

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL – CAMPUS FELIZ

RAFAEL SGANDERLA

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM PROTÓTIPO DE
TORRE DE RESFRIAMENTO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de
bacharelado em Engenharia Química.

Orientador: Dr. Matheus Felipe Pedrotti

FELIZ

2022

RAFAEL SGANDERLA

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM PROTÓTIPO DE
TORRE DE RESFRIAMENTO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de bacharelado em Engenharia Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Flávia Dagostim Minatto

Prof.^a Nicéia Chies da Fré

ORIENTADOR

Prof. Matheus Felipe Pedrotti

Feliz, 12 de julho de 2022.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS), pela oportunidade da realização deste trabalho.

Aos docentes do curso de Bacharelado em Engenharia Química pelos ensinamentos, que me fizeram evoluir no processo de formação profissional.

Ao Prof. Dr. Matheus Felipe Pedrotti, pela orientação, pelos aconselhamentos e ensinamentos.

Aos membros da banca avaliadora, Prof.^a Flávia Dagostim Minatto e Prof.^a Nicéia Chies da Fré.

Ao meu pai, Dari Luis Sganderla, que mesmo não estando mais entre nós, sempre me apoiou e me motivou a ser um ser humano melhor.

À minha mãe, Márcia Helena Royer Sganderla, que continua me apoiando e incentivando todos os dias e sempre compreendeu meus momentos de ausência para a realização deste trabalho.

Aos meus irmãos, Leonardo e Fernando, por estarem junto comigo ao decorrer desta caminhada.

Aos meus colegas do curso, que estiveram sempre presentes compartilhando conhecimentos e pela amizade criada ao longo dos anos.

RESUMO

Torres de resfriamento são equipamentos que objetivam o resfriamento de líquidos, a partir da transferência simultânea de calor e massa, por convecção e evaporação. Na prática, são equipamentos de estrutura relativamente simples, mas com diversas variáveis de processo que, teoricamente, podem ser de difícil compreensão dos discentes. Neste trabalho foi construído um protótipo de torre de resfriamento de tiragem forçada de escala de bancada, para uso didático no IFRS Campus Feliz. O protótipo foi construído a partir de equipamentos já disponíveis no Laboratório de Engenharia Química e possibilita maior compreensão do comportamento de diversos parâmetros desta operação unitária, agregando qualidade à formação dos discentes do curso. Aparatos mais complexos, não disponíveis no laboratório, foram projetados e impressos em uma impressora 3D disponível no Campus Feliz. A construção do protótipo consiste em um tubo de acrílico de 1 m de altura e 40 mm de diâmetro, com entrada de água proveniente de banho termostático e saída de água na base da torre, ambas com auxílio de bombas peristálticas de alimentação e retorno. A entrada de ar ocorre na base da torre com o auxílio de um ventilador centrífugo e a saída de ar no topo. Foram utilizados sensores de temperatura termopar tipo K para a medição de temperatura de bulbo seco e bulbo úmido. Foram avaliadas as influências da variação da vazão de ar, vazão de água, temperatura de alimentação da água e utilização de recheios sobre o processo de resfriamento da água. Os resultados obtidos foram satisfatórios e condizentes com a teoria. Conforme esperado, a eficiência de resfriamento da torre aumentou com o aumento da vazão do ar e diminuiu com o aumento da vazão da água. Em relação ao recheio, observou-se que a eficiência de resfriamento aumenta drasticamente quando o recheio é empregado. Temperaturas de entrada de água maiores também geraram um resfriamento mais eficiente, já que possuem maior quantidade de calor sensível, podendo vaporizar a água com mais facilidade. A maior eficiência obtida gerou um resfriamento de aproximadamente 26 °C operando com temperatura de alimentação da água em 50 °C, velocidade do ar em 2,7 m/s, vazão de água em 86 mL/min e utilização de um recheio do tipo anel de Raschig.

Palavras-chave: Torre de resfriamento. Protótipo didático. Eficiência. Variação de parâmetros. Recheios.

ABSTRACT

Cooling towers are important equipment for cooling liquids from other processes through the simultaneous transfer of heat and mass, by convection and evaporation. In practice, they are equipment with a relatively simple structure, but with several process variables that, theoretically, can be of hard understanding for students. In this paper, the objective is to build a bench scale forced draft cooling tower, for didactic use in IFRS Campus Feliz. The set was built from equipment already available in the chemical engineering laboratory and allows greater understanding of the behavior of several parameters of this unit operation, adding quality to the education of students of the course. More complex devices, not available in the laboratory, were designed and printed on a 3D printer available on Campus Feliz. The prototype construction consists of an acrylic tube 1 m high and 40 mm in diameter, with water inlet from a thermostatic bath and water outlet at the base of the tower, both with the aid of peristaltic feed and return pumps. An air inlet is located at the base of the tower with the aid of a centrifugal fan and the air outlet at the top. K type thermocouple temperature sensors were used to measure dry bulb temperature and wet bulb temperature. The influences of the variation of air flow, water flow, water feed temperature and the usage of packings on the water-cooling process were evaluated. The results obtained were satisfactory and befitting with the theory. As expected, the cooling tower efficiency increased with the increase of the air flow and decreased with the increase of the water flow. Regarding the packings, it was observed that the cooling efficiency increases dramatically when the packing is used. Higher water feed temperatures also generated more efficient cooling, as they have greater sensible heat and can vaporize water more easily. The highest efficiency obtained generated a cooling of approximately 26 °C, operating with water feed temperature at 50 °C, air speed at 2.7 m/s, water flow at 86 mL/min and the use of a random packing of the Raschig ring type.

Keywords: Cooling tower. Didactic prototype. Efficiency. Parameters variation. Packings.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	OBJETIVO GERAL	8
1.1.1	Objetivo Geral	8
1.1.2	Objetivos específicos	8
1.2	JUSTIFICATIVA	8
2	REVISÃO DA LITERATURA	9
2.1	PSICROMETRIA	9
2.1.1	Umidade do ar	9
2.1.1.1	Pressão parcial	9
2.1.1.2	Umidade absoluta	10
2.1.1.3	Umidade relativa	11
2.1.1.4	Ponto de orvalho	11
2.1.1.5	Capacidade calorífica do ar úmido	12
2.1.1.6	Volume úmido	12
2.1.1.7	Entalpia total do ar úmido	13
2.1.1.8	Temperatura de saturação adiabática	13
2.1.1.9	Temperatura de bulbo úmido e de bulbo seco	14
2.1.2	Cartas psicrométricas	18
2.2	TORRES DE RESFRIAMENTO	19
2.2.1	Tipos de torres de resfriamento	19
2.2.1.1	Torres com ventilação atmosférica	19
2.2.1.2	Torre de resfriamento de tiragem natural	21
2.2.1.3	Torre de resfriamento de tiragem mecânica	22
2.2.1.3.1	<i>Tiragem induzida</i>	23
2.2.1.3.2	<i>Tiragem forçada</i>	25
2.2.2	Recheios	26
2.2.2.1	Recheio randômico	27
2.2.2.2	Recheio estruturado	28
2.2.3	Protótipos de torres de resfriamento	29
2.2.4	Dimensionamento de uma torre de resfriamento	30

2.2.4.1	Balanço de energia	30
2.2.4.2	Calor sensível do líquido	32
2.2.4.3	Eficiência da torre de resfriamento	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	MATERIAIS	34
3.2	MÉTODOS	35
3.2.1	Avaliação do efeito da vazão de ar	36
3.2.2	Avaliação do efeito da temperatura de alimentação da água	36
3.2.3	Avaliação do efeito da vazão da água	36
3.2.4	Avaliação do efeito do recheio na torre	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1	CONSTRUÇÃO DA TORRE DE RESFRIAMENTO	38
4.2	AVALIAÇÃO DO EFEITO DA VAZÃO DE AR	42
4.3	AVALIAÇÃO DO EFEITO DA TEMPERATURA DE ALIMENTAÇÃO DA ÁGUA	44
4.4	AVALIAÇÃO DO EFEITO DA VAZÃO DE ÁGUA	44
4.5	AVALIAÇÃO DO EFEITO DO RECHEIO NA TORRE	45
4.6	BALANÇO DE ENERGIA	47
4.7	SUGESTÕES PARA EXPERIMENTOS E MELHORIAS FUTURAS	47
5	CONCLUSÃO	49
	REFERÊNCIAS	50
	ANEXO A – CARTA PSICROMÉTRICA DE CARRIER	51
	APÊNDICE A - DADOS OBTIDOS PARA EXPERIMENTO EM TORRE DE RESFRIAMENTO COM UTILIZAÇÃO DE RECHEIO RANDÔMICO	52
	APÊNDICE B - DADOS OBTIDOS PARA EXPERIMENTO EM TORRE DE RESFRIAMENTO SEM UTILIZAÇÃO DE RECHEIO	53

1 INTRODUÇÃO

Processos de resfriamento são amplamente utilizados em indústrias químicas, nucleares, estações de energia e até em edifícios residenciais ou comerciais com o intuito de remover o calor de um fluido quente (geralmente a água) e reaproveitar o fluido já resfriado em outros processos da indústria. As torres de resfriamento são os equipamentos mais importantes para esse fim e se baseiam no resfriamento mediante a transferência simultânea de calor e massa, por convecção e evaporação (WANG; PEREIRA; HUNG, 2004).

Esse processo é de grande importância econômica e ambiental, uma vez que, além de gerar uma redução de custos pelo reuso da água no processo, tem grande impacto ambiental no que se refere à iminente crise hídrica e à poluição térmica (GOMIDE, 2005). Consequentemente, a utilização de torres de resfriamento de forma eficiente é vital para solucionar estes problemas. Por exemplo, ao resfriar a água do processo para temperaturas mais baixas, é possível condensar maior quantidade de produto, reduzindo consumos de energia de sistemas de refrigeração/ar condicionado, gerando assim uma considerável redução de custos nas plantas energéticas (CHEREMISINOFF, 1981).

A construção de um protótipo didático, em âmbito acadêmico, possibilita uma visualização mais clara do funcionamento de uma torre de resfriamento, além da possibilidade de verificar a influência de diversas variáveis dentro do processo, aplicando de forma prática a teoria previamente estudada e contribuindo para a qualidade da formação dos discentes. Deste modo, este trabalho teve como objetivo construir e avaliar o desempenho de um protótipo de uma torre de resfriamento de água, utilizada para fins didáticos ou em atividades de pesquisa no campus da instituição.

1.1 OBJETIVO GERAL

1.1.1 Objetivo Geral

Construir e avaliar o desempenho de um protótipo de torre de resfriamento, de pequeno porte, para experimentos em âmbito acadêmico, que possibilitem a variação de diversos parâmetros operacionais do equipamento.

1.1.2 Objetivos específicos

- Construir uma torre de resfriamento em escala de bancada e de baixo custo, utilizando materiais presentes no laboratório de engenharia química;
- Avaliar a eficiência da torre a partir do uso de diferentes condições operacionais de temperatura, vazão e utilização de recheios;
- Comparar resultados obtidos experimentalmente com os cálculos teóricos.

1.2 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento de um protótipo de torre de resfriamento para uso em experimentos didáticos na instituição, possibilita a visualização da operação unitária pelos discentes, agregando qualidade à formação dos mesmos. Além disso, o equipamento possibilita a alteração de diversos parâmetros do processo, para avaliar seus respectivos impactos na eficiência do equipamento e comparar os resultados obtidos com os da literatura. É importante frisar que o uso deste tipo de equipamento tem como objetivo evitar a poluição térmica causada pelo descarte de fluidos quentes no ambiente e o desperdício de água em processos de resfriamento, instigando os discentes a desenvolver projetos com intuito de melhorias sociais e ambientais, além das financeiras.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Para compreender o princípio de funcionamento das torres de resfriamento e os parâmetros que podem influenciar na operação unitária, é necessário conhecer as propriedades psicrométricas do ar e as estruturas envolvidas na construção do equipamento.

2.1 PSICROMETRIA

A psicrometria é o estudo das propriedades termodinâmicas de misturas ar-vapor d'água. Engloba conceitos como pressão parcial, temperatura de bulbo úmido e bulbo seco, umidade absoluta e relativa, entalpia do ar úmido, capacidade calorífica do ar úmido, volume úmido, temperatura de saturação adiabática e ponto de orvalho. As principais variáveis e equações psicrométricas, obtidas a partir de Geankoplis (2018), Gomide (2005) e McCabe, Smith e Harriot (1993) são apresentados a seguir.

