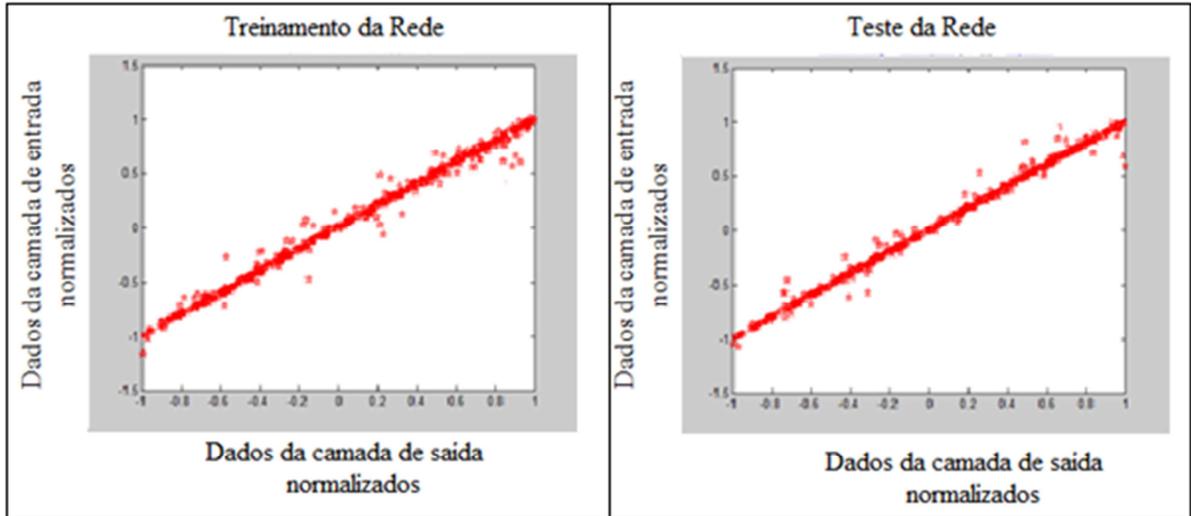


Figura 5.6 – resultado obtido pelo treinamento e teste da rede para característica do recheio da torre contracorrente.

Já na simulação para determinar a vazão de ar o erro médio quadrático é de 10^{-2} , não sendo um bom resultado. Tanto no treinamento quanto no teste, os pontos estão afastados na reta, nota-se na Figura 5.7. Para determinar a vazão de ar é recomendado utilizar a simulação com as variáveis agrupadas, pois o resultado foi melhor.

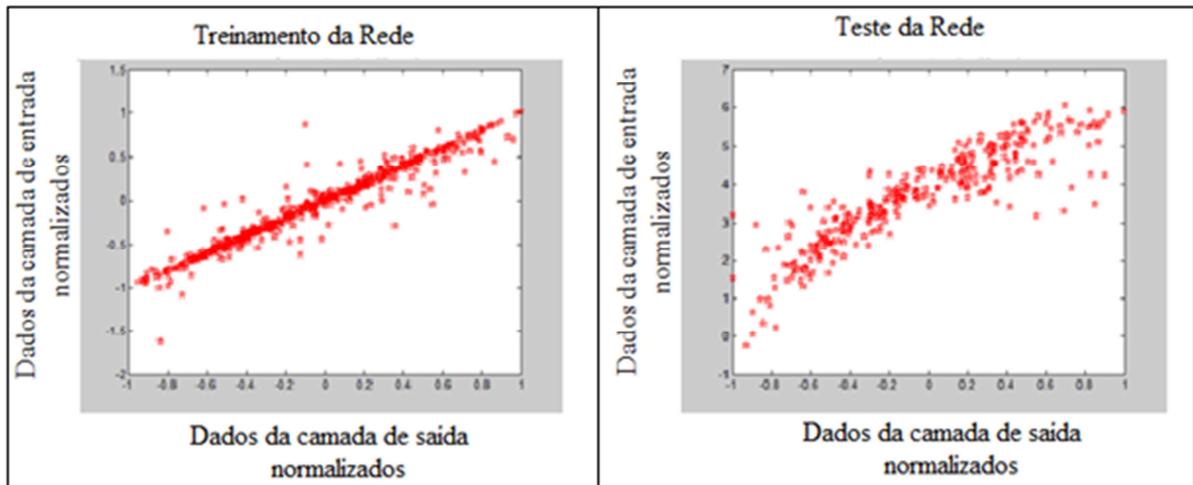


Figura 5.7 – resultado obtido pelo treinamento e teste da rede para vazão de ar da torre contracorrente.

