



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

**VÍTOR CAMPOS PEREIRA**

**ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DE UMA TORRE  
EXPERIMENTAL DE RESFRIAMENTO DE ÁGUA**

**JOÃO PESSOA – PB**

**2018**



**VÍTOR CAMPOS PEREIRA**

**ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DE UMA TORRE  
EXPERIMENTAL DE RESFRIAMENTO DE ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte das atividades para obtenção do título de Graduado, do curso de Bacharelado em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Campus I, João Pessoa.

Orientador: Prof. Dr. Pierre Correa Martins

**JOÃO PESSOA – PB**

**2018**



## FICHA CATALOGRÁFICA

--



**VÍTOR CAMPOS PEREIRA**

**ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DE UMA TORRE  
EXPERIMENTAL DE RESFRIAMENTO DE ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte das atividades para obtenção do título de Graduado, do curso de Bacharelado em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Campus I, João Pessoa.

Aprovada em: \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Pierre Corrêa Martins

Orientador

---

Prof. Dr<sup>a</sup> Joselma Araujo de Amorim

Professor Convidado

---

Prof. Dr. Ânoar Abbas El-Aouar

Professor Convidado

*Dedico este trabalho a minha mãe, Mardilene, ao meu pai, Cícero, a minha namorada, Flavianny, e a meus irmãos por todo incentivo e força nesta graduação.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, o nosso criador, por minha vida e pela oportunidade de chegar até aqui.

A minha mãe, Mardilene Campos Pereira, por seu caráter exemplar e sua sabedoria, dando bons conselhos e por ter acreditado em mim, seu incentivo foi imprescindível para a realização do meu sonho e principalmente, por sua dedicação, amor e carinho.

Ao meu pai, Cícero Pereira da Silva pelo amor, zelo e ajuda que sempre me foi dada.

A minha namorada Flaviany Santos de Almeida, por todo o carinho, incentivo e compreensão; uma pessoa a quem sempre pude contar.

Aos meus irmãos, cunhadas, tios, primos, familiares e amigos.

Ao professor Dr. Pierre, por tudo que me ensinou, repassando seu conhecimento, com desprendimento paciência e dedicação; contribuindo assim, para minha eterna busca do crescimento universal; um professor que tenho um enorme respeito e admiração.

Aos técnicos do LEA, MSc. Thayze e Francisco (Chico), que muito me ajudaram durante os experimentos no laboratório com bons conselhos e em conversas paralelas.

A todos os professores do meu centro, sempre prestativos com seus ensinamentos até extraclasse; tenho muita admiração e respeito por eles; levarei para sempre todos os ensinamentos.

A todos os meus amigos e colegas do curso de engenharia de alimentos e dessa universidade, em especial Júlia Ferreira e Nataly Alves que muito me ajudaram nos estudos.

*“Cada um tem de mim  
exatamente o que cativou”*

Antoine de Saint-Exupéry

## RESUMO

O resfriamento de água quente é uma operação muito utilizada industrialmente e, geralmente, utiliza colunas cilíndricas e caixas retangulares de determinadas alturas nas quais escoam em contracorrente no seu interior água quente (alimentada no seu topo) e ar ambiente (insuflado em sua base). O objetivo desse trabalho foi avaliar a influência das taxas mássicas de ar e de água e da altura da coluna para o resfriamento de água quente em torre experimental através da avaliação da sua eficiência de troca térmica. Os experimentos foram realizados em uma torre experimental de resfriamento de água desenvolvida no Laboratório de Engenharia de Alimentos (LEA/DEA/CT/UFPB). Os ensaios experimentais foram executados segundo uma matriz experimental de planejamento fatorial estatístico do tipo  $2^3$  com pontos centrais. As variáveis de estudo foram as taxas mássicas das correntes fluidas (ar e água) e a altura da torre. A avaliação da operação foi realizada através da determinação da eficiência da torre. O coeficiente de capacidade do equipamento foi determinado para uma condição otimizada de acordo com as faixas encontradas. Os resultados demonstraram que as taxas mássicas das correntes fluidas são as variáveis mais significativas para o aumento da eficiência da torre. Seus resultados são inversamente proporcionais, cujas faixas da melhor condição de operação foram de 3,2 a 6,6  $\text{kg}_{\text{ar}}/(\text{m}^2 \text{ s})$ , 0,83 a 1,0  $\text{kg}_{\text{água}}/(\text{m}^2 \text{ s})$  e 1,0 a 1,3 m de altura da coluna. A condição de máximo desempenho de operação da condição otimizada é referente ao ensaio 3, o qual apresentou uma eficiência de 207%. O coeficiente de capacidade do equipamento apresentou o valor de 0,67  $\text{kg}/(\text{m}^3 \text{ s})$ , considerado elevado para as condições operacionais adotada. Esse estudo demonstrou que o equipamento apresenta uma desejável diferença de temperatura de entrada e saída da corrente de água quente ( $10^{\circ}\text{C}$ ) para a sua faixa operacional de trabalho.

**Palavras-chave:** Delineamento estatístico fatorial, absorção, umidificação.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS.....	2
2.1 Objetivo Geral .....	2
2.2 Objetivos Específicos.....	2
3. REVISÃO DA LITERATURA .....	3
3.1 Colunas de resfriamento de água .....	3
3.2 Torres industriais de resfriamento de água .....	4
3.2.1 <i>Classificação das torres de resfriamento de água quanto ao seu escoamento de ar</i> .....	4
3.2.1.1 <i>Torres com ventilação natural</i> .....	4
3.2.1.2 <i>Torres com ventilação natural e “enchimento”</i> .....	5
3.2.1.3 <i>Torres de resfriamento com tiragem forçada</i> .....	6
3.2.1.4 <i>Torres de resfriamento com tiragem induzida</i> .....	7
3.2.2 <i>Parâmetros para a análise da torre de resfriamento de água</i> .....	8
4. MATERIAL E MÉTODOS .....	10
4.1 Material .....	10
4.1.1 <i>Fluidos</i> .....	10
4.1.2 <i>Equipamentos</i> .....	10
4.2 Metodologia Experimental .....	11
4.2.1 <i>Procedimento de realização dos ensaios experimentais</i> .....	11
4.2.2 <i>Determinação das condições experimentais de operação dos ensaios de resfriamento de água</i> .....	12
4.3 Ensaios experimentais .....	14
4.3.1 <i>Determinação da capacidade do equipamento na condição otimizada de operação</i> .....	15
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	20

<b>5.1 Determinação da faixa ótima de operação para a eficiência da torre</b> .....	20
<b>5.2 Determinação da capacidade de operação da torre na condição operacional otimizada</b> .....	29
<b>6. CONCLUSÃO</b> .....	32
<b>7. REFERÊNCIAS</b> .....	33
<b>Apêndice A</b> .....	35

## 1. INTRODUÇÃO

Os equipamentos e maquinarias tendem a gerar calor na maioria dos processos industriais; para que esse calor seja dissipado, é necessária a utilização de algum fluido. A água geralmente é o fluido mais utilizado, devido à sua não toxicidade e suas características físicas (alto calor específico, baixa viscosidade, alta condutibilidade térmica e alta densidade) que favorecem a sua utilização (SIENZA, 2010).

As torres de resfriamento de água possuem papel importante em virtude do amplo uso da água no resfriamento de equipamentos e maquinários industriais. Ela permite que a água aquecida seja resfriada e que seja reutilizada para o resfriamento de equipamentos e maquinários industriais. As torres de resfriamento de água funcionam em regime contracorrente, onde a água aquecida entra no topo da torre e desce ao longo da coluna por gotejamento e o ar, geralmente utilizado a temperatura ambiente, entra na base da torre. As torres podem ter enchimentos sólidos, recheios a fim de controlar e ampliar o contato do líquido com a corrente gasosa. Assim, os fluidos se encontram ao longo da torre, proporcionando o resfriamento do líquido e a umidificação do gás. Durante o contato dos fluidos, uma parte da massa de água evapora e migra para a corrente de ar (SIENZA, 2010).

Neste processo temos essencialmente a transferência de calor e massa, a transferência de calor acontece devido à diferença da temperatura entre corrente líquida e gasosa e a transferência de massa ocorre pela diferença da pressão parcial do vapor de água na interface de contato líquido-gás (IBRAHIM et al., 1995).

Os principais fatores operacionais das torres de resfriamento estão vinculados às condições físicas e de processo das correntes fluidas e do desenho do equipamento. A temperatura e as taxas mássicas das correntes fluidas, a área e a trajetória de contato dessas no equipamento são algumas das principais variáveis operacionais das torres de resfriamento de água.

Nesse estudo aborda-se a influência dos principais fatores operacionais envolvidos nesse processo, representados pelas taxas mássicas dos fluidos (ar e água) e a altura da torre (vinculada ao equipamento).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

- Avaliação da influência das taxas mássicas das correntes de água e de ar, e da altura da coluna para a eficiência de resfriamento de água em uma torre experimental.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Determinar uma faixa ótima operacional para as variáveis de estudo a partir dos resultados do delineamento estatístico fatorial, do tipo  $2^3$  com pontos centrais, sendo elas: taxa mássica da corrente de ar, taxa mássica da corrente de água e altura da coluna. O parâmetro de avaliação dessa análise é a eficiência da torre.
- Verificar as condições operacionais da torre experimental de resfriamento de água, tais como: velocidade de ar, taxa volumétrica e temperatura da corrente líquida, temperatura de bulbo seco e bulbo úmido da corrente de ar, altura da coluna e outros.
- Determinar o coeficiente de capacidade do equipamento em determinada condição otimizada de operação.

### **3. REVISÃO DA LITERATURA**

As colunas de resfriamento de água são colocadas nas indústrias para desempenhar a função de resfriamento da corrente de água que é responsável por refrigerar equipamentos ao longo da linha de produção. A manutenção da temperatura operacional nesses equipamentos é necessária para que eles consigam operar de acordo com seus parâmetros desejáveis de funcionamento ou até mesmo para o controle da temperatura da água que será devolvida ao meio ambiente (WAKI, 2009).

As colunas de resfriamento de água são classificadas de acordo com o processo de fornecimento de ar para a torre, sendo elas: tiragem natural ou atmosférica, tiragem forçada ou mecânica e tiragem induzida.

A eficiência de uma torre de resfriamento de água está diretamente relacionada com seus parâmetros de operação. Parâmetros como temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido e umidade relativa do ar, estão diretamente relacionados ao clima da região onde a torre de resfriamento de água está localizada (CORTINOVIS; SONG, 2005).

#### **3.1 Colunas de resfriamento de água**

Em unidades industriais como condensadores de usinas geradoras de potência, instalações frigoríficas e trocadores de calor é gerado um calor indesejado durante cada um desses processos. Por isso, se faz necessário controlar a sua temperatura de operação. O resfriamento de água demonstra ser mais eficiente em comparação aos métodos convencionais de refrigeração de líquidos. Esses últimos geralmente são compostos por sopradores de ar acoplados a tubulações aletadas contendo o fluido em escoamento. Porém, as torres de resfriamento apresentam um custo de implantação maior em comparação com os métodos convencionais, devido a instalação de bombas, linhas de bombeamento e demais equipamentos para seu funcionamento. Entretanto, elas podem ser economicamente viáveis pela sua maior eficiência térmica em reduzir a temperatura da água quente dessas unidades operacionais, pois operam com o contato direto entre os fluidos líquido e gás (GEANKOPLIS, 2011).