2.1.1 Umidade do ar

2.1.1.1 Pressão parcial

De acordo com a Lei de Dalton, a pressão parcial (p_i) corresponde à pressão que é exercida por um gás, caso estivesse isolado em um recipiente, com a mesma quantidade de mols que possui na mistura. Ou seja, cada composto da mistura exerce uma pressão própria, que independe dos outros componentes da mistura. A pressão total é a soma de todas as pressões parciais exercidas em um mesmo ambiente (GEANKOPLIS, 2018). O conceito de pressão parcial é utilizado para gases ideais, entretanto o comportamento do ar nas condições normais de temperatura e pressão pode ser considerado semelhante ao dos gases ideais. A Equação 1 apresenta o cálculo da pressão parcial.

$$p_i = \frac{n_i P}{n} \quad (1)$$

Em que:

p_i – pressão parcial do componente i na mistura, [kPa].

n_i – número de mols do componente i na mistura, [g/mol].

P – pressão total da mistura, [kPa].

n – número total de mols na mistura, [g/mol].

2.1.1.2 Umidade absoluta

A umidade absoluta de uma mistura ar-água, representada por W , pode ser definida como a massa de vapor da água contida em 1 kg de ar seco (GEANKOPLIS, 2018). A umidade absoluta é calculada através da Equação 2.

$$W = \frac{18}{29} \frac{p_{H_2O}}{(P - p_{H_2O})} \quad (2)$$

Em que:

W - umidade absoluta, [kg água/kg ar seco].

p_{H_2O} - pressão parcial do vapor de água, [kPa].

P - pressão total, [kPa].

A umidade de saturação W_s pode ser expressa substituindo a pressão da água pela pressão de saturação da água, já que o ar saturado é obtido quando o vapor da água está em equilíbrio com a água líquida nas condições de temperatura e pressão, conforme apresentado na Equação 3. A umidade de saturação representa a maior quantidade de vapor de água que pode ser dissolvida por 1 kg de ar seco em uma determinada temperatura e pressão (GEANKOPLIS, 2018).

$$W_S = \frac{18}{29} \frac{p_{H_2O_{sat}}}{(P - p_{H_2O_{sat}})} \quad (3)$$

Em que:

W_s - umidade de saturação, [kg água/kg ar seco]

$p_{H_2O_{sat}}$ - pressão de vapor de saturação da água em dada temperatura, [kPa].

P - pressão total, [kPa].

2.1.1.3 Umidade relativa

A umidade relativa W_R [%] é calculada a partir das pressões parciais e corresponde à quantidade de saturação da mistura ar/água, conforme a Equação 4. Quando o ar está saturado de umidade, a umidade relativa corresponde a 100% (MCCABE; SMITH; HARRIOT, 1993).

$$W_R = 100 \frac{p_{H_2O}}{p_{H_2O_{sat}}} \quad (4)$$

2.1.1.4 Ponto de orvalho

O ponto de orvalho corresponde à temperatura na qual uma determinada mistura ar/vapor de água é resfriada e atinge a saturação e condensa, formando a primeira gota de orvalho, ou seja, a 100% de umidade relativa. Neste momento, a temperatura do ar se iguala ao ponto de orvalho (GEANKOPLIS, 2018). Esse ponto pode ser determinado através de uma carta psicrométrica, que será apresentada no decorrer do trabalho.

2.1.1.5 Capacidade calorífica do ar úmido

A capacidade calorífica do ar úmido (c_s) representa a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de 1 kg de ar seco mais o vapor da água presente em 1 K ou 1 °C. As capacidades caloríficas da água e do ar podem ser consideradas constantes dentro da faixa de temperatura geralmente empregada, sendo $c_{ar\ seco} = 1,005$ [kJ/kg] e $c_{H_2O} = 1,88$ [kJ/kg] (GEANKOPLIS, 2018). A partir destes dados, a capacidade calorífica do ar úmido é expressa pela Equação 5.

$$c_s = 1,005 + 1,88 \cdot W \quad (5)$$

Em que:

c_s - capacidade calorífica do ar úmido, [kJ/kg·K].

W - umidade absoluta, [kg água/kg ar seco].

2.1.1.6 Volume úmido

O volume úmido (v_w) é a soma do volume de 1 kg de ar seco e do volume de vapor da água presente, à pressão atmosférica (MCCABE; SMITH; HARRIOT, 1993). É expresso conforme a Equação 6.

$$v_w = \frac{RT}{P} \left(\frac{1}{MM_{ar\ seco}} + \frac{W}{MM_{H_2O}} \right) \quad (6)$$

Em que:

v_w - Volume úmido, [m³/kg ar seco].

$MM_{ar\ seco}$ – Massa molar média do ar seco, [kg/mol].

MM_{H_2O} – Massa molar da água, [kg/mol].

R – constante universal dos gases perfeitos, [m³·Pa/K·mol]

T – temperatura, [K].

P – pressão, [Pa].

2.1.1.7 Entalpia total do ar úmido

Corresponde à soma das entalpias de 1 kg de ar seco e do vapor d'água contido na mistura (GEANKOPLIS, 2018), sendo expressa pela Equação 7.

$$H = c_s(T - T_R) + W\lambda_R \quad (7)$$

Em que:

T_R - temperatura de referência (geralmente 0 °C), [K].

λ_R - calor latente de vaporização do vapor na temperatura de referência, [kJ/kg].

H - entalpia total do ar úmido [kJ/kg·K].

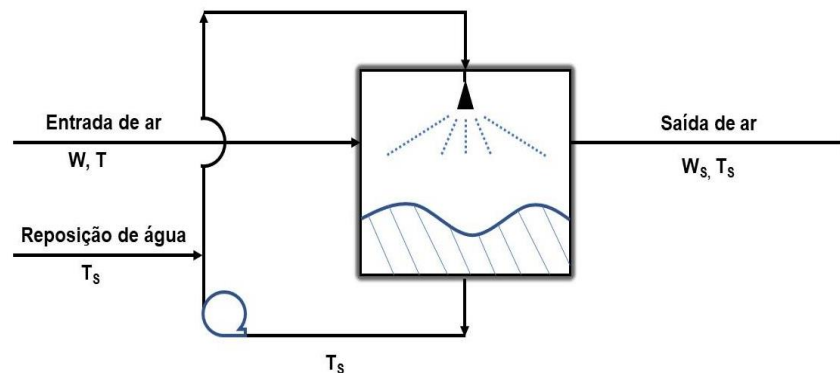
É possível simplificar a Equação 7 para resultar na Equação 8.

$$H = (1,005 + 1,88 \cdot W)T + 2501,4 \cdot W \quad (8)$$

2.1.1.8 Temperatura de saturação adiabática

Em um processo de saturação adiabática, a água é pulverizada contra uma corrente de ar em um saturador adiabático, conforme apresentado na Figura 1. O ar, com uma umidade inicial W e uma temperatura T , é resfriado e umidificado, através da força motriz exercida pela diferença de pressão de vapor do líquido e a pressão parcial de umidade no ar, que não está saturado (MCCABE, SMITH, HARRIOT, 1995). Caso a água e o ar se mantenham em contato por tempo suficiente para entrarem em equilíbrio, a temperatura atingida pela água e pelo ar é chamada de temperatura de saturação adiabática, T_s . Caso o ar que entra no saturador não esteja saturado, a T_s deve ser menor que T .

Figura 1 - Saturador adiabático.



Fonte: Adaptado de Geankoplis (2018).

Se uma mistura permanecer em contato por tempo suficiente, ela sairá do saturador adiabático em T_{s1} e W_{s1} . É possível realizar um balanço de entalpia no processo, utilizando T_s como temperatura de referência e, após deduções, obter a Equação 9, que resulta na linha de saturação adiabática. Essa linha pode ser utilizada em cartas psicrométricas para obter os valores de T_{s1} e W_{s1} de uma mistura saturada, seguindo a linha de saturação adiabática do ponto T_1H_1 até a intersecção com a linha de 100% de saturação (GEANKOPLIS, 2018).

$$W = W_s - \frac{c_s}{\lambda_s} (T - T_s) \quad (9)$$

Em que:

W_s – umidade de saturação, [kg água/kg ar seco].

c_s – capacidade calorífica do ar úmido, [kJ/kg·K].

λ_s – entalpia de vaporização na temperatura de saturação adiabática, [kJ/kg].

T_s – temperatura de saturação adiabática, [K].

2.1.1.9 Temperatura de bulbo úmido e de bulbo seco

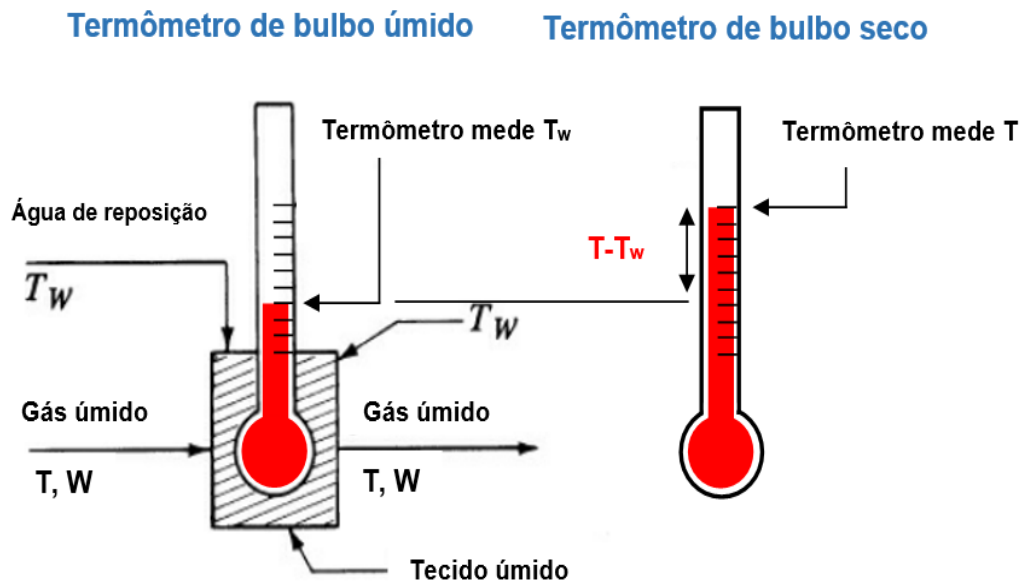
As temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco são propriedades essenciais e com influência direta nos cálculos realizados com torres de resfriamento, importantes

para a compreensão das taxas de transferência de calor e massa no equilíbrio das fases (MCCABE; SMITH; HARRIOT, 1993).

A temperatura de bulbo seco T é considerada a temperatura real medida por um termômetro em contato com a fase gasosa, no caso, o ar úmido. A temperatura de bulbo úmido T_w é a temperatura em estado estacionário, que não está em equilíbrio, alcançada quando uma pequena quantidade de água, sob condições adiabáticas, é atingida por uma corrente contínua de ar, que faz com que esta evapore. A quantidade de água evaporada é tão pequena em comparação com o gás que as alterações das propriedades do ar podem ser negligenciadas (MCCABE; SMITH; HARRIOT, 1993). Essa temperatura, em teoria, é a menor temperatura que a água pode atingir por umidificação adiabática do ar (CHEREMISINOFF, 1981).

A Figura 2 representa o método utilizado para medir a temperatura de bulbo úmido. Um termômetro é coberto por um tecido, que é mantido úmido de água e imerso em uma corrente de mistura ar/vapor d'água, que possuem temperatura de bulbo seco T e umidade W . Considerando que o ar não esteja saturado, a água presente no bulbo úmido evapora para o ar, cedendo calor latente, conseqüentemente, fazendo com que a temperatura do termômetro diminua até T_w . Conforme a água resfria abaixo da temperatura do ar, o calor sensível é transferido do ar para o líquido para manter a taxa de evaporação constante (GEANKOPLIS, 2018).

Figura 2 - Termômetros de bulbo úmido e bulbo seco.



Fonte: Adaptado de Geankoplis (2018).