Nas simulações para torre de resfriamento com escoamento cruzado os resultados obtidos foram próximos aos resultados da torre com escoamento contracorrente, mudando apenas para a simulação da determinação da característica do recheio da torre, que assim como para a vazão de ar, o resultado com as variáveis sem agrupamento não foi satisfatório.

Para determinar a temperatura de saída da torre com escoamento cruzado a rede funcionou como o esperado, fornecendo um bom resultado, o erro médio quadrático é de 10^{-5} . Não sendo melhor porque alguns pontos da reta ficaram espalhados, no gráfico do teste, conforme Figura 5.8.

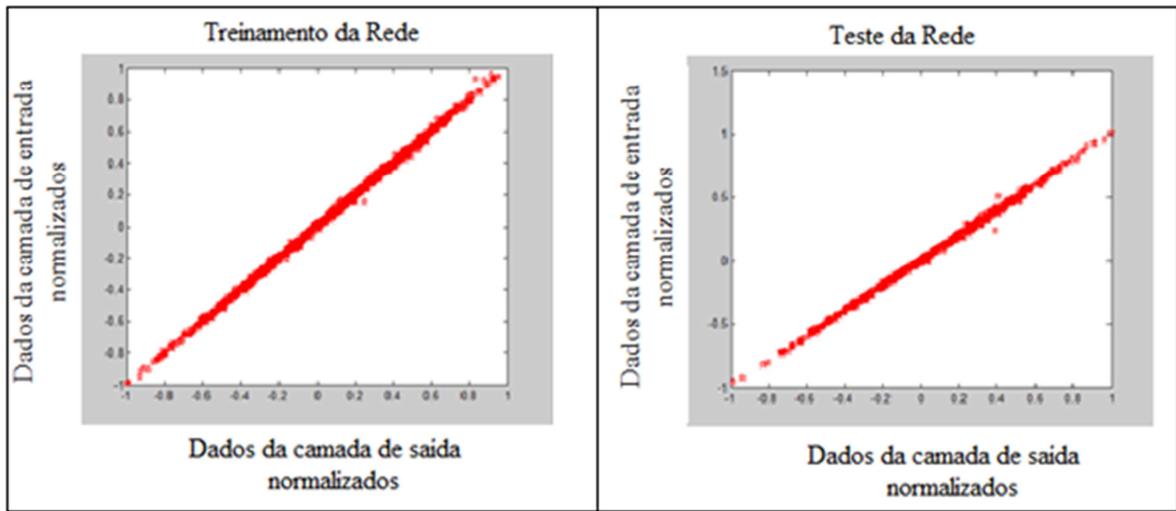


Figura 5.8 – resultado obtido pelo treinamento e teste da rede para desempenho térmico da torre com escoamento cruzado.

Para avaliar a característica do recheio da torre a rede obteve um resultado satisfatório, observa-se na Figura 5.9 que a simulação não foi tão boa porque os pontos na reta, nos dois gráficos, estão espalhados. O erro médio quadrático é de 10^{-3} .