## 3.2 Torres industriais de resfriamento de água

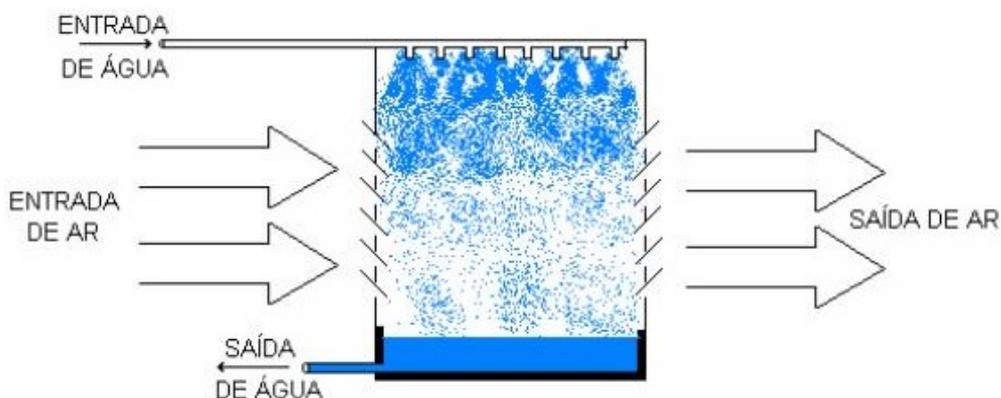
### 3.2.1 Classificação das torres de resfriamento de água quanto ao seu escoamento de ar

Existem três tipos de torres de resfriamento de água em relação ao seu escoamento: as torres de tiragem de ar natural (ou convecção natural), que utiliza somente o movimento do ar atmosférico ambiente; as torres de tiragem de ar forçada (ou convecção forçada), que utiliza trabalho mecânico, criadas a partir de 1970; as de tiragem induzida, onde são utilizados exaustores que direcionam o ar ao longo da torre (SAMPAIO, 2013; MANCUSO, 2001).

#### 3.2.1.1 Torres com ventilação natural

As primeiras torres de resfriamento tinham ventilação natural, não eram tão eficientes e possuíam composições simples (MANCUSO, 2001). Pode-se observar esta configuração na Figura 1.

Figura 1. Primeira configuração de torres de resfriamento.

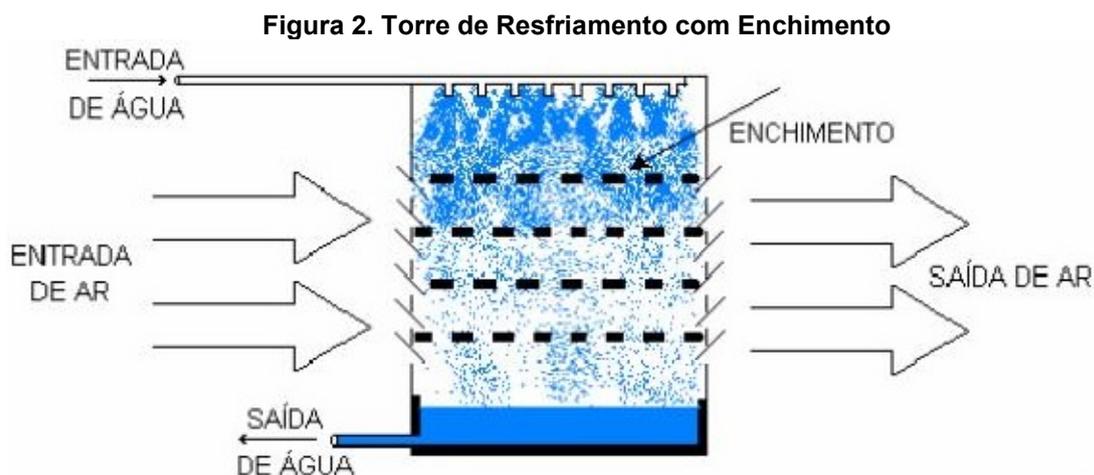


Fonte: Mancuso (2001).

Observa-se na Figura 1 que a água cai ao longo da torre, entrando em contato com o ar e evaporando-se parcialmente. Parte da massa de água que não é evaporada no contato com o ar, é recolhida pela bandeja inferior da torre e posteriormente reutilizada como fonte fria (MANCUSO, 2001).

### 3.2.1.2 Torres com ventilação natural e “enchimento”

Foi observado que colocando obstáculos (também chamados de “enchimentos”) no interior da torre, melhorou-se a sua eficiência e também o grau de nebulização. Como a água demora mais para passar ao longo da torre, essa segunda configuração intensifica a troca de calor entre a água e o ar (MANCUSO, 2001). Pode-se observar na Figura 2 um esquema de uma torre de resfriamento de água com enchimento.



Fonte: Mancuso (2001).

Os “enchimentos” têm o objetivo de aumentar a velocidade da troca de calor da água com o ar, aumentando o tempo em que essa água leva para percorrer a torre, aumentando a superfície de contato através da formação de gotas (ou gotículas) ou filmes de água (SAMPAIO, 2013).

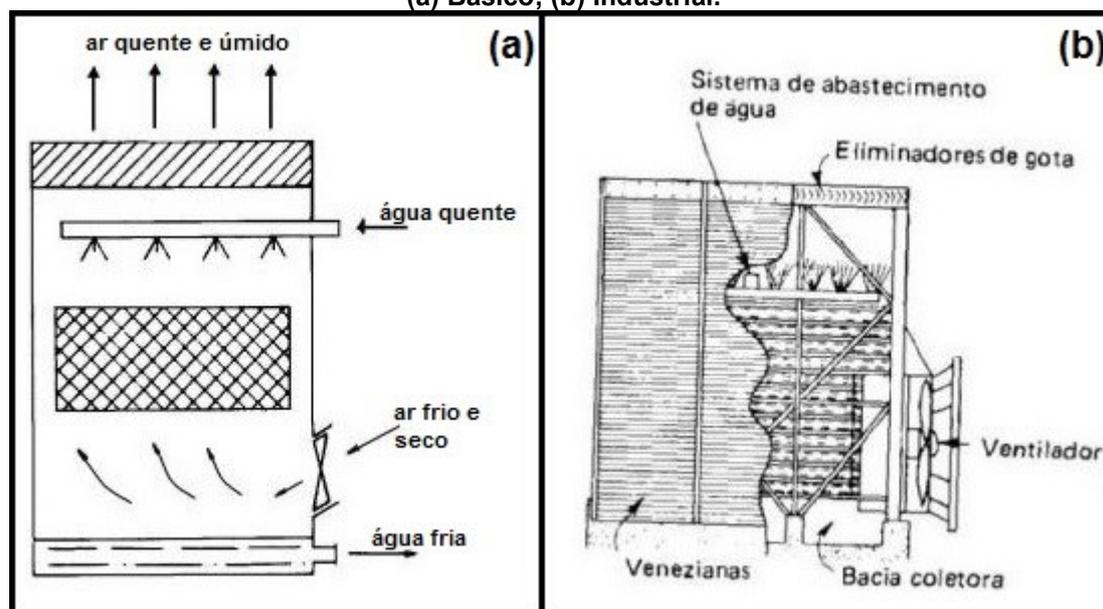
Ao longo do tempo, o uso do “enchimento” proporcionou a economia em relação aos custos da produção, pois se conseguiu a construção de torres menores que garantiam a mesma dissipação de calor que as torres construídas sem “enchimento” (MANCUSO, 2001).

Porém, somente com a utilização do ar atmosférico ocorriam perdas relativamente grandes de água, pois as gotículas de água que não eram absorvidas pelo ar, eram dispersas por arraste através das venezianas, o que correspondia cerca de 0,3% a 1% da vazão da torre. Após a segunda guerra mundial e, conseqüentemente com o avanço da tecnologia, as torres de tiragem natural passaram a ser menos utilizadas e sendo substituídas por torres de circulação mecânica de ar, sendo elas com tiragem forçada ou induzida (MANCUSO, 2001).

### 3.2.1.3 Torres de resfriamento com tiragem forçada

A construção desta torre é similar a construção das torres apresentadas anteriormente. Sua diferença é que com a tiragem forçada temos uma corrente de ar forçada devido a introdução de um ventilador no interior da torre. Esse desenho é para auxiliar na realização de futuras inspeções, como também serviços de manutenção, pois o ventilador e o seu motor são colocados em um nível baixo. Isso contribui para uma maior vazão mássica, pois o ar ventilado é frio e conseqüentemente mais denso. Não se faz necessário a blindagem dos motores, porque esses motores trabalham com ar seco. Porém, o tamanho dos ventiladores é limitado devido ao seu posicionamento, sendo necessário a instalação de mais ventiladores, para garantir ou aumentar a taxa de escoamento de ar, podendo assim ocorrer um aumento no ruído operacional (COSTA, 2006). Pode-se observar na Figura 3 um sistema básico de uma torre de resfriamento com tiragem forçada.

**Figura 3. Desenhos esquemáticos de uma torre de resfriamento com tiragem forçada: (a) Básico; (b) Industrial.**

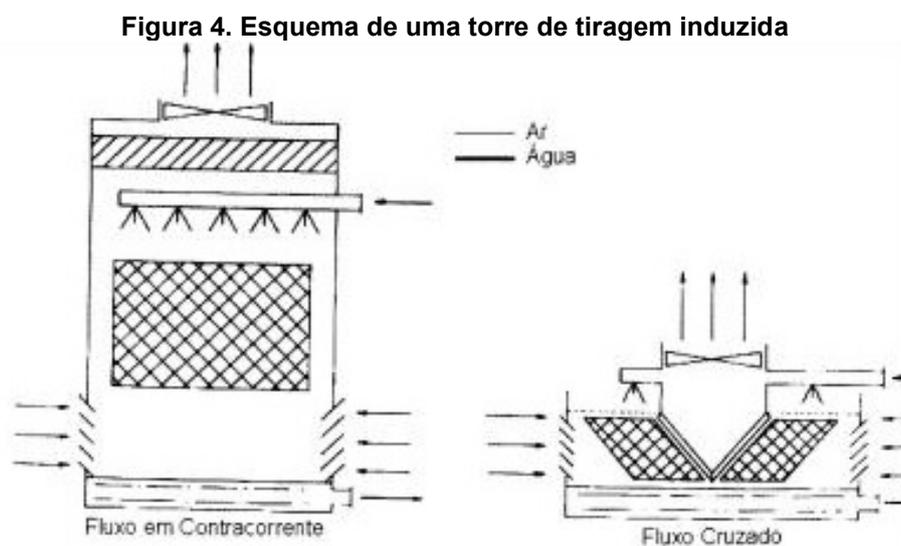


Fonte: (a) Pirani e Venturini, 2004; (b) Elonka e Minich, 1978.

Segundo Piran e Venturini (2004), em regiões que apresentam grande variação de temperatura durante o ano, no período frio existe risco de formação de gelo nas pás do ventilador, bloqueando a passagem do ar para o interior da torre e diminuindo a sua eficiência.