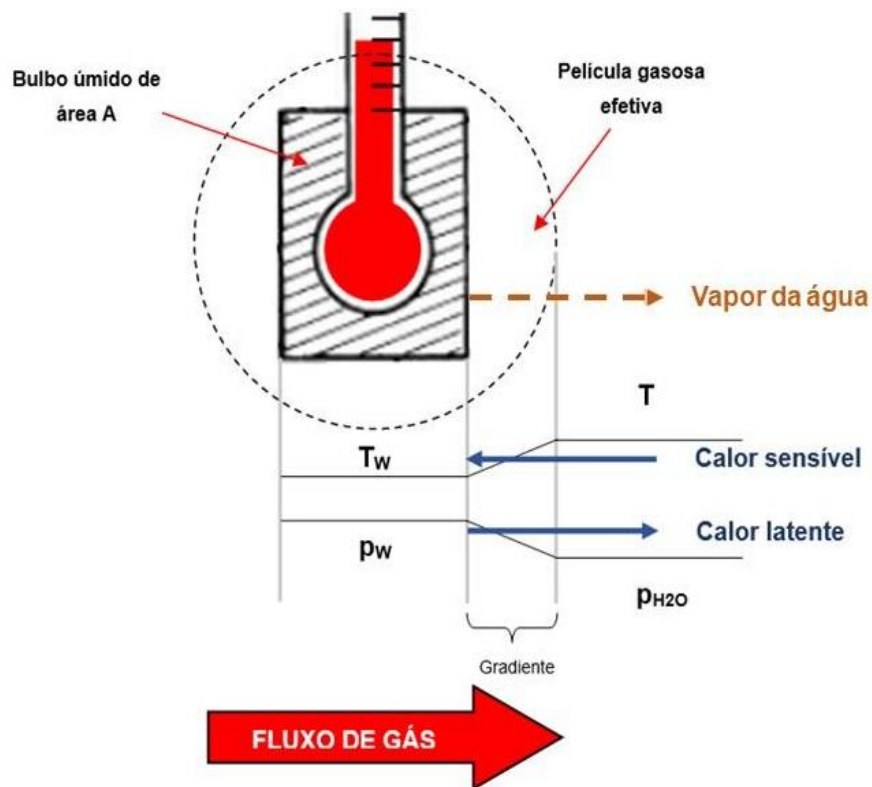
De acordo com McCabe, Smith e Harriot (1993), para que a T_w seja medida com precisão, são necessárias algumas considerações:

- O tecido do bulbo úmido deve estar completamente úmido, para que não haja áreas secas em contato com o ar;
- A velocidade do ar deve ser alta o suficiente para garantir que a taxa de transferência de calor por radiação das redondezas para o bulbo seja negligenciável em comparação com a taxa de transferência de calor sensível da condução e convecção do gás para o bulbo.
- A reposição da água fornecida ao bulbo deve ter temperatura constante T_w .

O princípio envolvido nesse método pode ser melhor compreendido na Figura 3. O calor transferido do ambiente por convecção, na temperatura T e com coeficiente convectivo h_G , para o bulbo úmido de área A , que se encontra na temperatura T_w , é suficiente para evaporar o líquido. O vapor gerado é transferido para o ar, a partir da força propulsora gerada pela diferença entre a pressão de vapor p_w da água junto ao bulbo úmido e a pressão parcial p_{H_2O} da umidade no ar. Para quantificar o processo, é utilizado o coeficiente de transferência de massa k_G através da película em torno do

bulbo. Também é possível utilizar um coeficiente de transferência de massa em termos de umidade absoluta, k_w (GEANKOPLIS, 2018).

Figura 3 - Mecanismo do processo de bulbo úmido.



Fonte: Adaptado de Geankoplis (2018).

A Equação 10 representa uma curva denominada linha de bulbo úmido constante em um diagrama de W versus T (GEANKOPLIS, 2018).

$$W = W_w - \frac{h_G}{k_w \lambda_w} (T - T_w) \quad (10)$$

Para misturas ar/vapor d'água, é possível substituir o termo $h_G/k_w \cdot \lambda_w$, que envolve coeficientes de transferência, que são difíceis de estimar, por c_s/λ_w , que só envolve propriedades do sistema, resultando na Equação 11 (GEANKOPLIS, 2018).

$$W = W_w - \frac{c_s}{\lambda_w} (T - T_w) \quad (11)$$

Em que:

h_G – coeficiente de convecção de calor na fase gasosa, [kcal/h·m²·°C].

k_G – coeficiente de transferência de massa na película gasosa, [kg/h·m²·atm].

k_W – coeficiente de película líquida de transferência de massa, [kg/h·m²·ΔW].

p_w – pressão de vapor da água na película, [Pa].

P_{H_2O} – pressão de vapor de água na corrente gasosa, [Pa].

A – área do bulbo úmido, [m²].

λ_w – calor latente de evaporação na temperatura de bulbo úmido, [kJ/kg].

W_w – umidade absoluta de saturação na temperatura de bulbo úmido, [kg água/kg ar seco].

W – umidade absoluta da corrente gasosa, [kg água/kg ar seco].

T_w – temperatura de bulbo úmido, [°C].

T – temperatura de bulbo seco, [°C].

2.1.2 Cartas psicrométricas

Apesar de todas as propriedades psicrométricas poderem ser calculadas de forma analítica, as cartas psicrométricas ou diagramas psicrométricos são métodos gráficos desenvolvidos para demonstrar de forma conveniente as propriedades do ar úmido. As cartas psicrométricas apresentam valores de temperatura de bulbo seco e bulbo úmido, umidade relativa, ponto de orvalho, volume específico, umidade absoluta e entalpia do ar úmido. Obtendo os valores de duas destas propriedades, qualquer outra propriedade da mistura ar-vapor d'água pode ser obtida (CHEREMISINOFF, 1981). No ANEXO A está apresentada uma carta psicrométrica para a mistura ar-vapor d'água para a pressão de 101,325 kPa.

2.2 TORRES DE RESFRIAMENTO

As torres de resfriamento são equipamentos utilizados para resfriamento de líquidos, geralmente provenientes de outros processos, através do processo de resfriamento evaporativo. A razão de seu uso é, acima de tudo, econômica, já que é mais barato resfriar e utilizar a água em circuito fechado do que descartá-la (GOMIDE, 2005).

Em uma torre de resfriamento típica, a água quente é pulverizada no topo de uma torre em contracorrente com o ar não saturado de vapor d'água. Neste processo, parte da água é vaporizada, ocorrendo um decréscimo em sua temperatura, principalmente em função do calor latente consumido pela evaporação da água, que resulta no resfriamento da água líquida. O ar tem sua umidade aumentada pela incorporação do vapor de água, com consequente aumento de temperatura (GEANKOPLIS, 2018).

O ar não saturado de umidade escoar de baixo para cima, entrando em contato com a corrente de água e pode ter seu fluxo induzido ou pela flutuabilidade do ar, princípio encontrado em torres de resfriamento de tiragem natural ou por ação de ventiladores, princípio encontrado em torres de resfriamento de tiragem forçada (GEANKOPLIS, 2018). Para aumentar a eficiência dessas torres, geralmente é utilizado algum tipo de recheio, visando aumentar a área de contato do ar com a água. Teoricamente, a menor temperatura que a água pode atingir é a de temperatura de bulbo úmido do ar de entrada. Na prática, a temperatura da água resfriada ainda será de 2 a 5 °C superior à temperatura de bulbo úmido do ar na base da torre (GOMIDE, 2005).

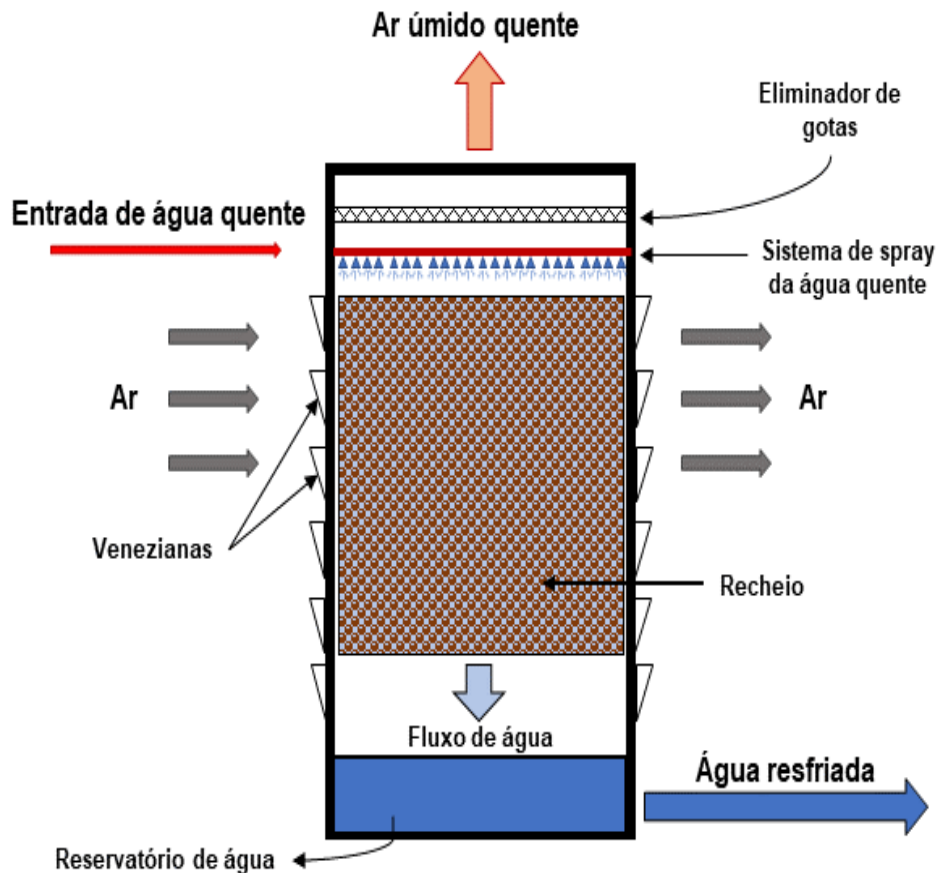
2.2.1 Tipos de torres de resfriamento

2.2.1.1 Torres com ventilação atmosférica

Nesse tipo de torre de resfriamento, o ar cruza o recheio no sentido horizontal sob a ação do vento, enquanto o líquido desce por meio da ação da gravidade,

conforme mostra a Figura 4. São torres de pequeno porte e que operam em fluxo cruzado. Possuem a desvantagem de ter sua eficiência dependente do vento, apesar de sempre possuírem uma aspiração induzida por tiragem (GOMIDE, 2005).

Figura 4 - Torre de resfriamento de ventilação atmosférica.



Fonte: Adaptado de Gomide (2005).

Estas torres operam com vazões na faixa de 2 a 20 m³/h e geralmente são construídas de madeira ou fibrocimento, apesar de poderem ser feitas com outros materiais como tubos metálicos ou PVC. Possuem venezianas laterais para a entrada do ar e a perda de água por arraste situa-se entre 0,5 e 1% (GOMIDE, 2005).