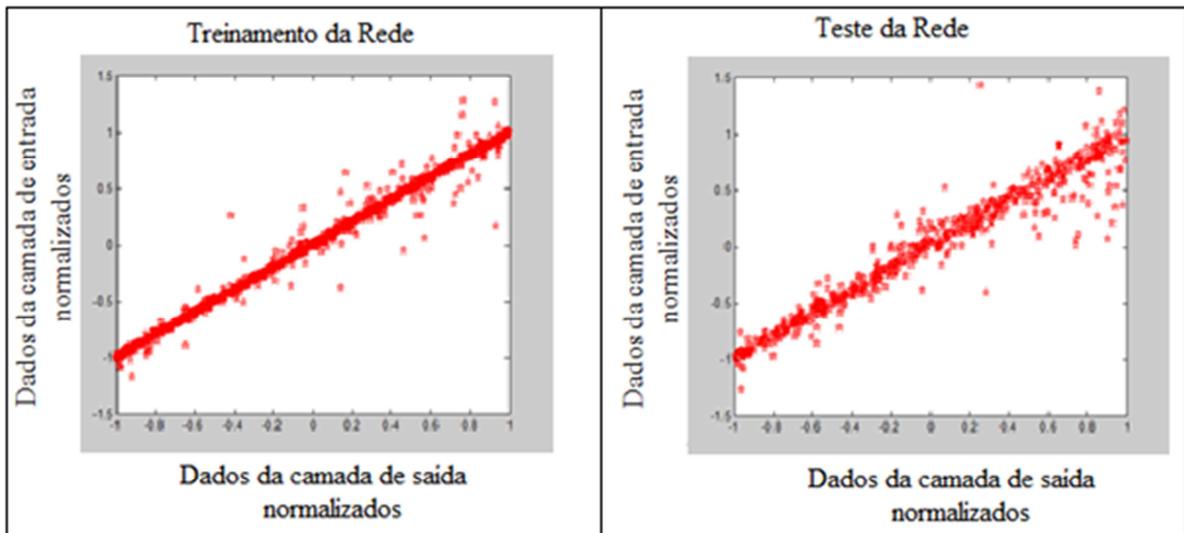


Figura 5.9 – resultado obtido pelo treinamento e teste da rede para característica do recheio da torre com escoamento cruzado.

A última simulação para avaliar a vazão de ar não mostrou um bom resultado, assim como para a simulação com escoamento contracorrente. Os pontos estão muito espalhados, conforme Figura 5.10.

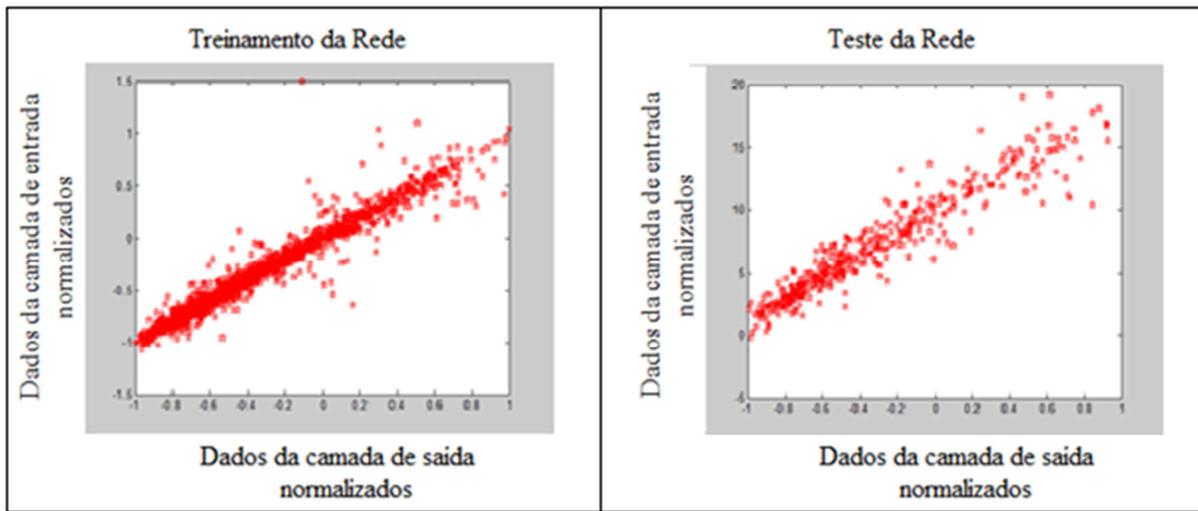


Figura 5.10 – resultado obtido pelo treinamento e teste da rede para avaliar a vazão de ar da torre com escoamento cruzado.

Analisando os resultados, pode-se chegar a conclusão que dá para usar RNA para avaliar o desempenho térmico de uma torre de resfriamento de água, tanto com escoamento contracorrente quanto para cruzado. Tendo algumas restrições nos casos da determinação da vazão de ar, para escoamento cruzado e contracorrente, e para determinação da característica do recheio, apenas para escoamento cruzado. Nesses casos, é melhor usar as variáveis agrupadas para realizar as simulações.

Posteriormente realizar um estudo mais aprofundado de como usar RNA para determinar esses valores com as variáveis sem agrupamento.

5.2 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO MODELO ESTUDADO

Uma infinidade de processos industriais necessita de remoção de calor utilizando a água como meio de resfriamento, dentre os quais podemos citar:

Operações siderúrgicas, fundições, usinagens, resfriamento de fornos, moldes, formas, etc.

Resfriamento de reatores químicos, bioquímicos e nucleares.