### 3.2.1.4 Torres de resfriamento com tiragem induzida

Assim como nas torres de resfriamento com tiragem forçada, essas torres possuem ventiladores. Porém, nas torres de resfriamento com tiragem induzida os ventiladores são instalados na saída do ar. Estas torres são as mais utilizadas na maioria dos processos industriais, pois podem ser fabricadas em potências superiores as das torres com tiragem forçada. Isso ocorre devido ao ventilador estar localizado na parte superior da torre, minimizando o problema de ruído e de recirculação de ar provocados pela alta velocidade de descarga. Além disso, seu espaço, tamanho é menor em comparação com a torre de resfriamento com tiragem forçada favorecendo a sua utilização (OLIVEIRA, 2009). Pode-se observar na Figura 4 um sistema de uma torre de resfriamento de tiragem induzida.



Fonte: Pirani & Venturini, 2004.

Porém, nas torres de resfriamento com tiragem induzida pode ocorrer maiores vibrações na coluna devido ao ventilador estar localizado na sua porção superior. Essa posição dos ventiladores também dificulta o acesso para a realização de suas inspeções e manutenções (OLIVEIRA, 2009; SAMPAIO, 2013).

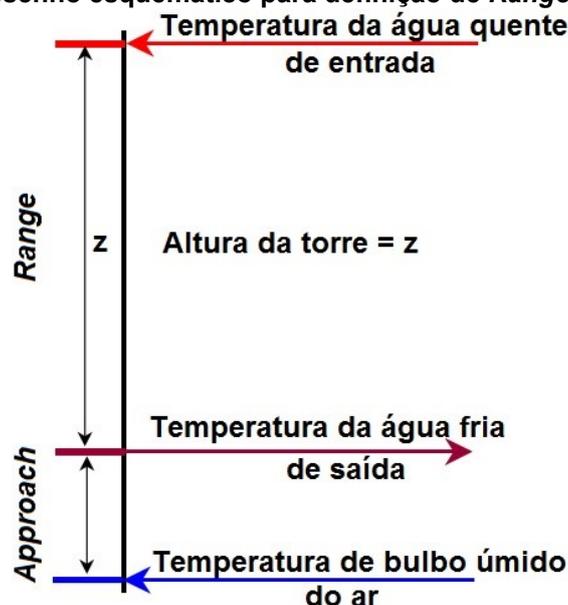
### 3.2.2 Parâmetros para a análise da torre de resfriamento de água

Segundo Sampaio (2013), o desempenho de uma torre de resfriamento de água pode ser quantificado em três variáveis, sendo elas: *range*, *approach* e a vazão de água, definidas como:

- *Range*: é a diferença de temperatura da água de entrada da torre de resfriamento (água de alimentação mais quente) e a temperatura da água de saída da torre de resfriamento (água fria). O *range* pode variar de acordo com as condições climáticas do ambiente (ar ambiente) em que a torre é instalada e em virtude da vazão de água requerida para o seu resfriamento (SAMPAIO, 2013; CORTINOVIS; SONG, 2005).
- *Approach*: é a diferença entre a temperatura de água na saída da torre de resfriamento (água fria) e a temperatura de bulbo úmido do ar na entrada da torre. Para torres industriais, é obedecido um critério que determina que essa diferença de temperatura seja maior ou igual a 5°C (SAMPAIO, 2013; CORTINOVIS; SONG, 2005).
- *Vazão de água de resfriamento*: taxa volumétrica de água desejável para o resfriamento, a qual tem uma relação direta com um *range* pré-estabelecido (SAMPAIO, 2013).

Na Figura 5, pode-se observar um desenho esquemático para as definições de *Range* e *Approach*.

Figura 5. Desenho esquemático para definição de *Range* e *Approach*.



Fonte: Leal, 2016.

Através da razão entre esses parâmetros (*Range* e *Approach*) apresentados na Figura 5, pode-se determinar a eficiência de uma torre de resfriamento de água através da seguinte equação:

$$E_{\text{torre}} = \frac{T_{\text{água entra}} - T_{\text{água sai}}}{T_{\text{água sai}} - T_{\text{bu}}} \quad \text{eq. (1)}$$

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Material

#### 4.1.1 Fluidos

Os ensaios experimentais foram realizados com ar ambiente do Laboratório de Engenharia de Alimentos (LEA/DEA/CT/UFPB) e água obtida da rede de abastecimento local.

#### 4.1.2 Equipamentos

O equipamento utilizado foi uma torre experimental de resfriamento de água desenvolvida no LEA por Leal (2016) composta por vários acessórios. A Figura 6 apresenta as fotografias do equipamento e seus acessórios.

Figura 6. Torre experimental de resfriamento de água e seus componentes: (a) coluna retrátil com a altura mínima de 0,78 m; (b) coluna retrátil com a altura mínima de operação de 1,3 m (c) vista frontal do quadro de controle; (d) exaustor radial de escoamento de ar, (e) bombas de escoamento de água; (f) distribuidor de água; (g) bandeja de coleta de água resfriada; (h) quadro de controle dos componentes; (i) reservatório de abastecimento e aquecimento de água.



Fonte: Leal (2016).

Os instrumentos de monitoramento e calibração das condições de operação das correntes fluidas e do equipamento utilizado são: anemômetro de fio quente (*velocicheck*, *TSI Incorporated*, *EUA*), termohigrômetro (*digital multimeter*, MD-6290, ICEL/Manaus, Brasil), termopares e demais vidrarias de laboratórios (provetas, béquers, outros)

A temperatura de bulbo úmido da corrente de entrada da corrente de ar foi determinada por uma carta psicrométrica digital (*software Psicrom* desenvolvido por Castro e Chaves, 2003).

## **4.2 Metodologia Experimental**

### **4.2.1 Procedimento de realização dos ensaios experimentais**

O procedimento de operação da torre experimental de resfriamento de água segue o seu procedimento operacional padrão (POP) elaborado por Oliveira (2017). O resumo das etapas do seu funcionamento é o seguinte:

- Realizar o abastecimento do reservatório de líquido com água, cujo volume deve cobrir a sua resistência de aquecimento (em torno de 30 litros) e ligá-la calibrando a temperatura de acondicionamento da água na mesma condição requerida para a corrente líquida de alimentação na torre, através do sistema de controle e monitoramento de temperatura presente no quadro de comando. Após atingir-se a temperatura de entrada da corrente líquida, espera-se a estabilização de sua temperatura (em torno de 10 min) no reservatório de líquido, cujo monitoramento é realizado através de um termopar acoplado ao sistema de controle e temperatura do tanque estoque.
- O exaustor da corrente de ar é colocado em funcionamento, cuja velocidade de ar é controlada através de seu sistema de intensidade de rotação. A velocidade da corrente de ar é calibrada através de um anemômetro de fio com sua sonda posicionada no interior da coluna. Ajusta-se a intensidade de rotação do exaustor para a velocidade e, conseqüentemente, para a taxa mássica de ar requerida.
- Acionam-se as bombas de alimentação e retorno da água, posicionando as válvulas de controle de vazão na posição desejada para determinada taxa mássica de água requerida.

- A umidade relativa e a temperatura de bulbo seco do ar é monitorada através de um termo higrômetro, cujas medidas são realizadas no local de execução dos ensaios e na entrada de ar da coluna.

- O tempo de ensaio de resfriamento de água quente, obtido pelo contato das correntes de água quente e ar frio, é avaliado através da estabilização da temperatura de saída de água da coluna, monitorada através de termopares localizados no interior da bandeja de coleta de água fria. Após se alcançar uma temperatura constante da corrente de saída de água fria, espera-se determinado período de tempo para validar o seu resultado. Isso ocorre em intervalos de tempo de cerca de 10 min. e significa o término do seu ensaio experimental.

#### **4.2.2 Determinação das condições experimentais de operação dos ensaios de resfriamento de água**

As faixas de operação das taxas mássicas das correntes fluidas foram baseadas nas informações do POP do equipamento elaborado por Oliveira (2017). As taxas mássicas de ar e de água utilizada nos ensaios foram determinadas através de:

**a)** Leituras da velocidade da corrente de ar através do anemômetro de fio quente, cuja sonda foi posicionada no centro da área de secção transversal de escoamento do gás em ponto a 20 cm da entrada desse fluido na coluna. A taxa mássica de ar foi obtida através da razão entre a velocidade do ar e o volume específico do ar úmido obtidos através das seguintes expressões:

$$G = \frac{v}{v_{\text{ar úmido}}} \quad \text{eq. (2)}$$

$$v_{\text{ar úmido}} = \frac{RT}{P} (1 + 1,6078U) \quad \text{eq. (3)}$$

onde:  $G$  = taxa mássica de ar ( $\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$ );  $v$  = velocidade do ar ( $\text{m}/\text{s}$ );  $v_{\text{ar úmido}}$  = volume específico do ar úmido ( $\text{m}^3/\text{kg}_{\text{ar seco}}$ );  $T$  = temperatura do fluido (K);  $U$  = umidade absoluta do ar úmido ( $\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$ );  $P$  = pressão atmosférica ambiente (101,325 kPa),  $R$  = constante dos gases (0,28705 kJ/kg K).

A umidade absoluta do ar úmido foi determinada pelas expressões a seguir.

$$U = 0,62198 \frac{p_v}{(P_{total} - p_v)} \quad \text{eq. (4)}$$

Sendo que:

$$p_v = p_{vs} \times UR$$

$$p_{vs} = \exp \left[ \frac{-7511,52}{T} + 89,63121 + 0,02399897T - 1,1654451 \cdot 10^{-5} T^2 - \right. \\ \left. - 1,2810336 \cdot 10^{-8} T^3 + 2,0998405 \cdot 10^{-11} T^4 - 12,150799 \ln(T) \right] \quad \text{eq. (5)}$$

$$UR = \frac{UR(\%)}{100} \quad \text{eq. (6)}$$

onde: U = umidade absoluta do ar (kg<sub>água</sub>/kg<sub>ar seco</sub>); P<sub>total</sub> = pressão atmosférica ambiente absoluta (Pa); p<sub>v</sub> e p<sub>vs</sub> = pressões parciais de vapor de água e de saturação de água no ar (Pa), respectivamente; UR e UR(%) = umidade relativa do ar em termos absolutos e percentuais, respectivamente.

**b) Determinações de volume de água em função do tempo para se obter a taxa volumétrica da corrente de água na entrada da coluna.** A taxa mássica da corrente líquida na torre foi determinada através das relações entre a taxa volumétrica e a densidade do fluido e a área útil de secção transversal de escoamento e contato dos fluidos, expressos por:

$$L = \frac{V \rho_{água}}{S_{útil}} \quad \text{eq. (7)}$$

Sendo que:

$$\rho_{água} = \frac{(999,839 + 16,952T - 7,99 \times 10^{-3} T^2 - 46,241 \times 10^{-6} T^3 + 105,846 \times 10^{-9} T^4 - 28,103 \times 10^{-12} T^5)}{(1 + 16,887 \times 10^{-3} T)} \quad \text{eq. (8)}$$

$$S_{útil} = \frac{\pi D_{útil}^2}{4} \quad \text{eq. (9)}$$

onde: L = taxa mássica de água (kg/m<sup>2</sup> s); V = taxa volumétrica de água (m<sup>3</sup>/s), S<sub>útil</sub> = área secção transversal útil de contato e escoamento dos fluidos no interior da coluna (m<sup>2</sup>); D<sub>útil</sub> = diâmetro da área secção transversal útil de contato e escoamento dos fluidos (m); T é a temperatura (°C); ρ<sub>água</sub> é a densidade da água líquida (kg/m<sup>3</sup>).