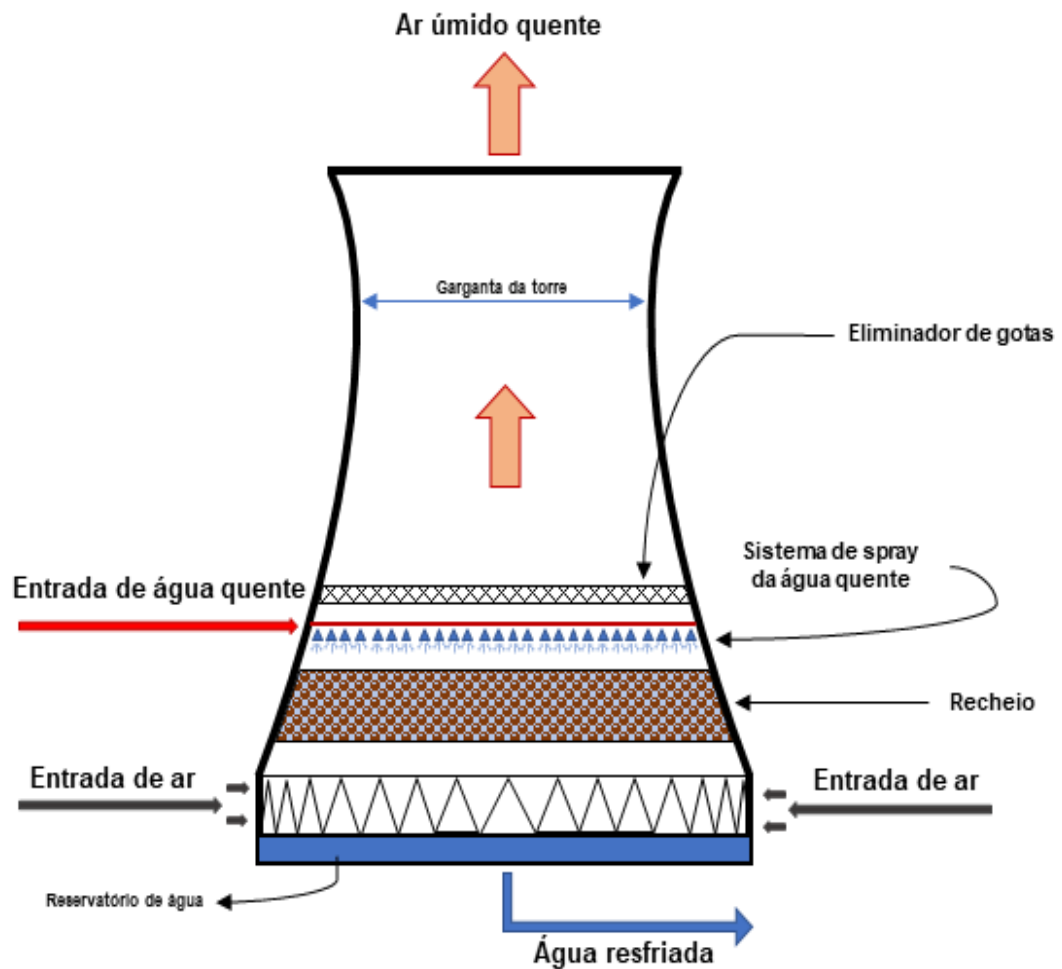
2.2.1.2 Torre de resfriamento de tiragem natural

As torres de resfriamento de tiragem natural se baseiam no princípio da diferença natural de pressão. Possuem a entrada do ar atmosférico na base da torre e tem seu fluxo causado pela diferença de densidade do ar frio, que entra na base da torre, e do ar quente que sai no topo (HILL; PRING; OSBORN, 1990).

Essas torres possuem um formato hiperbólico que aumenta a sustentação aerodinâmica devido à passagem de vento, aumentando a vazão do ar. Para obter um fluxo de ar suficiente para o resfriamento, essas torres tendem a ter estruturas enormes, podendo chegar a 200 m de altura e 150 m de largura (HILL; PRING; OSBORN, 1990). A Figura 5 ilustra o funcionamento deste tipo de torre.

Geralmente, são utilizadas em indústrias de energia, possuindo custos operacionais baixos e capacidades de até 130.000 m³/h. Tem alto custo de instalação e é sensível às variações climáticas. A perda de água por arraste varia entre 0,5 e 1% (GOMIDE, 2005).

Figura 5 - Torre de resfriamento hiperbólica de tiragem natural.



Fonte: Adaptado de Wang, Pereira e Hung (2004) .

2.2.1.3 Torre de resfriamento de tiragem mecânica

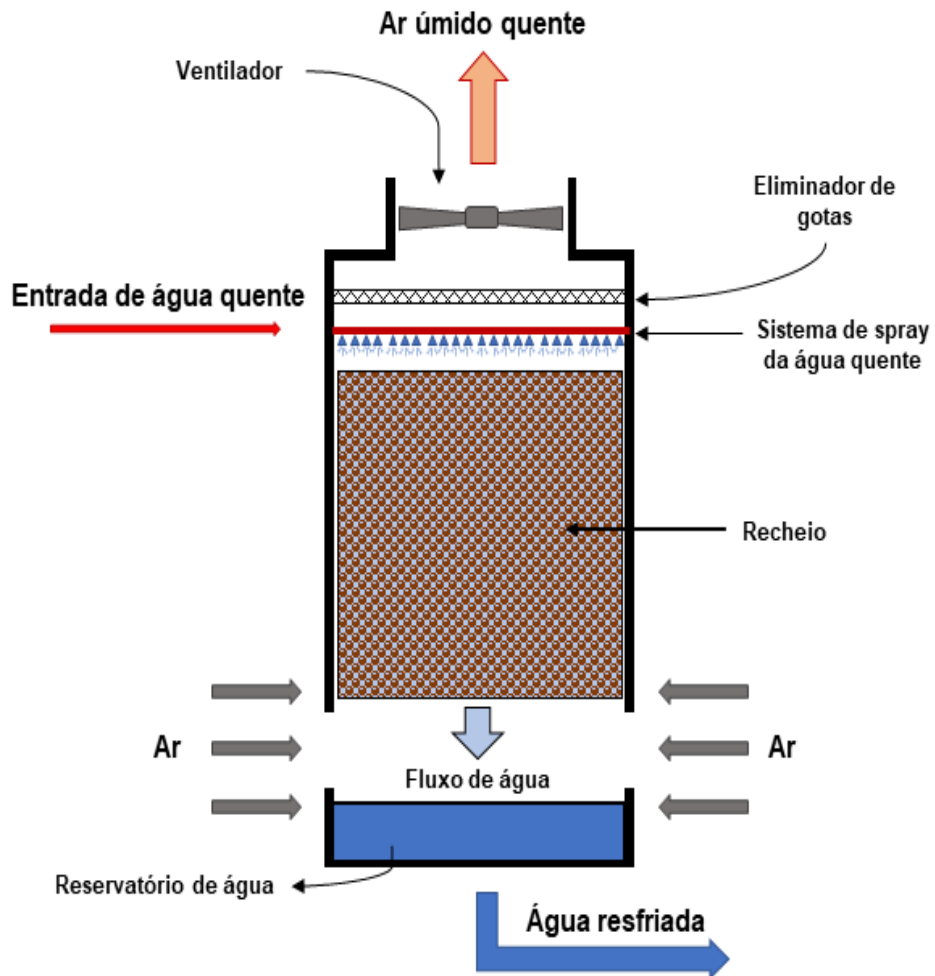
Torres de resfriamento de tiragem mecânica, diferente dos outros tipos apresentados, são equipadas com ventiladores para auxiliar na circulação do ar. Elas podem ser de tiragem induzida ou forçada e podem trabalhar com fluxo cruzado ou em contracorrente. Operam com alto consumo de energia e em função da posição dos ventiladores, apresentam pequenos problemas estruturais e sonoros. Apesar de possuírem o mais alto custo operacional entre as torres, operam com maior estabilidade, além de apresentarem boa eficiência (GOMIDE, 2005).

2.2.1.3.1 Tiragem induzida

Torres de tiragem induzida possuem os ventiladores instalados no topo da torre e operam por meio da exaustão do ar. Necessitam de ventiladores com maior capacidade do que as de tiragem forçada, em função do ar no topo da torre ser mais quente e úmido, mas estão tendo preferência nos últimos tempos. Possuem capacidade na faixa de 3 a 4300 m³/h e a perda por arraste pode variar de 0,1 a 0,3% (GOMIDE, 2005).

As torres que operam em contracorrente tem a entrada do fluido quente pelo topo e a entrada de ar por baixo da torre, entrando em contato com a água e o recheio em sentidos opostos, conforme mostra a Figura 6. São muito eficientes, sendo projetadas para resfriar até 5 °C acima da temperatura de bulbo úmido e permitem que o ar escoe a uma velocidade relativamente alta, prevenindo o refluxo do ar úmido. Além disso, são mais econômicas que as torres de tiragem natural para vazões de água de até 4300 m³/h (HILL; PRING; OSBORN, 1990).

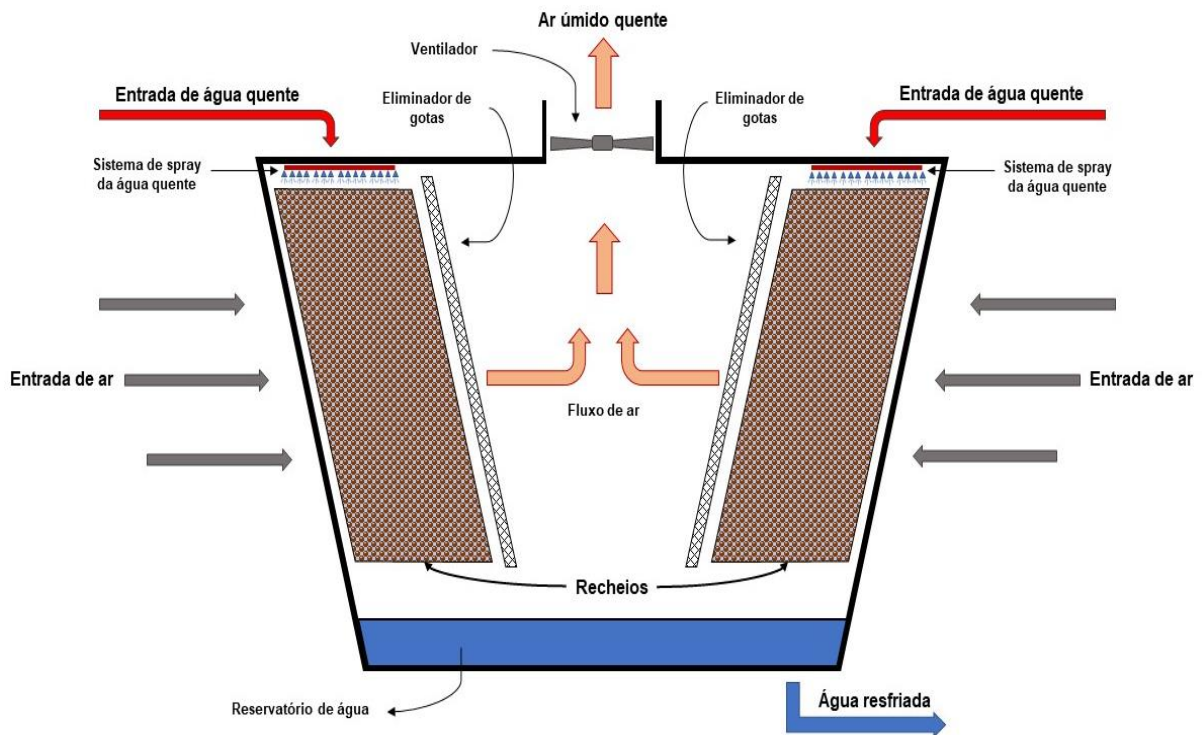
Figura 6 - Torre de resfriamento de tiragem induzida com fluxo em contra corrente.



Fonte: Adaptado de Gomide (2005).

Já as torres que operam com fluxo cruzado, conforme mostra a Figura 7, possuem a entrada de ar nas laterais do equipamento, entrando em contato com a água e com o recheio em um sentido cruzado. Torres de fluxo cruzado tem como vantagens possuir um acesso maior e mais fácil para manutenção do equipamento e distribuição uniforme da água no recheio (HILL; PRING; OSBORN, 1990).

Figura 7 - Torre de resfriamento de tiragem induzida com fluxo cruzado.

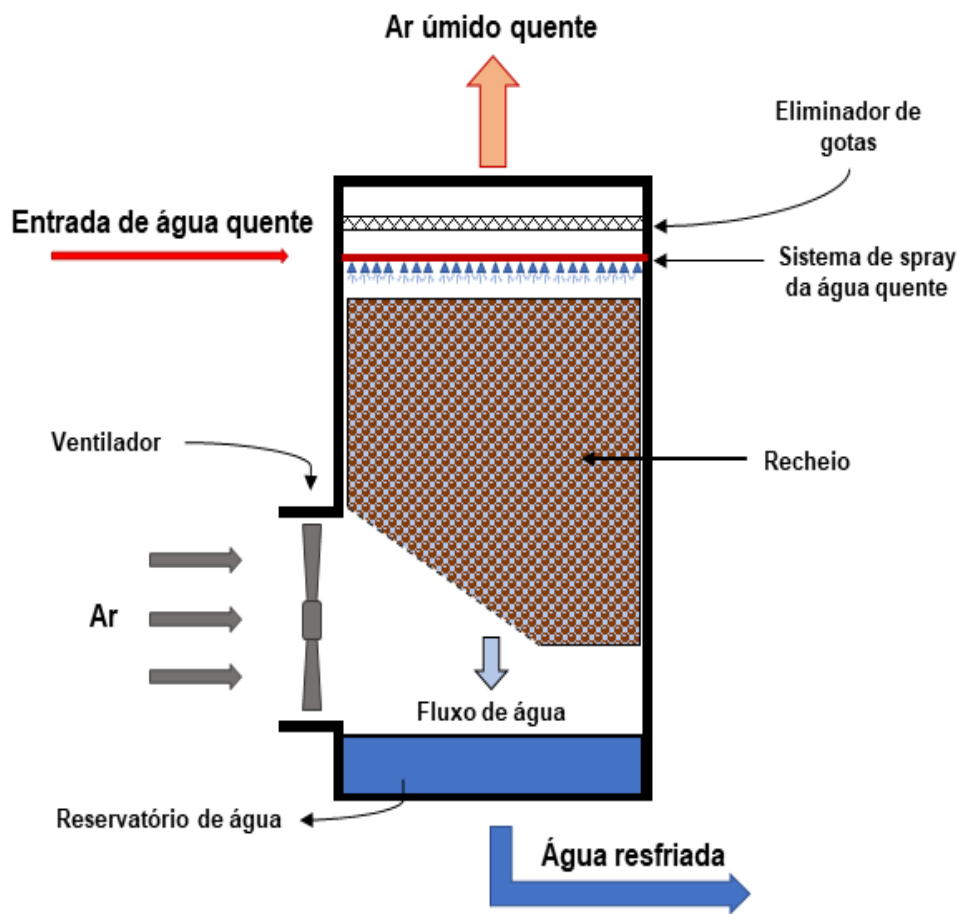


Fonte: Adaptado de Perry, Green e Maloney (1997).