Condensação de vapores em operações de destilação e evaporadores, colunas barométricas, descargas de turbinas de instalações termelétricas e nucleares, etc.

Resfriamento de compressores e gases frigoríficos em circuitos de refrigeração (condensadores evaporativos), incluindo operações de ar condicionado e de frio alimentar.

Arrefecimento de mancais, peças partes móveis, lubrificantes, rotores e inúmeras máquinas e equipamentos.

Resfriamento dos mais variados fluidos (líquido e gases) em trocadores de calor, entre muitas outras aplicações.

Exemplo da simulação

Para ilustrar a metodologia proposta, serão utilizados casos típicos de operação de torre de resfriamento de água. (Fonte: BENÍTEZ, 2009).

1º Caso: Deseja-se projetar uma torre de resfriamento com escoamento contracorrente, para as seguintes condições:

Uma planta com vazão de água de 15 kg/s, temperatura de entrada da água de 44,85 °C, temperatura de saída da água de 28,85 °C, vazão de ar de 11 kg/s, temperatura de bulbo úmido de 27,85 °C e temperatura de bulbo seco de 31,85 °C e o valor do recheio da torre de 0,9 kg/m³.s.

O resultado calculado pelo método analítico foi de 7,26 metros, e utilizando a RNA, mostrado na Figura 5.4, o valor estimado para a altura da torre é de 7,28 metros.

2º Caso: Deseja-se determinar o desempenho térmico de uma torre de resfriamento de água com escoamento contracorrente, para uma torre existente que opera com vazão de água de 450 m³/h, vazão de ar de 373 m³/h, temperatura de entrada da água de 45,85 °C, temperatura de bulbo úmido de 15,85°C, temperatura de bulbo seco de 23,85 °C, valor do recheio da torre de 0,9 kg/m³.s e altura da torre de 3 metros.

Utilizando a RNA, mostrada na Figura 5.5, o valor estimado para a temperatura de saída da água é de 25,85 °C. Sendo o mesmo valor que o resultado calculado pelo método analítico, pois o erro médio quadrático foi de 10⁻¹¹.

3º Caso: Nesse último exemplo, deseja-se saber a temperatura de saída da água para uma torre de resfriamento de água com escoamento cruzado, para as seguintes condições:

$$\text{Vazão da água (L')} = 6,67 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

$$\text{Vazão do ar (G')} = 2,92 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

$$\text{Temperatura de entrada do líquido (T}_{Le}) = 45 \text{ °C}$$

$$\text{Temperatura de entrada do ar (T}_{GE}) = 28 \text{ °C}$$

$$\text{Temperatura de bulbo úmido (T}_{BU}) = 24 \text{ °C}$$

$$\text{Valor do recheio da torre (Kg.a)} = 1,12 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