### 4.3 Ensaios experimentais

Os ensaios experimentais de resfriamento de água quente foram realizados através de delineamento estatístico do tipo fatorial  $2^3$ , cujas variáveis de estudo são: taxa mássica da corrente de ar, taxa mássica da corrente de água quente e altura da coluna. O planejamento experimental fatorial foi realizado com 5 pontos centrais, denominado de DCC com composto central ou com pontos centrais. Esse desenho do DCC com pontos centrais foram adotados para se obter uma curvatura de suas superfícies de respostas e curvas de níveis e a possível verificação, visualização da região de ótimo para seus parâmetros de avaliação, denominados de respostas do planejamento.

A Tabela 1 apresenta as variáveis de estudo e os seus níveis de variação para o estudo da determinação da faixa ótima de operação de resfriamento de água, de forma codificada e com seus respectivos valores de operação, segundo o delineamento experimental estatístico adotado.

**Tabela 1. Variáveis e níveis de variação do DCC com pontos centrais para a determinação da faixa ótima de operação da torre de resfriamento de água.**

Variável	níveis de variação		
	Mínimo	máximo	Central
Altura torre, h (m)	0,78	1,30	1,04
Taxa de ar, G (kg/m <sup>2</sup> s)	3,20	6,60	4,90
Taxa de água, L (kg/m <sup>2</sup> s)	0,83	1,33	1,08

Fonte: Autor, 2018.

O parâmetro de avaliação da operação ou resposta do DCC com ponto centrais é a eficiência da torre ( $E_{\text{torre}}$ , %) determinada a partir do conhecimento da temperatura de saída da corrente de água quente da coluna e das temperaturas de entrada dessa corrente líquida e de bulbo úmido do ar de entrada e calculada através da Equação 1.

Os valores fixados para as condições de entrada das correntes fluidas foram: a) temperatura de entrada da corrente de água quente igual a 50 °C; b) umidade relativa e temperatura de bulbo seco da corrente de entrada de ar iguais a 80% de UR e 28 °C.

A Tabela 2 apresenta a matriz experimental do delineamento estatístico fatorial com pontos centrais aplicados para os ensaios de resfriamento de água quente na torre experimental.

**Tabela 2. Variáveis e seus níveis de variação do DCC com pontos centrais para a determinação da faixa otimizada de operação da torre experimental de resfriamento de água quente.**

<b>Ensaio</b>	<b>Altura torre, h (m)</b>	<b>Taxa de ar, G (kg/m<sup>2</sup> s)</b>	<b>Taxa de água, L (kg/m<sup>2</sup> s)</b>
1	1,30	3,20	0,83
2	1,30	6,60	0,83
3	1,30	6,60	1,33
4	1,30	3,20	1,33
5	0,78	6,60	1,33
6	0,78	3,20	1,33
7	0,78	6,60	0,83
8	0,78	3,20	0,83
9	1,04	4,90	1,08
10	1,04	4,90	1,08
11	1,04	4,90	1,08
12	1,04	4,90	1,08
13	1,04	4,90	1,08

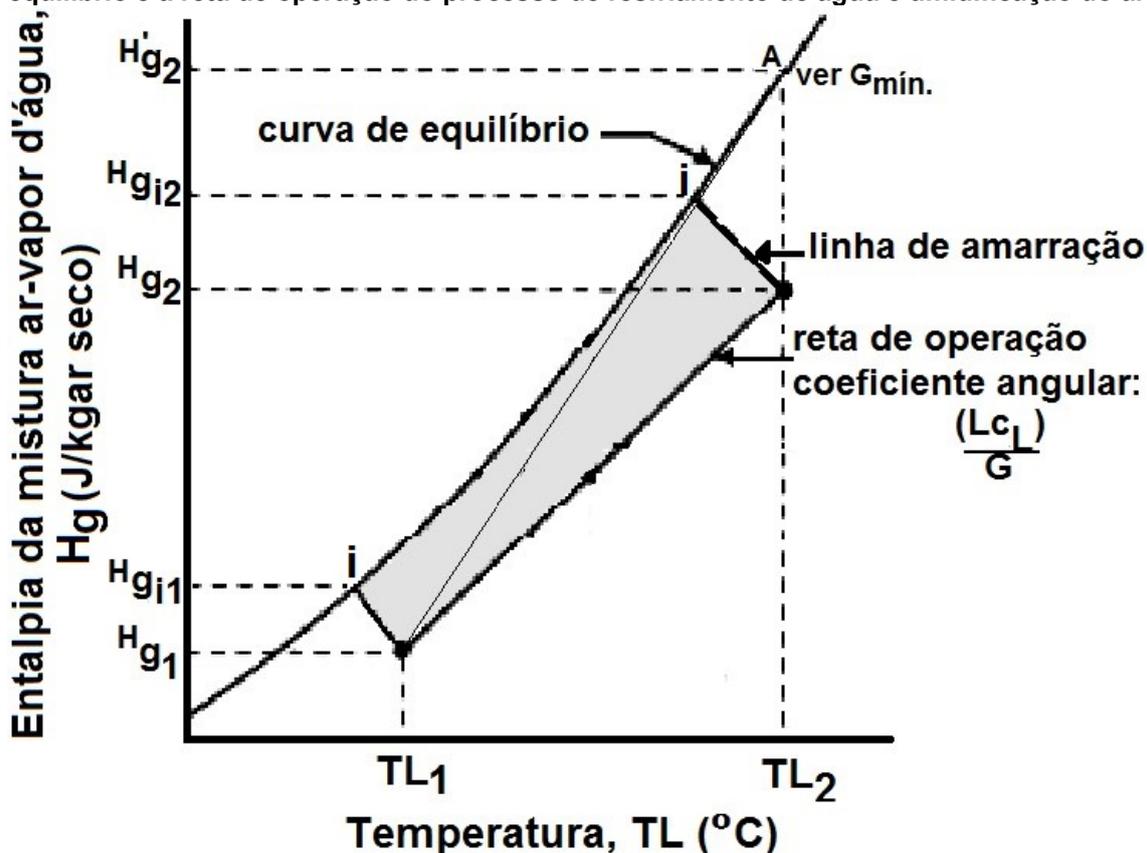
Fonte: Autor, 2018.

#### **4.3.1 Determinação da capacidade do equipamento na condição otimizada de operação**

A capacidade de operação da torre pode ser avaliada através dos resultados do coeficiente de capacidade do equipamento ( $k_{ya}$ ), para alcançar os valores desejáveis de diferença de temperatura da corrente de água quente ou da temperatura de saída da corrente líquida. Os resultados desses parâmetros são obtidos a partir das informações das propriedades físicas da corrente de ar e de água quente e da temperatura de saída da corrente líquida.

Para obter os valores de  $k_{ya}$ , é necessário elaborar diagramas da relação das entalpias de entrada e saída da corrente de ar e das temperaturas de entrada e saída da corrente líquida, denominada de reta de operação. Esse diagrama deve conter a curva de equilíbrio do ar-vapor d'água, a qual representa a zona de contato e de transferência de calor e massa entre os fluidos. Na Figura 7 pode-se observar um exemplo desse tipo de diagrama para determinadas condições de operação das correntes fluidas.

Figura 7. Diagrama da entalpia do ar e da temperatura da água contendo a curva de equilíbrio e a reta de operação do processo de resfriamento de água e umidificação do ar



Fonte: Adaptado de Geankoplis (2011).

Na Figura 7, os pontos com índice e subíndice "i" representam o contato entre a água e o ar ao longo dos seus escoamentos no interior da torre. Os pontos 1 e 2 representam a base e o topo da coluna, respectivamente. Como o escoamento é contracorrente, no topo da coluna estão os pontos  $T_{L2}$  (entrada de água quente) e  $H_{g2}$  (entalpia de saída do ar quente), e na base os pontos  $T_{L1}$  (entrada de água quente) e  $H_{g1}$  (entalpia de saída do ar quente). O ponto A é utilizado para a determinação de  $H_{gi}$  na condição de completa saturação da corrente de ar de saída, a qual é hipotética e utilizada apenas para o cálculo da taxa mínima da corrente de ar ( $G_{\text{mínimo}}$ ). Essa condição de  $G_{\text{mínimo}}$  é uma consideração teórica utilizada como base de cálculo para  $G$ , pois isso representa uma coluna com 100% de eficiência no processo de umidificação do ar e que deverá apresentar uma altura infinita.

O diagrama da Figura 7 é utilizado para a determinação do termo integração

entálpico de contato entre as fases ar-vapor d'água  $\left( \int_{H_{g1}}^{H_{g2}} \frac{dH_g}{(H_{gi} - H_g)} \right)$ , o qual

compõe a equação de transferência de calor e massa, na forma integral, entre os pontos extremos da coluna de entrada e saída das correntes de ar e de

água e utilizada para se obter uma altura da desejável da coluna (h), expressa pela equação 10.

$$h = \frac{G}{Kya} \int_{H_{g1}}^{H_{g2}} \frac{dH_g}{(H_{gi} - H_g)} \quad \text{eq. (10)}$$

onde: h = altura da coluna (m); G é corrente mássica de ar de alimentação de ar seco por unidade de área ( $\text{kg}_{\text{ar seco}}/\text{m}^2 \text{ s}$ );  $H_g$  = entalpia da corrente gasosa de entrada e saída da coluna ( $\text{J/kg K}$  de ar seco);  $H_{gi}$  = entalpia da corrente gasosa na condição de saturação ou na curva de equilíbrio do ar úmido ( $\text{J/kg K}$  de ar seco);  $Kya$  = coeficiente de capacidade do equipamento ( $\text{kg}/\text{m}^3 \text{ s}$ ).