2.2.1.3.2 Tiragem forçada

Esse tipo de torre de resfriamento de tiragem mecânica possui o ventilador alocado na base da torre, conforme mostra a Figura 8. Podem apresentar recirculação de ar devido à zona de baixa pressão que cria em função da alta velocidade de entrada do ar e velocidade reduzida na saída da torre, diminuindo seu desempenho e capacidade. Atualmente, o uso dessas torres está sendo substituído pelas torres de tiragem induzida, que apresentam um consumo de energia menor e entregam o mesmo desempenho (GOMIDE, 2005).

Figura 8 - Torre de resfriamento de tiragem forçada.



Fonte: Adaptado de Gomide (2005).

2.2.2 Recheios

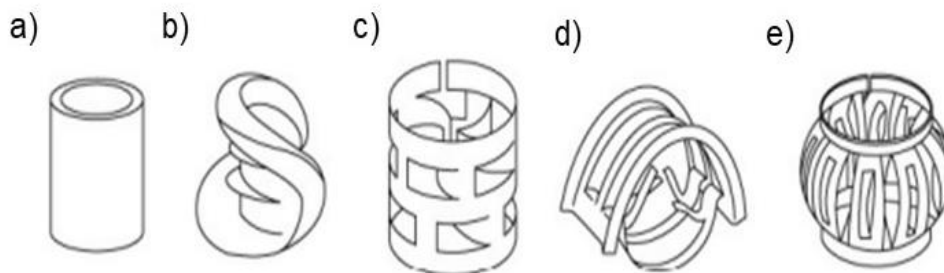
Recheios são estruturas sólidas, inertes, com diversos formatos, que possuem o intuito de aumentar a área de contato entre o líquido e o gás, aumentando a eficiência dos processos de transferência de massa. Para que isso seja possível, o tipo de recheio escolhido deve ser resistente, não deve interagir quimicamente com os fluidos do processo e deve possuir porosidade suficientemente grande para não haver inundações ou causar perdas de carga na torre (MCCABE; SMITH; HARRIOT, 1993).

2.2.2.1 Recheio randômico

Recheios do tipo randômico são pequenas peças avulsas, de mesma geometria e tamanho, distribuídos dentro de uma torre e projetadas com a intenção de maximizar a relação área superficial-volume e minimizar a perda de carga (GEANKOPLIS, 2018).

Os recheios randômicos podem ser produzidos de cerâmica, metal ou plástico, dependendo do processo em que são aplicados (GEANKOPLIS, 2018). A Figura 9 apresenta os recheios randômicos mais conhecidos.

Figura 9 - Típicos recheios do tipo randômico: (a) anéis de Raschig; (b) selas de Berl; (c) anéis de Pall; (d) Intalox de metal, IMTP; (e) Jaeger Metal Tri-Pack.



Fonte: Adaptado de Geankoplis (2018).

Anéis de Raschig e selas de Berl são os tipos mais antigos e raramente utilizados em tempos atuais. Os anéis de Pall são produzidos em metal ou plástico e são muito mais eficientes que seus antecessores, com área de contato variando de 100 a 200 m^2/m^3 . Considerados a segunda geração de recheios randômicos, são utilizados até hoje e possuem porosidade na casa de 90 a 96%. A última geração de recheios randômicos são os Intalox do tipo metal e os Jaeger Metal Tri-Pack e possuem porosidade de 95 a 98%, sendo apenas pouco mais eficientes que os anéis de Pall (GEANKOPLIS, 2018).

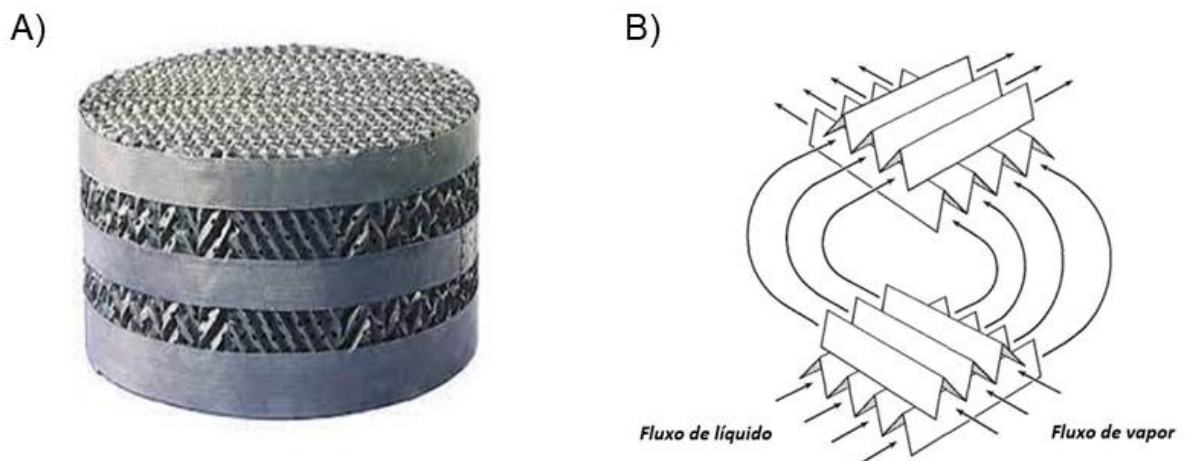
Esse tipo de recheio traz vantagens como aumento da área de contato, transferência de massa e aumento de eficiência do processo, sem trazer grandes custos quando a intenção é aprimorar equipamentos de tecnologia mais antiga (GEANKOPLIS, 2018).

2.2.2.2 Recheio estruturado

Os recheios estruturados são implementados no equipamento quando se faz necessário uma estrutura maior com maior área de contato líquido-gás. Possuem estrutura regular, são produzidos de porcelana, metal ou plástico e podem possuir estrutura interna em diferentes formatos (MCCABE; SMITH; HARRIOT, 1993).

Na década de 1930, os recheios estruturados começaram a evoluir a partir do recheio Stedman, mas não foram muito utilizados industrialmente até o desenvolvimento do recheio Sulzer (Figura 10-A), em 1965. Atualmente, recheios estruturados são produzidos a partir de malhas de metal. Em muitos casos são feitos de chapas de metal onduladas dispostas em camadas, que possuem outras chapas arranjadas de forma adjacente, de forma que o líquido se espalhe sobre a superfície enquanto o vapor flui por meio dos canais formados pelas ondulações, conforme mostra a Figura 10-B. Normalmente, a porosidade apresentada nessas estruturas varia de 91 a 96% e a área de contato específica de 165 a 330 m²/m³ (MCCABE; SMITH; HARRIOT, 1993).

Figura 10 - A) Recheio estruturado tipo gaze Sulzer; B) Representação esquemática de recheio estruturado.



Fonte: A) Retirado do site Sulzer.com; B) Adaptado de McCabe, Smith e Harriot (1993).

2.2.3 Protótipos de torres de resfriamento

É possível encontrar na literatura diversos protótipos de torres de resfriamento. Ferreira (2012) construiu um protótipo de torre de resfriamento de pequena escala para uso didático. O projeto desenvolvido se baseia em uma torre de resfriamento de tiragem induzida de uso industrial. Para medir a vazão de água do equipamento, foi utilizado um balde graduado para captação da água resfriada que retorna para o recipiente de armazenamento de água. O protótipo obteve resfriamento de apenas 1 °C operando com uma vazão de 240 L/h e temperatura de entrada da água a 35 °C. Alterando a temperatura de entrada da água para 45 °C observou-se uma redução de 5 °C na temperatura de saída da água. Utilizando o cálculo de capacidade térmica de torres de resfriamento proposto por Silva (2003), o protótipo foi capaz de resfriar, dentro de uma média realizada por 11 experimentos que variam a temperatura de entrada da água de 35 a 45 °C, 805 kcal/h para a vazão de água informada previamente. A umidade relativa do ar não foi informada.

Rocha *et al.* (2015) desenvolveram um projeto de torre de resfriamento de escala de bancada em sistema aberto para resfriamento de efluentes dos destiladores utilizados em laboratórios. A torre apresentada é composta por 4 estágios, sendo produzidos em calhas de PVC, que servem como distribuidores de água, e vidro estilhaçado sendo utilizado como recheio. Testes iniciais do projeto apresentaram redução de 13 °C em vazões de 72 L/h, com temperatura de entrada do efluente de 58 °C. Foi observado que apenas 60% do recheio estava em contato com o líquido e que em altas vazões o resfriamento foi menor, devido ao menor tempo residência entre o conjunto efluente-recheio. A umidade relativa do ar não foi informada.

KJ *et al.* (2017) projetaram uma torre de resfriamento de tiragem induzida para o resfriamento de água quente proveniente de outros processos realizados no laboratório de conversão de energia. A torre foi construída em uma estrutura de aço e seu suporte, de ferro galvanizado. Como venezianas foram utilizadas 36 ripas de madeira compensada de 0,13 m e fixadas em um ângulo de 60°. A vazão de entrada de ar foi de aproximadamente 0,40 kg/s e foi calculada através da capacidade fornecida do ventilador. Com o auxílio de um fluxômetro, a vazão de entrada da água foi fixada em 10 L/min e os recheios utilizados foram esferas de poliestireno com altura

de recheio de 25 a 30 cm. As temperaturas de entrada e saída da água foram medidas através de sensores de temperatura. Para uma temperatura de entrada da água de 65 °C e temperatura de bulbo úmido de 28 °C, foi obtido resfriamento de 5 °C e eficiência de 14%. Observou-se que a baixa eficiência pode ser justificada pela alta umidade relativa do ar e pela baixa vazão de entrada de ar obtida.

2.2.4 Dimensionamento de uma torre de resfriamento

Os cálculos de balanços de energia e calor sensível do líquido foram obtidos a partir das equações apresentadas por Geankoplis (2018). Para o desenvolvimento destes cálculos, serão utilizadas as variáveis listadas abaixo:

L – vazão mássica de água, [kg/s].

G – vazão mássica de ar seco, [kg/s].

T_{L1} – temperatura de saída da água, [°C].

T_{L2} – temperatura de entrada da água, [°C].

H_1 – entalpia do ar úmido na entrada, [J ou kJ/kg].

H_2 – entalpia do ar úmido na saída, [J ou kJ/kg].

c_L – capacidade calorífica da água, [kJ/kg·°C].

q_{sL} – calor sensível transferido do seio do líquido para a interface, [W ou kW].

h_{La} – coeficiente volumétrico de transferência de calor na fase líquida, [W/m³·°C].