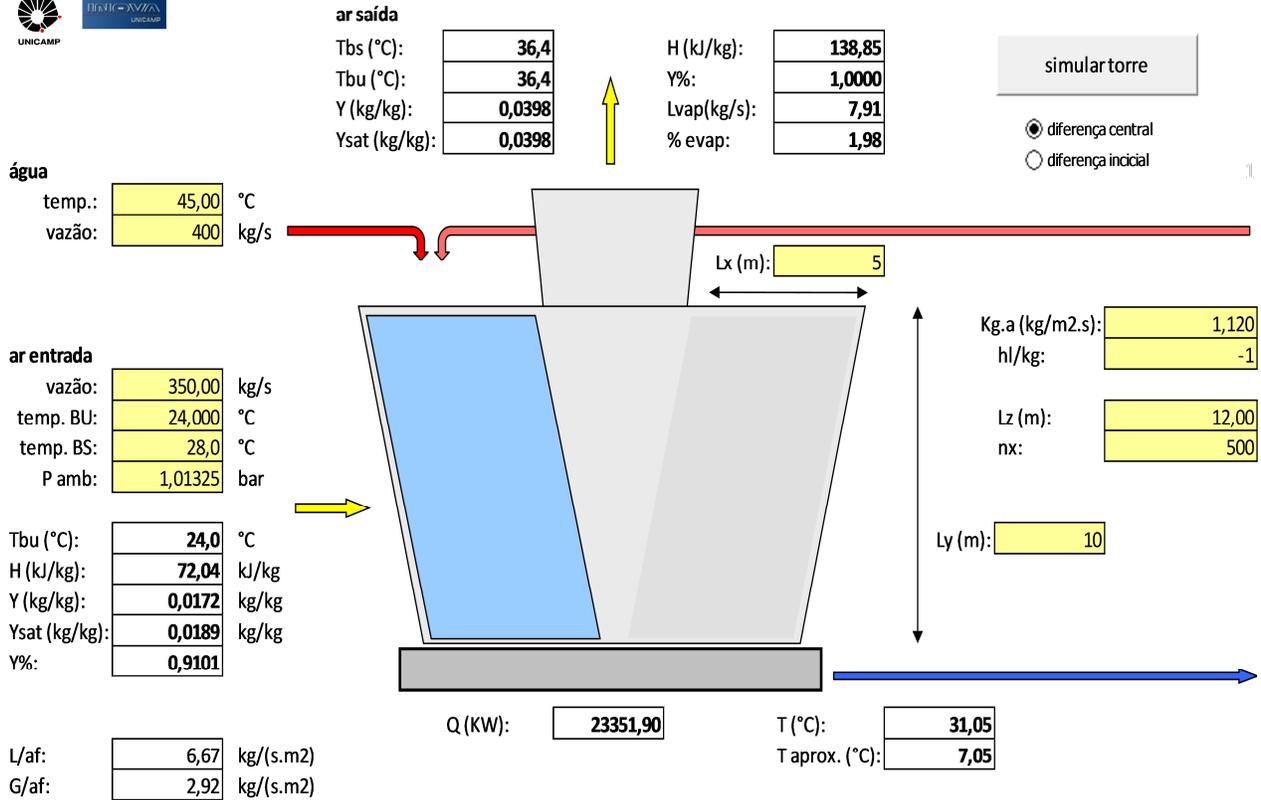
$$\text{Área de escoamento na horizontal (x)} = 5 \text{ m}$$

$$\text{Área de escoamento na vertical (y)} = 12 \text{ m}$$

Torre de resfriamento - escoamento cruzado

versão 01.02 (C) RJ Zemp 2011
14/02/2012

Projeto: tese
Diretório: E:\xxxx_d_feq\torre_resf\envio_elet



Utilizando a RNA, mostrado na Figura 5.8, o valor estimado para a temperatura de saída de água é de 30,84 °C. e utilizando o método analítico, conforme dados da torre com escoamento cruzado, foi de 31,05 °C. Os resultados foram bem próximos porque essa simulação deu um ótimo resultado, com o valor do erro médio quadrático igual a 10^{-5} .

Nos três casos mostrados, os resultados da RNA foram excelentes, mostrando que as simulações feitas a partir da rede são confiáveis. Para certos casos é necessário utilizar as variáveis agrupadas, como por exemplo, para determinar a vazão de ar, e para outros casos é necessário

usar as variáveis sem agrupamento, como por exemplo, para determinar a altura da torre e a temperatura de saída de água.

6- CONCLUSÕES

Nas indústrias o desempenho térmico de uma torre de resfriamento é de vital importância e pequenos desvios em relação às especificações de projeto podem provocar implicações no funcionamento e na economia do processo. O desempenho térmico fundamenta-se quase exclusivamente no catálogo do fabricante, obtido empiricamente e válido apenas para um tipo específico de torre. Porém, a caracterização através de um modelo computacional torna-se mais interessante por ser mais representativo e com aplicação mais abrangente.

É bastante difícil modelar com precisão o desempenho de uma torre de resfriamento com escoamento cruzado usando técnicas clássicas de modelagem que lidam com a solução de equações diferenciais complexas. Como alternativa, torres de resfriamento podem ser modeladas utilizando RNA. Esta técnica permite solucionar problemas através da simulação.

No presente estudo foi desenvolvido um modelo computacional (simulação) usando RNA para avaliar o desempenho térmico de torres de resfriamento, com escoamento contracorrente e com escoamento cruzado. A simulação foi realizada a partir de dados calculados aleatoriamente (em torno de 2000 valores para cada variável), utilizando os modelos completos de balanço de massa, energia, e relações de psicrometria para cada torre.

A validação do modelo desenvolvido foi realizada através da análise gráfica da simulação, comparando os valores calculados pelo modelo rigoroso com os valores preditos pela rede neural. Para a torre contracorrente foram avaliadas duas formas de entrada de dados: variáveis isoladas e variáveis agrupadas. O resultado comparativo foi satisfatório para todos os casos, com exceção da estimativa de vazão de ar, na qual houve uma dispersão dos valores estimados pela rede neural para a consideração de variáveis isoladas. Para torres com escoamento cruzado o resultado foi similar, com uma boa predição do desempenho (temperatura de saída, vazão de água) e uma dispersão razoável para a estimativa de vazão de ar necessária.