Portanto, a determinação da capacidade do equipamento é obtida através do rearranjo da equação 11 e expressa por:

$$Kya = \frac{G}{h} \int_{H_{g1}}^{H_{g2}} \frac{dH_g}{(H_{gi} - H_g)} \quad \text{eq. (11)}$$

Dessa forma prática, o termo de integração entálpico da equação 11 é representado pela área compreendida, localizada abaixo da curva de equilíbrio ar-vapor d'água e acima da reta de operação, referente a região sombreada na

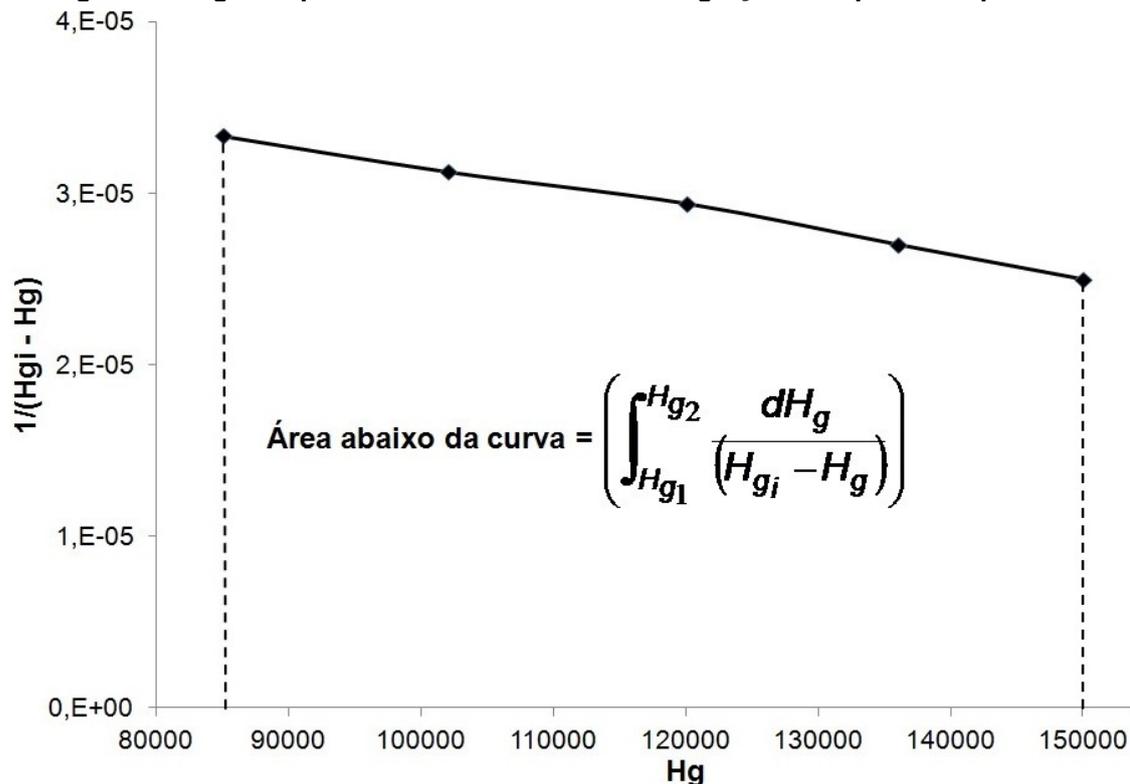
Figura 7. Geralmente, elabora-se um diagrama de  $\left( \frac{1}{H_{gi} - H_g} \right)$ , eixo y, contra

$H_g$ , eixo x para se resolver o termo entálpico  $\left( \int_{H_{g1}}^{H_{g2}} \frac{dH_g}{(H_{gi} - H_g)} \right)$  que corresponde

a área sob a curva da Figura 8. Essa área é similar a um losango e pode ser facilmente determinada a partir da equação 12.

$$\left( \int_{H_{g1}}^{H_{g2}} \frac{dH_g}{(H_{gi} - H_g)} \right) = \frac{\left( \frac{1}{H_{gi} - H_g} \right)_{entra} + \left( \frac{1}{H_{gi} - H_g} \right)_{sai}}{2} \times (H_{gsai} - H_{gentra}) \quad \text{eq. (12)}$$

Figura 8. Diagrama para o cálculo do termo de integração entálpico da eq.11.



Fonte: Leal (2016).

As entalpias de entrada e saída da corrente de ar são obtidas pelas seguintes expressões:

$$H_{g_{entra}} = [(1,005 + 1,88U) \times 10^3 \times (T - T_{Ref.})] + (2501 \times 10^3 U) \Rightarrow \text{SI} \quad \text{eq.}(13)$$

onde:  $H_{g_{entra}}$  = entalpia específica do ar úmido (J/kg);  $U$  = umidade absoluta do ar úmido ( $\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$ );  $T_0$  = temperatura de referência (K ou  $^{\circ}\text{C}$ ); cuja expressão está no sistema dimensional internacional (SI: mks).

$$H_{g_{sai}} = \frac{[L \cdot c_{pL} (T_{L_{entra}} - T_{L_{sai}})]}{G} + H_{g_{entra}} \quad \text{eq.}(14)$$

Sendo que:

$$\frac{c_{p_{\text{água}}(a T \text{ em } ^{\circ}\text{C})}}{c_{p_{\text{água}}(a 15^{\circ}\text{C})}} = 0,996185 + 0,0002874 \left( \frac{T + 100}{100} \right)^{5,26} + 0,011160 \times 10^{-0,036T} \quad \text{eq.}(15)$$

onde:  $c_{p_{\text{água}}}$  a  $15^{\circ}\text{C}$  = 4185,5 J/kg K;  $c_p$  = calor específico da água (J/kg K);  $L$  e  $G$  = taxas mássicas das correntes de líquido e de ar seco escoando em contracorrente na coluna ( $\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$ );  $H_g$  = entalpias de entrada e saída da corrente de ar (J/kg K),  $T_L$  = temperaturas de entrada e saída da corrente líquida ( $^{\circ}\text{C}$ ).

A determinação de  $G_{\text{mínimo}}$  é obtida pelo rearranjo da expressão 16, sendo:

$$G_{\text{mínimo}} = \frac{[L c_{pL} (T_{L\text{entra}} - T_{L\text{sai}})]}{(H_{g\text{sai}} - H_{g\text{entra}})} \quad \text{eq.(16)}$$

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Determinação da faixa ótima de operação para a eficiência da torre

Foram produzidos 13 ensaios seguindo a matriz do planejamento experimental fatorial adotado. Para os oito experimentos principais (combinações +1 e -1) e cinco centrais foram coletadas as temperaturas de saída com a finalidade de calcular a eficiência da torre de resfriamento de água experimental, fixando-se as condições de temperatura e umidade relativa da corrente de ar ( $28 \pm 0,3$  °C e  $80 \pm 1$  %, respectivamente) e da temperatura da corrente de água quente (50 °C).

Os resultados dos ensaios experimentais de resfriamento de água sob diferentes condições operacionais (altura da torre, a taxa de ar e de água) para a eficiência da torre estão apresentados na Tabela 3. Os resultados detalhados das temperaturas de saída da corrente de água quente ( $TL_{sai}$ ) e da sua diferença de temperatura ( $TL_{entra-sai}$ ) estão apresentadas na Tabela A1 do Apêndice A.

**Tabela 3: Resultados dos ensaios experimentais do planejamento estatístico 2<sup>3</sup> com pontos centrais (DCC) das variáveis altura da torre, taxa mássica de ar e taxa mássica de água para a eficiência da torre (% $E_{torre}$ ).**

Ensaio	Altura torre, h (m)	Taxa de ar, G (kg/m <sup>2</sup> s)	Taxa de água, L (kg/m <sup>2</sup> s)	$E_{torre}$ (%)
1	1,30	3,20	1,33	25,1
2	1,30	3,20	0,83	60,6
3	1,30	6,60	0,83	207,4
4	1,30	6,60	1,33	50,0
5	0,78	6,60	1,33	38,3
6	0,78	3,20	1,33	18,6
7	0,78	6,60	0,83	83,1
8	0,78	3,20	0,83	29,0
9	1,04	4,90	1,08	68,2
10	1,04	4,90	1,08	62,7
11	1,04	4,90	1,08	67,1
12	1,04	4,90	1,08	60,6
13	1,04	4,90	1,08	59,6

Fonte: Autor, 2018.

Observa-se na Tabela 3 que o maior valor da eficiência foi obtido no ensaio 3, cujas condições de operação foram de maiores valores de altura da torre e da taxa mássica de ar e menor valor de taxa mássica de água. Verifica-

se que os maiores resultados de eficiência da torre foram obtidos nos ensaios que utilizaram os maiores valores da altura da torre e da taxa de ar e menor taxa de água quente. Isso pode estar relacionado ao maior contato entre as correntes dos fluidos, representado pela maior distância de trajetória percorrida pelas mesmas devido a maior altura da torre. Assim, maior será a taxa de transferência de calor e massa entre as mesmas. Conseqüentemente maior será a eficiência do processo de resfriamento de água que é determinado pela diferença de temperatura de entrada e saída da corrente de água quente.

A evaporação da água é responsável pelo seu resfriamento nas torres de resfriamento de água. A literatura cita que em regiões quentes, cujas condições do ar ambiente são decorrentes, cerca de 80% do calor envolvido nessa operação é ocasionada devido ao calor latente (mudança de estado físico) e o restante, 20%, pelo calor sensível (mudança de temperatura) (CORTINOVIS, 2005). Isso indica que a região nordeste brasileira se enquadra nessa condição.

Os ensaios de resfriamento de água foram realizados em condições de região quente, com valores fixos de temperatura e umidade de ar iguais a 28°C e 80%, respectivamente. Os resultados do *range* (diferença de temperatura de entrada e saída da corrente de água quente) dos ensaios experimentais apresentaram um valor médio e desvio de  $8,9 \pm 3,3$  °C. Esse resultado está em conformidade com as informações da literatura para a diferença de temperatura da corrente de água quente das câmaras de resfriamento de água em escala piloto e industrial que apresentam valores em torno de 10 °C .

Ressalta-se que a torre experimental utilizada apresenta resultados satisfatórios para essa diferença de temperatura da corrente de água quente e seu conseqüente resfriamento devido a sua simplicidade de operacional de projeto. A torre experimental tem uma altura relativamente baixa (1,30 m) e não apresenta nenhum tipo de enchimento ou recheio. Esses aparatos proporcionam um maior contato entre os fluidos e uma maior troca de calor entra o ar e a água por causa de uma maior área de contato. O principal responsável pela satisfatória eficiência da torre é a elevada relação da taxa mássica de escoamento da corrente de ar (G) com uma baixa taxa mássica de escoamento de água quente (L), a qual G/L é na faixa 3,9 a 5,0 vezes. A alta taxa de ar com uma baixa taxa de água permitiu um maior tempo para a troca

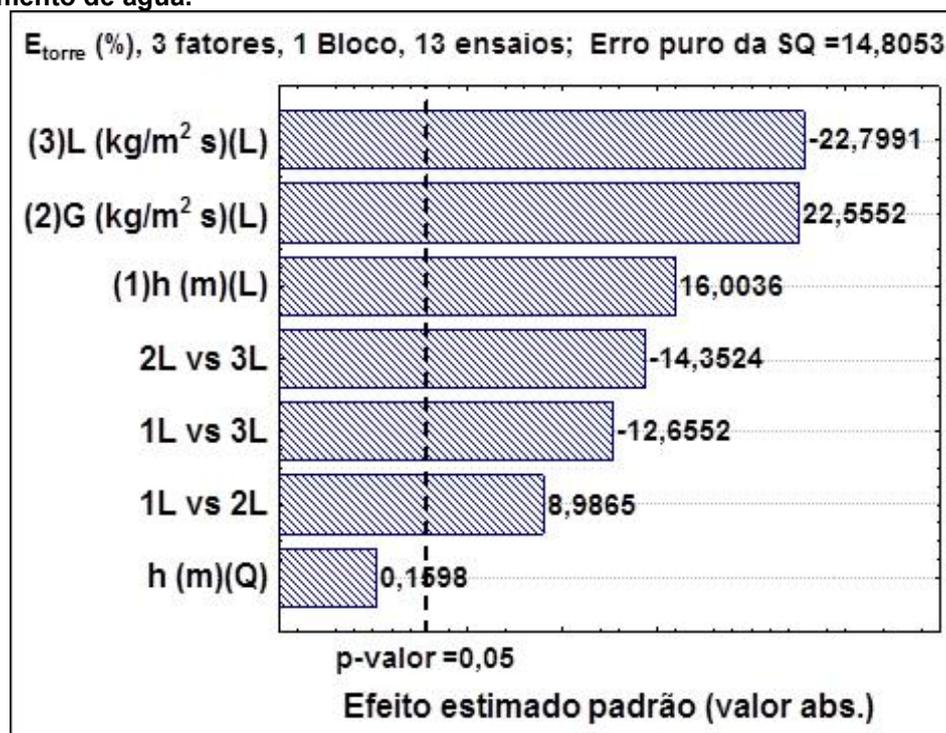
térmica entre os fluídos, assim, obtendo um melhor resultado para a eficiência do processo de resfriamento de água.