2.2.4.1 Balanço de energia

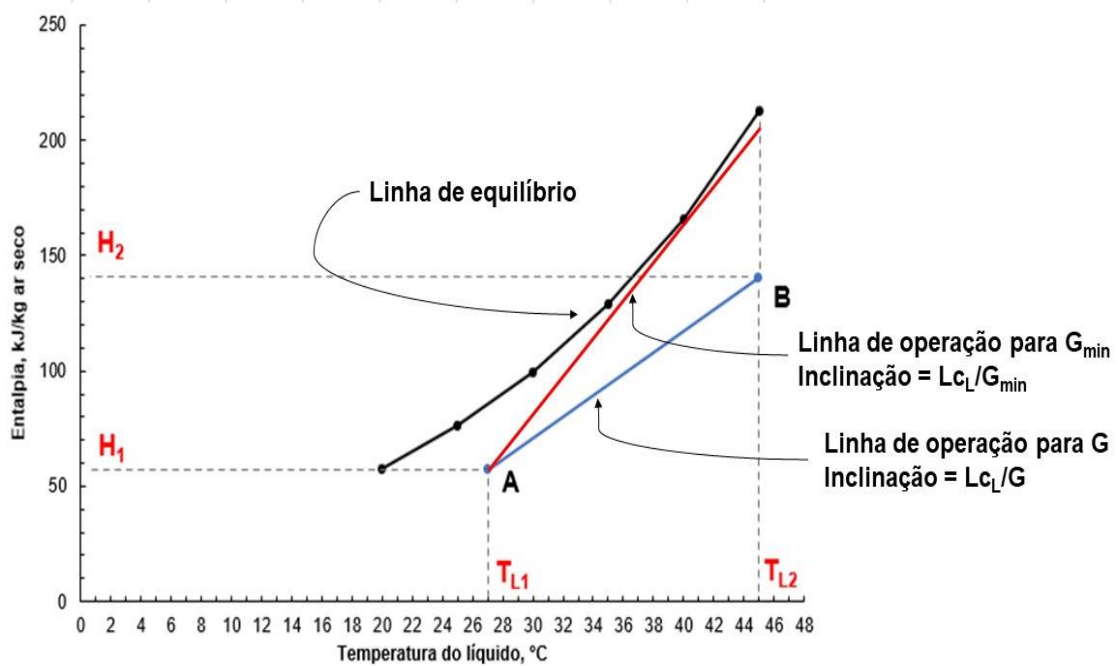
No balanço global de energia do processo, o calor perdido pelo líquido é igual ao calor absorvido pelo gás. Considera-se a variação da vazão de corrente líquida desprezível, logo $L_1 = L_2 = L \approx$ constante (GEANKOPLIS, 2018). O balanço resulta na Equação 12.

$$Lc_L(T_{L1} - T_{L2}) = G(H_2 - H_1) \quad (12)$$

Na parte inferior da coluna, considerando um processo adiabático, chega-se à Equação 13, que em um gráfico de H_{sat} versus T_L , forma uma linha, com inclinação Lc_L/G , chamada de linha de operação, conforme ilustra a Figura 11 (GEANKOPLIS, 2018).

$$(H_2 - H_1) = \frac{Lc_L}{G}(T_{L1} - T_{L2}) \quad (13)$$

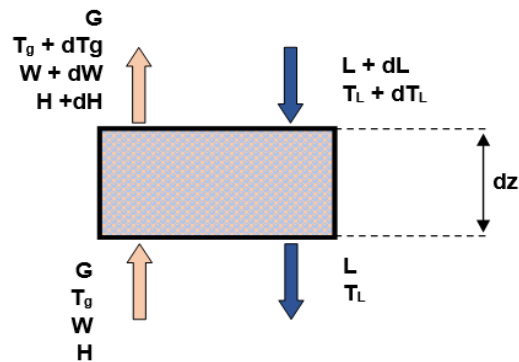
Figura 11 - Linha de operação de uma torre de resfriamento.



Fonte: Adaptado de Geankoplis (2018).

Para o balanço de energia diferencial, considera-se uma seção infinitesimal de altura (dz) da torre de resfriamento (GEANKOPLIS, 2018), conforme a Figura 12.

Figura 12 - Elemento diferencial de altura dz de uma torre de resfriamento com fluxo em contracorrente.



Fonte: Adaptado de Geankoplis (2018).

Considerando L e G constantes, e com temperatura de referência $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, a entalpia pode ser calculada por $c_L \cdot T_L$ (GEANKOPLIS, 2018). Logo, o balanço de energia diferencial resulta na Equação 14.

$$GdH = Lc_LdT_L \quad (14)$$

2.2.4.2 Calor sensível do líquido

O calor sensível transferido do seio do líquido para a interface é representado pela Equação 15 (GEANKOPLIS, 2018).

$$q_{sL} = h_L a A dz (T_L - T_i) \quad (15)$$

O termo “ $A dz$ ” corresponde ao volume da seção infinitesimal. O coeficiente “ a ” corresponde à área de transferência de calor e massa por unidade de volume da torre [m^2/m^3]. Esta área não é igual à área superficial do recheio da torre, já que parte deste pode não estar com a superfície molhada pela água. Considerando que a variação de entalpia seja igual ao calor sensível perdido pelo líquido, chega-se à Equação 16 (GEANKOPLIS, 2018).

$$q_{sL} = Lc_LdT_L \quad (16)$$

2.2.4.3 Eficiência da torre de resfriamento

Segundo Kong *et al.* (2018), a eficiência da torre de resfriamento (η) pode ser calculada através do quociente da diferença de temperatura de entrada e de saída do líquido pela diferença de temperatura de saída do líquido com a temperatura de bulbo úmido do ar de entrada, conforme mostra a Equação 17.

$$\eta = \frac{T_{L1} - T_{L2}}{T_{L1} - T_W} \quad (17)$$

Logo, uma torre de resfriamento com 100% de eficiência, teoricamente, deveria resfriar a água de entrada até a temperatura de bulbo úmido. Entretanto, na prática, o resfriamento atinge apenas de 3 °C ou mais acima da temperatura de bulbo úmido (GEANKOPLIS, 2018).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

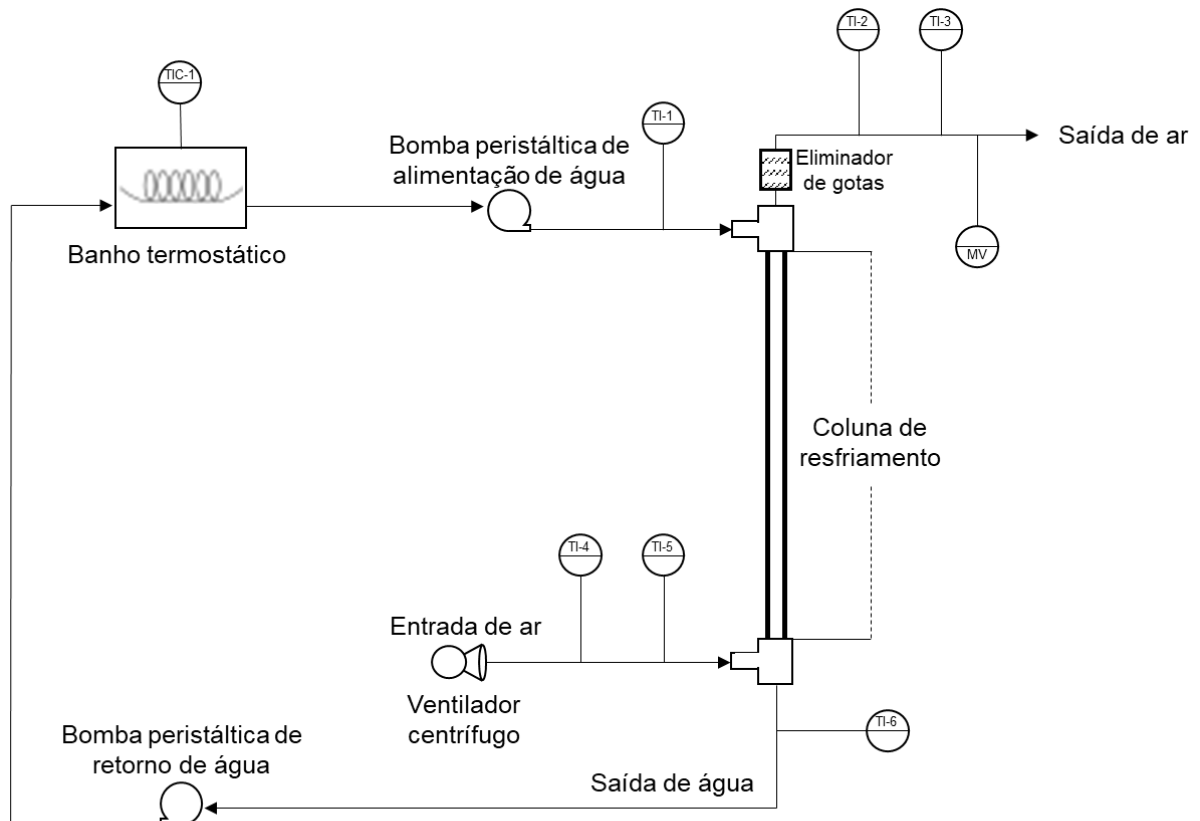
A torre de resfriamento foi construída com materiais disponíveis no Laboratório de Engenharia Química do IFRS/Feliz. O protótipo consiste em um tubo de acrílico de 40 mm de diâmetro externo (36 mm de diâmetro interno) com 1 m de altura, isolado termicamente com o auxílio de uma manta térmica. Conexões e adaptadores de PVC conectam o tubo de acrílico com as derivações de entrada e saída das correntes de ar e água. A alimentação da água aquecida ocorre no topo da torre e é feita com o auxílio de uma bomba peristáltica (AWM 5000 MB, Provitec, Brasil), a qual permite a variação da vazão e garante a estabilidade desta durante a operação por longos períodos. Um banho termostático foi utilizado para o controle da temperatura da água de alimentação. A remoção da água resfriada foi feita no fundo da coluna utilizando outra bomba peristáltica (AWM 5000 MB, Provitec, Brasil) como retorno em um ciclo fechado. A temperatura de alimentação e de saída da água foi monitorada através de sensores de temperatura termopar do tipo K, conectados a indicadores de temperatura (N1040, Novus, Brasil).

Para a indução do escoamento do ar, foi utilizado um ventilador centrífugo na base da coluna (NAUTIKA), o qual foi conectado a um variador de tensão (ZK-BMG) para ajuste da velocidade, e por consequência, da vazão de ar. A base da coluna foi conectada ao ventilador centrífugo, de forma que a saída de ar ocorra no topo da coluna, passando por um eliminador de gotas impresso em impressora 3D (Core A1 Dual, GTMax, Brasil), disponível no Laboratório de Engenharia Química do IFRS Campus Feliz, e escoando para a atmosfera.

A vazão de ar através da coluna foi medida com o auxílio de um anemômetro (TAD-500, Instrutherm, Brasil), posicionado na saída da torre de resfriamento. Sensores de temperatura de bulbo seco e bulbo úmido, baseados em termopares tipo K cobertos com malha de tecido umedecido (bulbo úmido), foram posicionados na alimentação e na saída do ar. Os sensores também foram conectados a indicadores de temperatura (N1040). A torre de resfriamento, bem como os acessórios necessários para a operação, foi afixada em um suporte universal com garras. Na

Figura 13 é possível visualizar o diagrama completo do protótipo da torre de resfriamento, contendo a instrumentação que foi utilizada.

Figura 13 - Diagrama de instrumentação do protótipo da torre de resfriamento.



Legenda:

- TI-1 – Indicador da temperatura da entrada de água
- TI-2 – Indicador da temperatura de bulbo seco na saída de ar
- TI-3 – Indicador da temperatura de bulbo úmido na saída de ar
- TI-4 – Indicador da temperatura de bulbo seco na entrada de ar
- TI-5 – Indicador da temperatura de bulbo úmido na entrada de ar
- TI-6 – Indicador da temperatura de saída da água
- TIC-1 – Indicador da temperatura no banho termostático
- MV – Anemômetro

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.2 MÉTODOS

Foram realizados experimentos para a avaliação do desempenho da coluna em diferentes condições experimentais de vazão de ar e água, temperatura de alimentação da água, com e sem a utilização de um recheio randômico. Em todos os

experimentos realizados, foram monitoradas e registradas as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido na alimentação e saída do ar, para utilização nos cálculos da eficiência da torre de resfriamento. A temperatura de entrada e saída da água também foi monitorada e registrada para possibilitar avaliar o desempenho do processo de resfriamento e realizar cálculos de balanço de energia.

3.2.1 Avaliação do efeito da vazão de ar

Para a avaliação dos efeitos da vazão de ar, foi fixada uma vazão de aproximadamente 86 mL/min de água, nas temperaturas de 30, 40 e 50 °C. A vazão de ar foi variada alterando a velocidade do ventilador, presente na base da coluna, com o auxílio de um variador de tensão.