O objetivo proposto de avaliar o potencial de utilizar RNA para a modelagem de uma torre de resfriamento para projeto ou análise de desempenho foi atingido, demonstrado por meio da solução de um conjunto de problemas de projeto e análise de desempenho. O programa

desenvolvido assim permite encontrar valores de variáveis de operação de uma torre de resfriamento de água.

Potencial para trabalhos futuros

Apesar do trabalho mostrar a aplicabilidade de redes neurais para o problema proposto, para o caso de torres com escoamento cruzado a rede neural obtida apresenta uma estrutura razoavelmente complexa, com oito variáveis de entrada. É desejável estudar a possibilidade de reduzir este número utilizando agrupamento de variáveis, nos moldes do que foi feito para a torre contracorrente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE, ASHRAE Handbook – Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating, and Air conditioning Engineers, Atlanta, 2008.

BENÍTEZ, JAIME. **Principles and modern applications of mass transfer operations**. Second Edition, 2009.

BURGUER, R. **Cooling towers – The often over looked profit center**. Chemical Engineering v.100(5), p.100-104, 1993.

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.

CHEREMISINOFF, N. P., CHEREMISINOFF, P. L. **Cooling Towers –Selection, design and practice**. Ann Arbor: Ann Arbor Science, 1981.

COOLING TOWER INSTITUTE (CTI). Houston. Apresenta recursos e atividades desenvolvidas. Disponível em: <http://www.cti.org> .Acesso em 3 ago. 2011.

CORTINOVIS, G. F., **Modelagem e otimização de um sistema de água de resfriamento e validação experimental**. São Paulo, 2004.

EL-DESSOUKY, H. T. A.; AL-HADDAD, A.; AL JUWAYHEL., F. **A modified analysis of counter flow wet cooling towers**. Journal of Heat Transfer, v. 119(3), p. 617-626, 1997.

EVANS JR., F. L. **Equipment design handbook for refineries and chemical plants**. Vol.2., Houston. Gulf Publishing, 1980.

FOUST, A. et al. **Princípios das operações unitárias**. 2º Ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.

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

KELLY, N. W.; SWENSON, L. K. **Comparative performance of cooling tower packing arrangements**. Chemical Engineering Progress, v.52(7) p.263-268, 1996.

KERN, D. Q. **Process heat transfer**. New York: McGraw Hill, 1990.

HYPERMEDIA MODELING TECHNIQUE. Disponível em: <http://www.pt.scribd.com/.../HMT-HYPERMEDIA-MODELING-TECHNIQUE>. Acesso em: 06 ago. 2012.

LUDWIG, ERNEST. Applied process design for chemical and petrochemical plants, vol 2, 3a edição. Houston: Gulf Pub. Co, 1995

McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. **Unit operations of chemical engineering**. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1993.

McCULLOCH, W. S. e PITTS, W. A Logical Cauculos of the Ideas Immanent in Nervus Activity, Bulletin of Mathematical Biophysics, vol 5, pp. 115-133 - 1943;

MELLO, L. C., **Influência de variáveis de processo no desempenho de torre de resfriamento**. São Paulo, 2008.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments** 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1984.

PERRY, R. H.; GREEN, D. **Perry's chemical engineers' handbook**. 8th ed. New York: McGraw Hill, 1997.

PANNKOKE, T. **Cooling tower basic**. Journal HPAC Engineering. February, 1996.

PSICOMETRIA. Disponível em: <http://www.refrigeraçao.net/topicos/Psicometria.htm>. Acesso em 6 out. 2010.

REDES NEURAIIS. Disponível em : <http://www.icmc.usp.br/andre/research/neural/>. Acesso em 25 out.2010.

SPX COOLING TECHNOLOGIES, Inc. **Cooling Tower Fundamentals**. 2º ed. Kansas USA.

TERMODINÂMICA E TRANSMISSAO DE CALOR. Disponível em: <http://www.mspc.eng.br>
– Acesso em 02 jun. 2012.

TORRE DE RESFRIAMENTO. Disponível em:

http://www.teses.usp.br/.../DISSERTACAO_INFLUENCIA_DAS_VARIAV...- . Acesso em 2 ago. 2011.