A significância das variáveis de estudo e suas interações é avaliada através da análise estatística do DCC que foi realizada ao nível de significância de 5%. Os resultados de significância dos fatores (altura e taxa mássica de ar) e (altura e taxa mássica de água) estão representados através da Tabela de ANOVA e do Diagrama de Pareto. O modelo estatístico considerado, com pontos centrais, pode ser ajustado pelos modelos matemáticos lineares e quadrático, representado pela notação das letras L e Q presentes ao lado dos nomes das variáveis de estudo nas suas tabelas e diagramas estatísticos de resultados.

A validade e significância das variáveis de estudo e suas interações, obtidas apenas para o modelo linear, é determinada através do teste f da análise de variância dos resultados. O parâmetro de avaliação do desempenho da operação é a eficiência da torre ( $E_{\text{torre}}$ ), expressa percentualmente e denominada de resposta do planejamento fatorial estatístico. Ela é obtida através dos resultados da temperatura da corrente de saída da água quente. A qualidade e a validade do tratamento estatístico podem ser avaliadas através dos diagramas da relação dos valores observados com os preditos pelo modelo e da distribuição normal dos resíduos em torno da reta que indica a normalidade para a resposta em questão. Os modelos estatísticos, linear ou quadrático, obtidos para prever resultados pontuais da  $E_{\text{torre}}$  na faixa de valores consideradas para as variáveis de estudo somente serão considerados significativos, utilizáveis, se o valor de  $f_{\text{calculado}}$  for maior que o  $f_{\text{tabelado}}$  em uma ordem de grandeza de que o  $f_{\text{calculado}}$  seja “n” vezes maior que o  $f_{\text{tabelado}}$ . Alguns autores consideram 3 vezes e outros 10 vezes (Barros-Neto et al., 2002; Rodrigues e Lemma, 2005).

Inicialmente foi analisada a  $E_{\text{torre}}$  através do diagrama de Pareto para os ensaios experimentais de resfriamento de água, realizados segundo a matriz experimental apresentada na Figura 8.

Figura 8: Diagrama de Pareto para a eficiência da torre para os ensaios experimentais de resfriamento de água.



Fonte: Autor, 2018.

Observa-se na Figura 8 que os fatores principais, representados pelas variáveis de estudo, e as suas interações foram significativas para a eficiência da torre no ajuste linear. O modelo quadrático não apresenta significância estatística para as variáveis de estudo. A interação dos fatores (G) e (L), referente as taxas mássicas das correntes dos fluidos, apresentou maior significância estatística em relação as interações da taxa mássica de corrente de fluidos com a altura da torre (L e h, seguida de G e h, em ordem decrescente de significância estatística). Esses resultados indicam que a relação de L/G é a principal responsável pelo desempenho do resfriamento de água quente da torre. É importante ressaltar que o maior valor de  $E_{\text{torre}}$  é encontrado com valores mínimos de L e máximos de G, conforme o resultado encontrado no ensaio 3 apresentado na Tabela 3. Os ensaios foram realizados a temperatura de bulbo seco e umidade relativa da corrente do ar constantes. A área de secção transversal permaneceu também constante em todos os ensaios e a coluna não apresenta recheio para aumentar o contato entre os fluidos. Então, toda a variação de diferença de temperatura da corrente de água quente ou diminuição da temperatura da saída desse líquido na coluna está vinculada ao tempo de contato entre as correntes fluidas. A variação desse tempo de contato está diretamente relacionada as taxas mássicas dos

fluidos, a trajetória ou percurso dos fluidos através altura da coluna e da área de contato entre os fluidos (área de escoamento ou de secção transversal do vaso cilíndrico). Assim, uma diminuição da taxa mássica de água quente promove um maior tempo de permanência do líquido no interior do equipamento. Uma maior disponibilidade de gás, representada pelo aumento da taxa de ar através da torre, contribui para um maior contato entre os fluidos, já que a torre não possui recheio. Um aumento do percurso de escoamento e contato entre os fluidos pode ser obtido através do aumento da altura da coluna. Todos esses fatores reunidos representam um maior tempo de contato disponível para a transferência de calor e massa entre a corrente gasosa e a líquida e o maior resfriamento da água quente de entrada na coluna. Se a temperatura e umidade relativa da corrente de entrada do ar são relativamente baixas o resfriamento da corrente líquida tende a ter êxito no equipamento utilizado. Isso significa que: a) a diferença de temperatura das correntes de entrada do ar ambiente e da água quente se encontra em torno de 20 °C; b) o conteúdo de umidade da corrente gasosa não se encontra próxima a sua saturação, em condições de umidade relativa inferior a 85%. Portanto, tal condição mencionada de maior tempo contato foram obtidas com os resultados já citados de menor taxa mássica de água quente, maior taxa mássica de ar e maior altura da coluna. Em relação à taxa mássica de ar existe uma análise mais detalhada de avaliação. O maior tempo de permanência da corrente gasosa seria obtido com menores valores de sua taxa de escoamento. Porém, como a torre não tem recheio, menores taxas de ar resultam em menores quantidades mássicas desse fluido para o contato com a massa de água em escoamento em contracorrente. Então, o aumento da disponibilidade da massa de gás para aumentar o contato com a massa de líquido é obtida com o aumento da taxa mássica de ar através do aumento da velocidade do ar no interior da coluna. Sob ponto de vista térmico, a massa de ar frio é utilizada para resfriar a massa de líquido quente. Portanto, quanto maior a massa de ar frio para contato com a massa de líquido quente, maior pode ser o resfriamento da água quente. A eficiência da torre deve-se a menores valores de temperatura de saída da corrente de água quente, mantendo constante a sua temperatura de entrada. Ela é um fator primordial para uma torre de resfriamento de água, pois seus altos valores implicam em maiores diferenças de temperatura da corrente líquida através da coluna e, possivelmente, menores gastos de energia fornecidos ao equipamento.

Paralelamente a análise dos resultados do diagrama de Pareto, realiza-se a avaliação da tabela de ANOVA apresentada na Tabela 4.

**Tabela 4: Resultados do tratamento estatístico da análise de variância (ANOVA) do planejamento fatorial estatístico do tipo 2<sup>3</sup> com pontos centrais (DCC) para os ensaios de resfriamento de água para as variáveis de estudo e suas interações, sendo: h = altura da torre (m), G = taxa mássica da corrente de ar (kg/m<sup>2</sup> s), L = taxa mássica da corrente de água quente (kg/m<sup>2</sup> s).**

Fonte	Soma Quadrática	Graus de liberdade	Média Quadrática	F <sub>calculado</sub>	p-valor
(1)h (m)(L)	3791,88	1	3791,884	256,1162	0,000089
h (m)(Q)	0,38	1	0,379	0,0256	0,880711
(2)G (kg/m <sup>2</sup> s)(L)	7532,01	1	7532,015	508,7368	0,000023
(3)L (kg/m <sup>2</sup> s)(L)	7695,81	1	7695,811	519,8002	0,000022
1L vs 2L	1195,65	1	1195,654	80,7584	0,000849
1L vs 3L	2371,12	1	2371,123	160,1534	0,000224
2L vs 3L	3049,75	1	3049,753	205,9902	0,000137
Falta de ajuste	958,72	1	958,718	64,7550	0,001295
Erro	59,22	4	14,805		
<b>Soma Quadrática total</b>	<b>26654,56</b>	<b>12</b>			
<b>Regressão</b>	<b>25636,6179</b>	<b>7</b>	<b>3662,374</b>	<b>F<sub>cal.</sub></b>	<b>F<sub>Tab.</sub></b>
<b>Resíduos</b>	<b>1017,9396</b>	<b>5</b>	<b>203,588</b>	<b>17,989</b>	<b>4,88</b>
<b>Total</b>	<b>26654,5575</b>	<b>12</b>			
<b>% da máxima variação explicada (R<sup>2</sup><sub>Aj.</sub>)</b>		<b>90,834</b>			
<b>% de máxima variação explicável (R<sup>2</sup>)</b>		<b>96,181</b>			

Fonte: Autor, 2018.

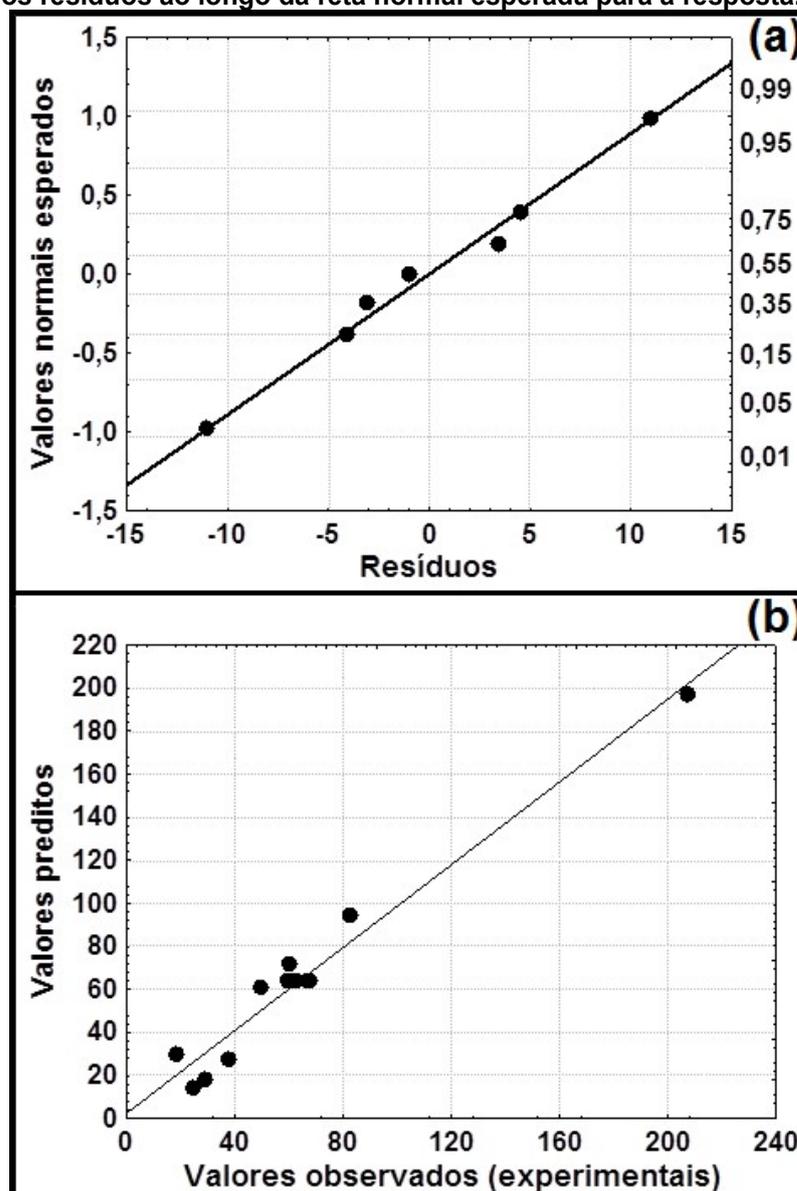
Observa-se na Tabela 4 que os resultados de significância das variáveis de estudo são similares aos resultados apresentados no diagrama de Pareto, nos quais as taxas mássicas das correntes fluidas são as variáveis mais significativas. Os resultados do modelo quadrático para as variáveis de estudos e suas interações são os únicos valores não significativos ao nível de confiança de 95% ( $p < 0,05$ ). Em relação ao desempenho da análise estatística pode-se considerá-la satisfatória, pois o  $f_{\text{calculado}}$  é maior que o  $f_{\text{tabelado}}$  em uma ordem de grandeza de 3,7 vezes. Portanto, pode-se admitir o modelo estatístico apresentado pela Equação 1 para estimar valores da  $E_{\text{torre}}$  na faixa de valores considerada para as variáveis de estudo. Os valores dos coeficientes de correlação (geral e ajustado) apresentam valores superiores a 90%, no qual o  $R^2$  é acima de 95%.

$$\%E_{\text{torre}} = 63,673 + 21,771 \times h + 30,689 \times G - 31,016 \times L + 12,225 \times h \times G - 17,216 \times h \times L - 19,525 \times G \times L \quad (\text{eq. 1})$$

onde: h = altura da torre (m), G = taxa mássica da corrente de ar (kg/m<sup>2</sup> s), L = taxa mássica da corrente de água quente (kg/m<sup>2</sup> s).