Foram avaliadas três velocidades distintas, equivalentes a velocidades superficiais do ar de 1,0, 2,0 e 2,7 m/s. A velocidade do ar foi medida com o auxílio do anemômetro.

3.2.2 Avaliação do efeito da temperatura de alimentação da água

Para a avaliação dos efeitos da temperatura de alimentação da água, foram avaliadas temperaturas de 30, 40 e 50 °C, com a vazão de alimentação de água fixada em aproximadamente 86 mL/min.

3.2.3 Avaliação do efeito da vazão da água

Para a avaliação dos efeitos da vazão de água, foram avaliadas vazões de aproximadamente 86 e 172 mL/min, na temperatura de 50 °C. Os experimentos foram realizados em três vazões de ar distintas, equivalentes a velocidades superficiais do ar de 1,0, 2,0 e 2,7 m/s.

3.2.4 Avaliação do efeito do recheio na torre

Foi avaliado o efeito da utilização de um recheio randômico na torre de resfriamento, a partir da comparação dos dados obtidos com e sem a utilização do mesmo, na eficiência de operação da coluna. O recheio randômico foi disposto de forma aleatória em toda a extensão da coluna. Utilizou-se um recheio do tipo anel de Raschig, com aproximadamente 15 mm de diâmetro externo e 15 mm de altura, dispostos de forma aleatória em toda a extensão da coluna.

A vazão de alimentação da água foi fixada em 86 mL/min na temperatura de 50 °C e foram empregadas quatro vazões de ar distintas, equivalentes a velocidades superficiais do ar de 1,0, 2,7, 4,0 e 4,9 m/s para a torre de resfriamento sem recheio. Já nos experimentos realizados na torre de resfriamento com recheio, foram empregadas três vazões de ar distintas, equivalentes a velocidades superficiais do ar de 1,0, 2,0 e 2,7 m/s.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para melhor compreensão e discussão dos resultados, primeiramente será apresentada a construção da torre de resfriamento e as alterações realizadas durante o desenvolvimento do trabalho e, após, os resultados obtidos na avaliação dos parâmetros operacionais.

4.1 CONSTRUÇÃO DA TORRE DE RESFRIAMENTO

A construção do protótipo iniciou-se a partir da coluna de resfriamento da torre, que foi baseada em um tubo de acrílico de 40 mm de diâmetro externo (36 mm de diâmetro interno) e 1 m de altura, contendo isolamento térmico para minimizar a perda de calor para o ambiente. Uma breve seção do tubo não foi isolada (Figura 14) para que pudesse ser observado o comportamento da coluna, utilização de recheios e possíveis inundações.

Figura 14 - Coluna da torre de resfriamento equipada com manta térmica e seção para observação da operação.



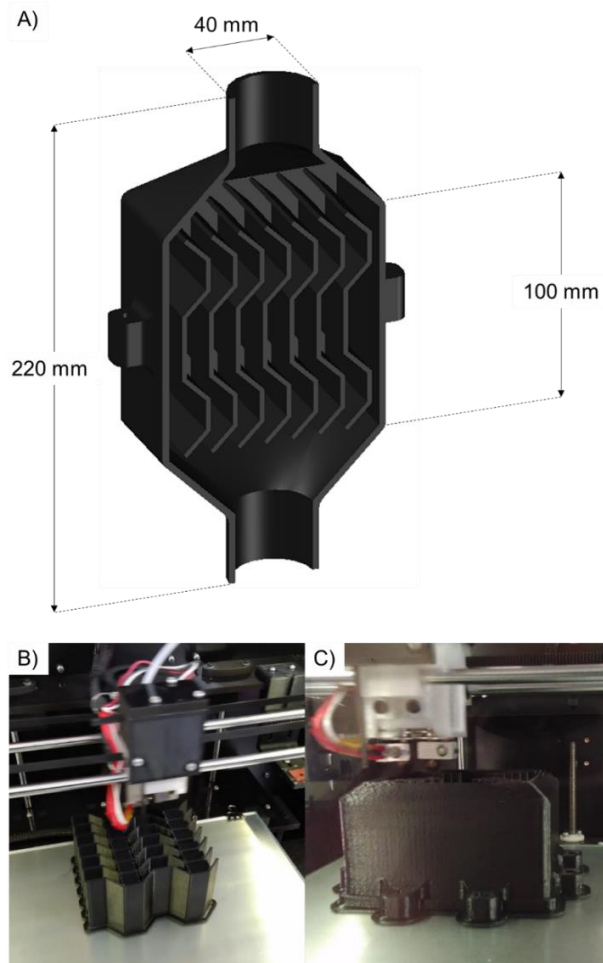
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para conectar o tubo de acrílico com as derivações de entrada e saída das correntes de ar e água, conexões e adaptadores de PVC foram empregados e iniciaram-se os primeiros testes de funcionamento da torre. Observou-se que as

temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido na saída da torre apresentaram instabilidades e comportamentos não relatados na teoria. Relatou-se que estes erros experimentais ocorreram devido ao arraste de diversas gotículas de água através da coluna da torre, que acabavam atingindo o sensor de bulbo seco na saída do equipamento, fazendo com que este registrasse uma temperatura errônea.

Para solucionar o problema, foi projetado e impresso em uma impressora 3D, disponível no Laboratório de Engenharia Química do IFRS Campus Feliz, um eliminador de gotas, conforme apresentado na Figura 15, e alocado no topo da coluna. O aparato consiste em diversas placas inclinadas que formam uma zona de impacto no trajeto das gotículas e impedem a passagem das mesmas para a saída do equipamento, em direção aos sensores de temperatura.

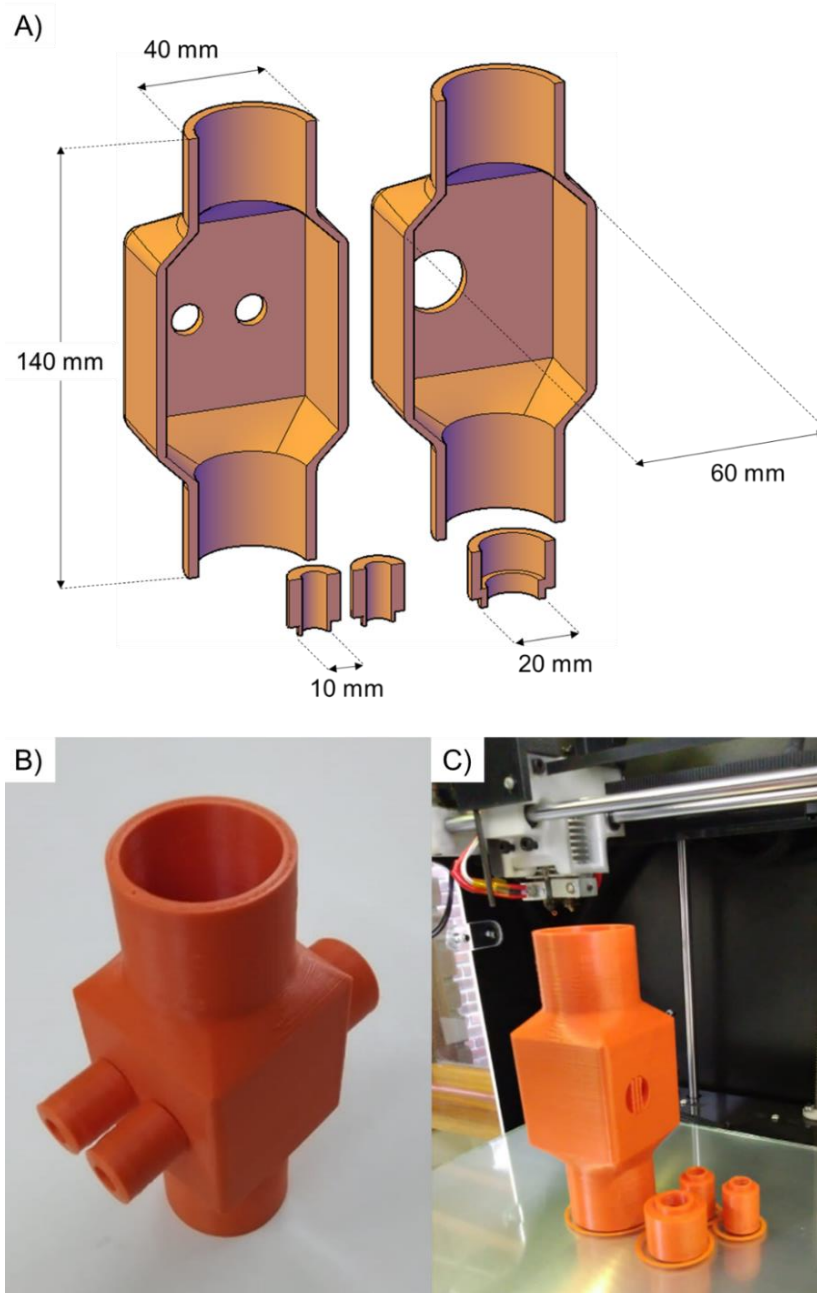
Figura 15 - A) Projeto do eliminador de gotas, B) Impressão das placas eliminadoras de gotas e C) Impressão do suporte para acoplar as placas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Observou-se também uma dificuldade para alocar de forma correta os sensores de bulbo úmido e bulbo seco apenas com os materiais disponíveis no laboratório. Para solução do problema, também foi projetado e impresso em impressora 3D um suporte para que os sensores ficassem alocados de forma ideal para as medições necessárias. O projeto e o aparato impresso são apresentados na Figura 16.

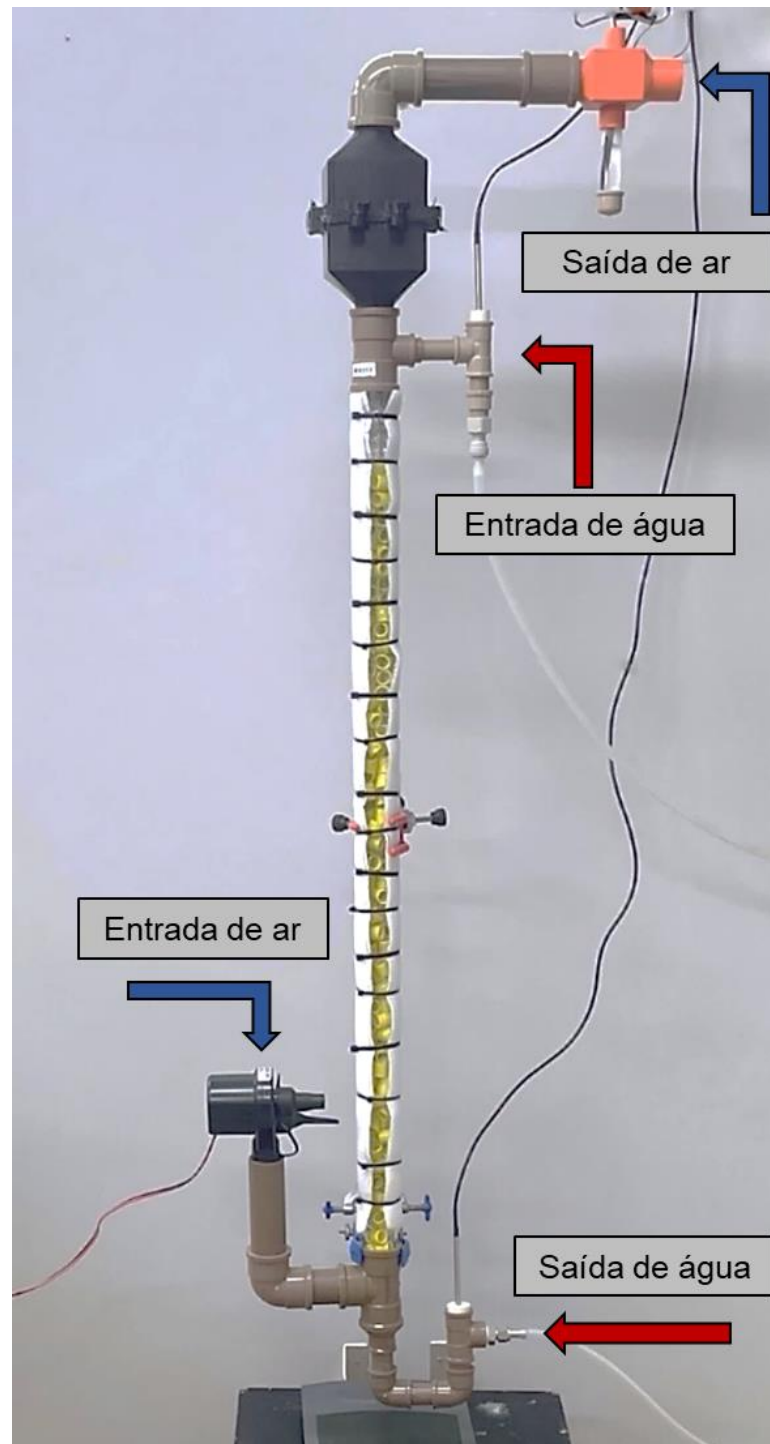
Figura 16 – A) Projeto do suporte para bulbo úmido e bulbo seco; B) Suporte impresso e montado; C) Suporte em partes, ao término da impressão 3D.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Após os devidos ajustes, os aparatos desenvolvidos para a operação correta da torre de resfriamento foram instalados no equipamento. O protótipo final é apresentado na Figura 17.