A Figura 9 apresenta os resultados dos diagramas da relação dos valores observados com os preditos pelo modelo (Fig. 9a) e da distribuição normal dos resíduos em torno da reta que indica a normalidade para a resposta em questão (Fig. 9b)

Figura 9. Avaliação da análise estatística para a relação de desempenho de perda de umidade por perda de massa: a) valores experimentais em relação aos valores previstos; b) distribuição dos resíduos ao longo da reta normal esperada para a resposta.



Fonte: Autor, 2018.

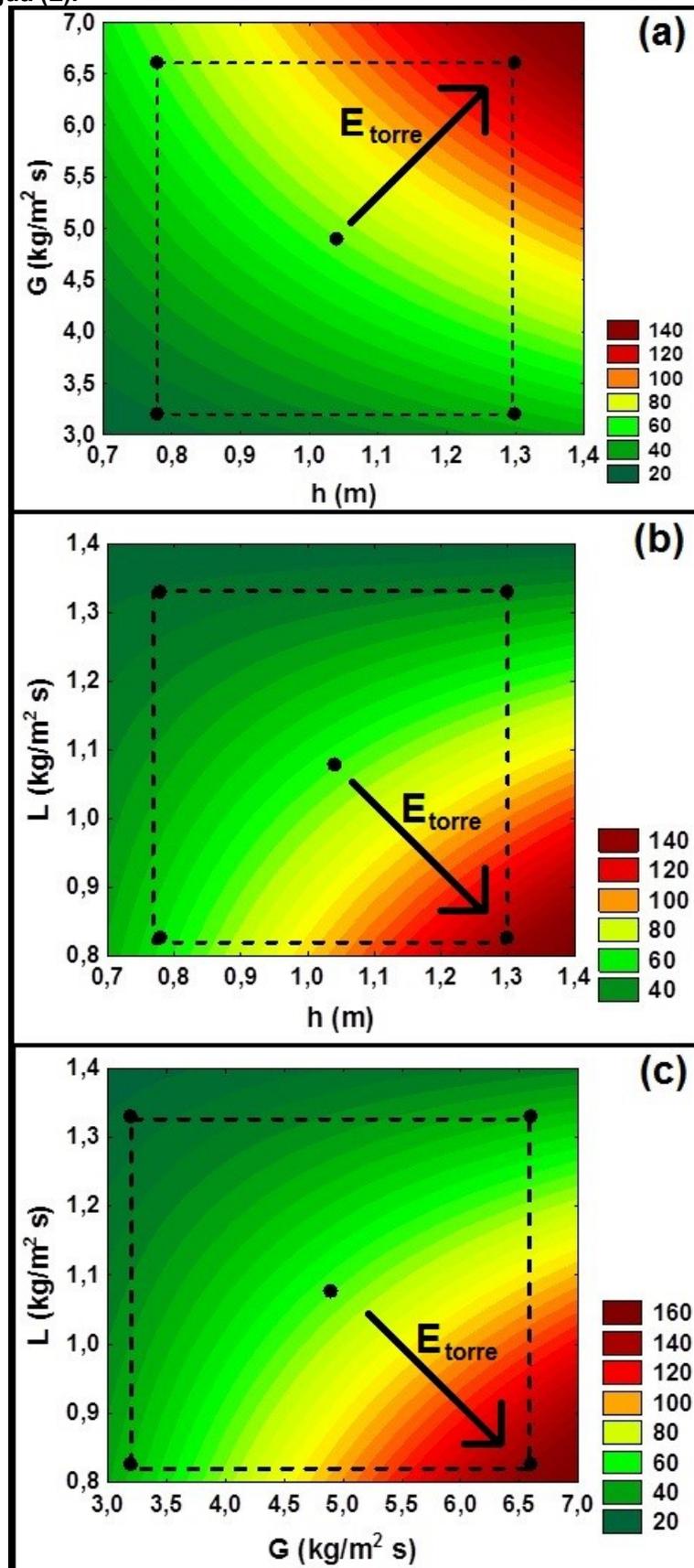
Observa-se na Figura 9a que os pontos apresentados no diagrama dos valores normais esperados em relação aos resíduos se encontram ajustados a reta que indica o comportamento desejável de uma distribuição normal, os quais correspondem aos resultados dos 13 ensaios experimentais realizados conforme o DCC aplicado. O comportamento dos resultados de  $E_{\text{torre}}$  para o diagrama dos valores preditos em relação aos observados apresenta um

comportamento similar desejável, no quais os resultados apresentados pelo modelo matemático estatístico são similares aos obtidos através dos ensaios experimentais para o parâmetro de avaliação da operação adotado ( $E_{\text{torre}}$ ). Isso indica uma significativa qualidade e validade do tratamento estatístico adotado e de seus resultados.

Para avaliar a região de ótimo de operação (faixas de valores altura, taxa de ar e taxa de água) da eficiência através dos parâmetros avaliados que apresentaram modelo estatístico preditivo são utilizadas as curvas de níveis e as superfícies de resposta dos seus tratamentos estatísticos. Os resultados dos diagramas de Pareto para os parâmetros avaliados demonstraram que os modelos lineares apresentam maior significância estatística que os modelos quadráticos. Assim, as curvas de níveis apresentam maior versatilidade de visualização das regiões desejadas para os parâmetros do que as suas superfícies de respostas.

A Figura 10 apresenta as curvas de níveis para os a  $E_{\text{torre}}$  do DCC aplicado. As linhas tracejadas contidas nesses diagramas correspondem aos limites mínimos e máximos das faixas de valores dos fatores de estudo (altura, taxa de ar e de água) utilizados nos ensaios experimentais. Ressalta-se que qualquer extrapolação de resultados além desses limites, ou da região interna aos mesmos, é considerada não confiável e inválida sob ponto de vista de modelagem matemática estatística. Os pontos escuros das extremidades do quadrado tracejado nesses diagramas representam os valores de mínimo e máximo das variáveis de estudo e o ponto central seus valores médios. O aumento da intensidade das cores das curvas dos diagramas representa os valores de mínimo (para a coloração verde) e de máximo (para a região vermelha) para o parâmetro de avaliação ou de resposta do DCC utilizado, a qual é a eficiência da torre.

Figura 10: Curvas de nível do planejamento estatístico  $2^3$  para os ensaios de resfriamento de água para as variáveis: a) altura da coluna (h) e taxa mássica de ar (G); b) altura da coluna (h) e taxa mássica de água (L); c) taxa mássica de ar (G) e taxa mássica de água (L).



Fonte: Autor, 2018.

As regiões de máximos valores para a  $E_{\text{torre}}$  apresentados na Figura 10a e 10b são inversamente proporcionais para as taxas mássicas das correntes fluidas. A maior eficiência é obtida com a maior altura da torre e com taxas mássicas dos fluidos em maiores valores para a corrente de ar e em menores valores para a corrente de água. Esse comportamento é explicitamente demonstrado na Figura 10c, cuja faixa otimizada da  $E_{\text{torre}}$  estão compreendidos nas seguintes faixas de suas respectivas variáveis de estudo, sendo:

- Altura da torre: máximos valores de  $E_{\text{torre}}$  na faixa de 1,0 a 1,3 m.
- Taxa mássica da corrente de ar (G): máximos valores de  $E_{\text{torre}}$  na faixa de 3,2 a 6,6 Kg/(m<sup>2</sup> s).
- Taxa mássica da corrente de água quente (L): máximos valores de  $E_{\text{torre}}$  na faixa de 0,83 a 1,0 Kg/(m<sup>2</sup> s).

## **5.2 Determinação da capacidade de operação da torre na condição operacional otimizada**

A determinação da capacidade de operação da torre é obtida através dos resultados do coeficiente de capacidade do equipamento ( $k_{ya}$ ) e do número de unidades de transferências (NUT) para as faixas otimizadas das variáveis de estudo apresentadas no item anterior. As condições das correntes de fluido e da altura da torre utilizadas para a determinação desses parâmetros foram aquelas empregadas no ensaio 3 da matriz experimental do delineamento estatístico fatorial aplicado (DCC 2<sup>3</sup>), cujo experimento apresenta os melhores valores das variáveis de estudo para o maior valor experimental obtido para a  $E_{\text{torre}}$ . Portanto, foram utilizados os seguintes dados para os cálculos de  $k_{ya}$  e NUT: a) temperatura de bulbo seco e de umidade relativa da corrente de ar iguais a 28 °C e 80%; b) taxas mássicas das correntes de ar e de água quente iguais a 6,6 kg<sub>ar</sub>/(m<sup>2</sup> s) e 3,2 kg<sub>água</sub>/(m<sup>2</sup> s); c) temperatura da corrente de entrada de água quente de 50 °C; d) altura da coluna da torre igual a 1,3 m. Os resultados de  $k_{ya}$  e NUT foram obtidos através de um diagrama da entalpia da corrente de ar em relação a temperatura da corrente de água quente, contendo a curva de equilíbrio ar-vapor d'água e da reta de operação da corrente líquida ( $TL_{\text{entra}}$  e  $TL_{\text{sai}}$ ).

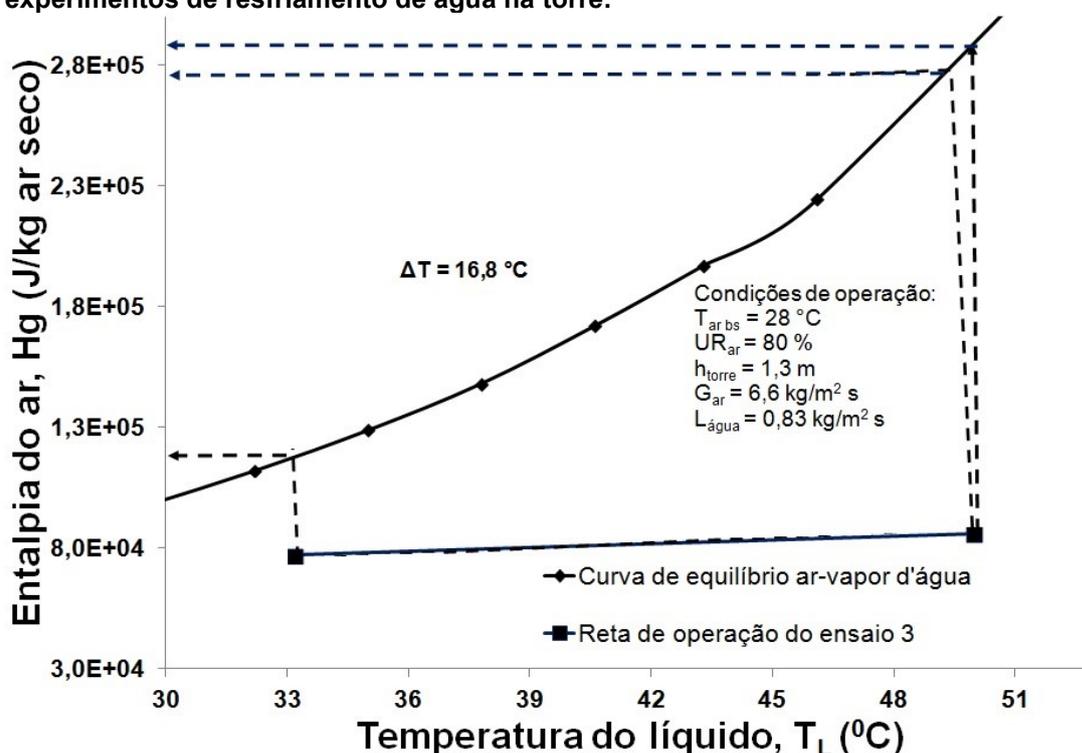
Os resultados desse tratamento físico-matemático estão apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5: Resultados dos cálculos intermediários e finais para a determinação da capacidade de operação da torre de resfriamento de água para as condições operacionais do ensaio 3 na matriz experimental do DCC aplicado.**

Ensaio	Valores
$T_{bs}$ (°C)	28,0
UR (%)	80,0
$U$ (kg <sub>água</sub> / kg <sub>ar seco</sub> )	0,019
$v$ (m/s)	5,8
$G$ (kg/m <sup>2</sup> s)	6,6
G/L	7,99
$T_{Lentrada}$ (°C)	50,0
$T_{Lsaída}$ (°C)	33,2
$H_{gsaída}$ (kJ/kg K)	85793,35
$H_{gentrada}$ (kJ/kg K)	76993,57
$H_{gisaída}$ (kJ/kg K)	280000
$H_{gientrada}$ (kJ/kg K)	117500
$G_{mínimo}$ (kg/m <sup>2</sup> s)	0,162
termo integração	0,13
$h$ (m)	1,30
$Kya$ (kg/m <sup>3</sup> s)	0,67

Fonte: Autor, 2018.

**Figura 11. Diagrama da entalpia do ar e da temperatura da água, contendo a reta de operação e a curva de equilíbrio ar-vapor d'água, para o ensaio 3 do DCC aplicado aos experimentos de resfriamento de água na torre.**



Fonte: Autor, 2018.

Os resultados da Tabela 5 demonstram que as condições operacionais utilizadas no ensaio 3, a qual representa a melhor condição para as faixas otimizadas das variáveis de estudo obtida pelo DCC, apresentam elevados valores para as entalpias da corrente gasosa e da interface de equilíbrio ar-vapor d'água e do coeficiente de capacidade da torre. Leal (2016) cita que valores  $k_y a$  acima de  $0,5 \text{ kg/m}^3 \text{ s}$  para condições similares de operação nesse equipamento representam uma desejável capacidade de operação e indicam uma elevada eficiência da torre. As informações detalhadas de todos os parâmetros envolvidos na determinação do coeficiente de capacidade do equipamento estão apresentadas no Quadro A2 em Apêndice A.

## 6. CONCLUSÃO

Os ensaios de resfriamento de água realizados na torre experimental, segundo o delineamento fatorial estatístico do  $2^3$  com pontos centrais (DCC), demonstram que para as variáveis de estudo a faixa ótima de operação para se obter a maior eficiência do equipamento ocorre com os intervalos de valores das taxas mássicas de ar e de água de 3,2 a 6,6  $\text{kg}_{\text{ar}}/(\text{m}^2 \text{ s})$ , 0,83 a 1,0  $\text{kg}_{\text{água}}/(\text{m}^2 \text{ s})$  e 1,0 a 1,3.

O maior valor de eficiência foi obtido no ensaio 3 (três) do DCC aplicado, cujas condições de operação das variáveis de estudos são referentes aos máximos valores da taxa mássica de ar e da altura da coluna e mínima taxa mássica de água quente.

A maioria dos resultados das diferenças de temperatura de entrada e saída da corrente de água quente dos ensaios realizados se apresentam próximos ou maiores que  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

As taxas mássicas das correntes fluidas são as variáveis mais significativas estatisticamente para o aumento da eficiência da torre.

O coeficiente de capacidade da torre, o qual representa o coeficiente de transferência de massa da operação, obteve um valor desejável e coerente com o resultado da sua eficiência da torre para uma condição operacional na faixa otimizada de resfriamento de água encontrada.

## 7. REFERÊNCIAS

- ASHRAE, HVAC. **Fundamentals handbook**. 2005.
- BARROS NETO, B.; SCARMÍNIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Planejamento e Otimização de Experimentos**, Campinas-SP, Editora da UNICAMP, 2003.
- BRITTO, F. B. **Considerações sobre psicrometria**. Sociedade Brasileira de Controle de Contaminação – SBCC, 2010.
- CORTINOVIS, G. F.; SONG, T. W. **Funcionamento de Uma Torre de Resfriamento de Água**. São Paulo, 2005. Disponível em: <http://www.hottopos.com/regeq14/giorgia.pdf>. Acesso em: 10 de maio de 2018.
- COSTA, J. A. P. **Utilização de materiais alternativos como enchimento de torres de resfriamento**. Universidade Federal de Pernambuco, UFPE. Recife, 2006.
- ELONKA, S. M., MINICH, Q. W., 1978. **Manual de Refrigeração e ar condicionado**, editora Mc Graw-Hill, São Paulo.
- FOUST, A.S.; WENZEL, L.A.; CLUMP, C.W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L.B., **Princípios das Operações Unitárias**, 2 ed. Editora LTC, 2012.
- GEANKOPLIS, C.J. **Transport processes and separation process principles: (includes unit operations)**, 4a edition, Prentice Hall P T R, Englewood Cliffs, New Jersey, 2011.
- GOMIDE, R. **Operações Unitárias volume IV: operações de transferência de massa**, edição do autor, 1988.
- IBRAHIM, G. A.; NABHAM, M B.W; ANABTAWI, M. Z. An investigation into a falling film type cooling tower. *International Journal of Refrigeration*, Surrey, v. 18, n. 48, p. 557-564, 1995.
- LEAL, A. L. **Coluna de resfriamento de água e umidificação de ar: projeto e construção de equipamento e execução de ensaios experimentais para aulas práticas de engenharia no laboratório de engenharia de alimentos (LEA)**. João Pessoa, 2016, 57 p. Relatório técnico da disciplina de Estágio Curricular Supervisionado (graduação em Engenharia de Alimentos). Departamento de Engenharia de Alimentos, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba.
- MANCUSO, P. C. S. **Reúso de água para torres de resfriamento**. São Paulo, 2001.
- OLIVEIRA, A. C. C. T. **Análise da utilização de gargalos e fios de garrafa pet como enchimento para torres de resfriamento**. 2009. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

OLIVEIRA, A. S. **Coluna de resfriamento de água e umidificação de ar:** Calibração do equipamento e Elaboração do seu Procedimento Operacional Padrão. Relatório de estágio supervisionado. Universidade Federal da Paraíba – UFPB, João Pessoa, 2017.

OMNI. **Omni cooling towers** (on line). 2016. Disponível em:

< <http://www.omnicoolingtowers.com> > .Acesso em: 12 de maio de 2018.

PEREZ, S. A. N. **Torre de Resfriamento.** Apostila do Curso de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 1998.

PIRANI, M. J., VENTURINI, O. S., 2004. **Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial**, PROCEL, Eletrobrás – Brasil.

RODRIGUES, M.S.; IEMMA, A.F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**, Casa do Pão Editora, Campinas-SP, 2005. 326 p.

SAMPAIO, F. S. **Torre de resfriamento: modelagem, simulação e testes experimentais para apoio ao ensino de engenharia mecânica.** Dissertação (graduação em Engenharia Mecânica). Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

SCIENZA, L. **Operações Unitárias III.** Apostila do Curso de Operações Unitárias III, UFRN, 2010.

WAKI, R. **Montagem e avaliação de uma torre de resfriamento para uso em atividades de ensino de graduação** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) UNICAMP, Campinas – São Paulo, 2009.

## Apêndice A

Quadro A1: Resultados dos ensaios experimentais do planejamento estatístico  $2^3$  com pontos centrais (DCC) das variáveis altura da torre, taxa mássica de ar e taxa mássica de água para a eficiência da torre ( $\%E_{\text{torre}}$ ).

Ensaio	Altura torre, h (m)	Taxa de ar, G (kg/m <sup>2</sup> s)	Taxa de água, L (kg/m <sup>2</sup> s)	TL <sub>sai</sub> (°C)	delta T	E <sub>torre</sub> (%)
1	1,3	3,2	1,33	45,0	5,0	25,13
2	1,30	3,20	0,83	40,6	9,4	60,65
3	1,30	6,60	0,83	33,2	16,8	207,41
4	1,3	6,6	1,33	41,7	8,3	50,00
5	0,78	6,6	1,33	43,1	6,9	38,33
6	0,78	3,2	1,33	46,1	3,9	18,57
7	0,78	6,6	0,83	38,7	11,3	83,09
8	0,78	3,20	0,83	44,4	5,6	29,02
9	1,04	4,9	1,08	39,9	10,1	68,24
10	1,04	4,9	1,08	40,4	9,6	62,75
11	1,04	4,9	1,08	40,0	10,0	67,11
12	1,04	4,9	1,08	40,6	9,4	60,65
13	1,04	4,9	1,08	40,7	9,3	59,62

Quadro A2: Resultados dos ensaios experimentais do planejamento estatístico  $2^3$  com pontos centrais (DCC) das variáveis altura da torre, taxa mássica de ar e taxa mássica de água para a eficiência da torre ( $\%E_{\text{torre}}$ ).

Variáveis/Ensaio	Resultados do ensaio 3
T <sub>bs</sub> (°C)	28,0
UR	0,80
U (kg <sub>água</sub> / kg <sub>ar seco</sub> )	0,019
v (m <sup>3</sup> /kg)	0,879
v (m/s)	5,8
G (kg/m <sup>2</sup> s)	6,6
G/L	7,99
G <sub>min.</sub>	0,162
TL <sub>entra</sub> (°C)	50
TL <sub>sai</sub> (°C)	33,2
Hg <sub>saída</sub>	85793,35
Hg <sub>entra</sub>	76993,57
Hg <sub>saída</sub> (lido)	280000
Hg <sub>entra</sub> (lido)	117500
Termo Integração	0,13
k <sub>ya</sub> (kg/m <sup>3</sup> s)	0,67
T <sub>ar, bulbo úmido</sub> (°C)	26,4
E <sub>torre</sub> (%)	207,4