Figura 17 - Protótipo final da torre de resfriamento.

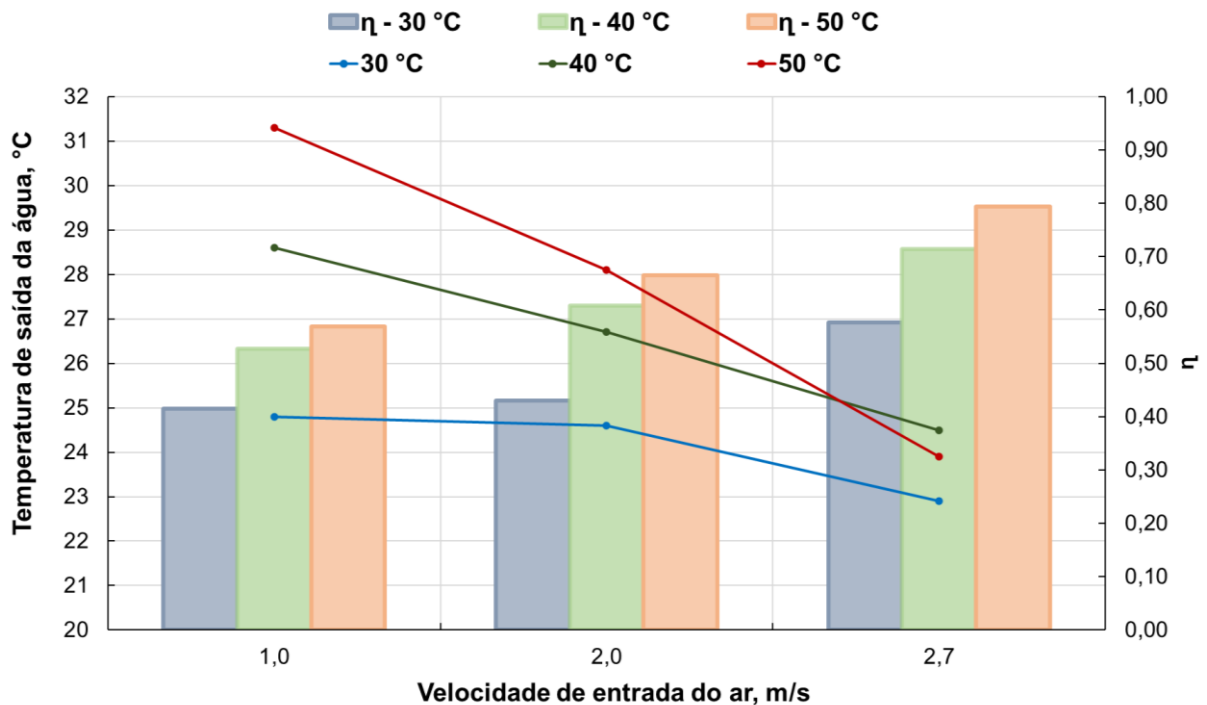


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

4.2 AVALIAÇÃO DO EFEITO DA VAZÃO DE AR

Na Figura 18 é possível observar os resultados do efeito da velocidade do ar na temperatura de saída da água, para três temperaturas de alimentação da água distintas, bem como na eficiência da coluna. Os resultados obtidos, de forma mais detalhada, também podem ser vistos no APÊNDICE A.

Figura 18 – Avaliação do efeito da velocidade de entrada do ar e da temperatura de alimentação da água na temperatura de saída da água.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

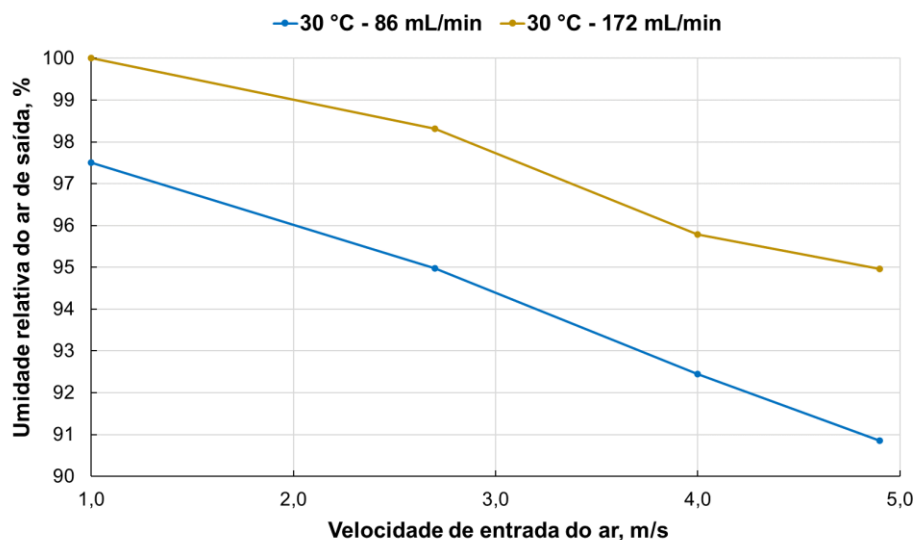
Foi observado um aumento considerável no resfriamento do fluido com o aumento da velocidade de entrada do ar, principalmente em temperaturas de alimentação da água mais altas. Aumentando a velocidade de entrada do ar de 1 m/s para 2 m/s, por exemplo, foi possível observar variações de até 3 °C, enquanto que quando aumentou para 2,7 m/s foi possível obter um resfriamento de mais 4 °C em relação ao segundo ponto. É importante ressaltar que 2,7 m/s foi a velocidade máxima de operação observada para a torre de resfriamento sem que ocorresse inundação na coluna, quando utilizada com recheio.

Em todos os pontos observou-se uma redução de temperatura maior com o aumento da velocidade de entrada do ar, conforme previsto por Geankoplis (2018). A menor temperatura de saída da água é esperada em função da redução da relação líquido-gás.

A umidade relativa do ar de saída, obtida neste experimento, foi de aproximadamente 100% para todas as vazões de ar e temperaturas de entrada da água utilizadas, não podendo ser observada a influência da vazão de ar nesta propriedade. Entretanto, também foram realizados experimentos sem a utilização do recheio randômico no interior da coluna (Figura 19), obtendo-se dados da umidade relativa do ar menores que 100%. Conseqüentemente, foi possível observar que a umidade relativa do ar é menor quando se opera a torre de resfriamento com vazões de ar maiores. Tal comportamento é esperado em função da menor relação líquido-gás na coluna. O mesmo princípio se aplica quando a vazão de água é diminuída, resultando em uma umidificação menos eficiente do ar.

É importante ressaltar que o limite de avaliação da umidade relativa se dá em função da baixa vazão de ar na coluna, uma vez que não há ar o suficiente para absorver a umidade, e não por uma possível ineficiência na transferência de calor e massa.

Figura 19 – Avaliação do efeito da velocidade de entrada do ar na umidade relativa de saída da coluna.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

4.3 AVALIAÇÃO DO EFEITO DA TEMPERATURA DE ALIMENTAÇÃO DA ÁGUA

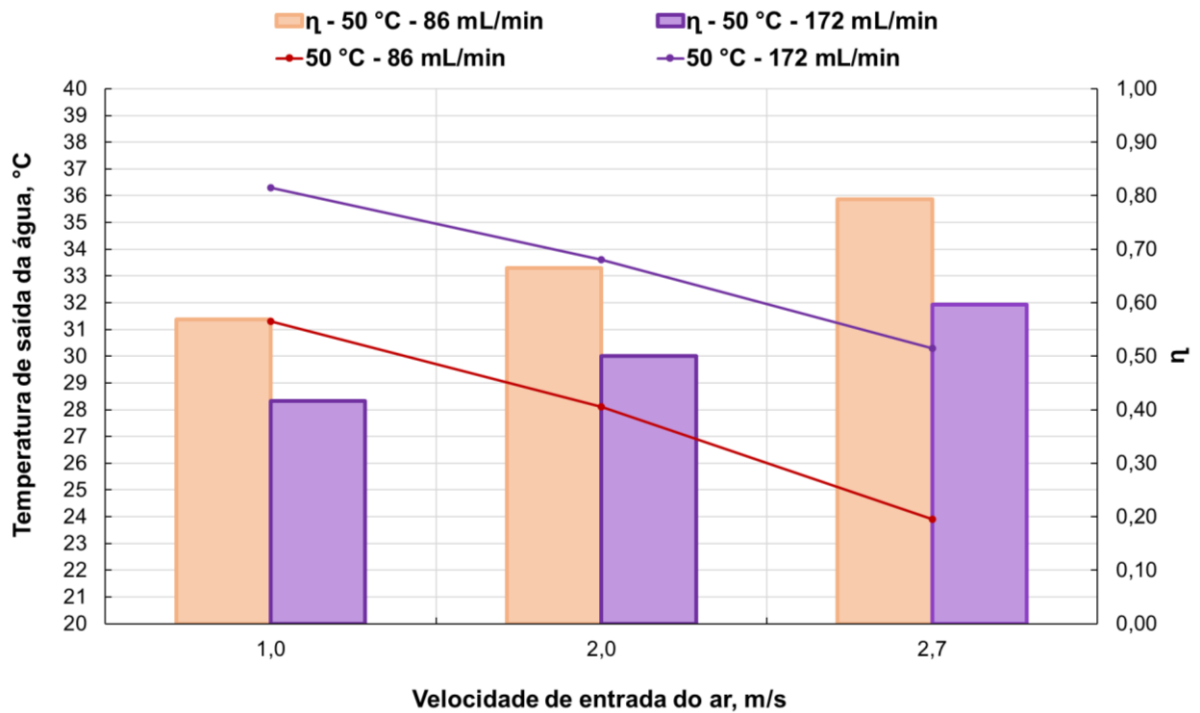
Para a avaliação do efeito da temperatura de alimentação da água, foi observado um aumento significativo na eficiência da torre quando a mesma foi aumentada. Os dados obtidos para a operação da torre de resfriamento com água de alimentação em uma temperatura de 50 °C e vazão de ar de 2,7 m/s, apresentam uma eficiência de aproximadamente 0,80, enquanto que para temperaturas de alimentação de 30 e 40 °C os valores observados foram de aproximadamente 0,60 e 0,70, respectivamente. Em termos de resfriamento, as temperaturas de saída da água para temperatura de alimentação de 50 °C variaram de 31 °C (menor vazão de ar) até aproximadamente 24 °C (maior vazão de ar), resultando em um resfriamento total de até 26 °C. Operando com temperaturas de alimentação de 30 e 40 °C, o resfriamento da água foi de, respectivamente, 7 e 16 °C, operando com vazão de ar de 2,7 m/s. Os resultados obtidos, de forma mais detalhada, podem ser vistos no APÊNDICE A.

Isso significa que quanto maior a temperatura de alimentação da água, maior a diferença entre a temperatura de alimentação e a temperatura de saída da água. Esse comportamento é esperado, uma vez que quanto maior a temperatura da água, maior a quantidade de calor sensível disponível, que, conseqüentemente, possibilita a vaporização de uma maior quantidade de água.

4.4 AVALIAÇÃO DO EFEITO DA VAZÃO DE ÁGUA

Na Figura 20, pode ser visto o efeito da vazão de água e da velocidade do ar na eficiência da torre de resfriamento. Os resultados obtidos, de forma mais detalhada, também podem ser vistos no APÊNDICE A.

Figura 20 – Avaliação do efeito da vazão de água na temperatura de saída da água.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

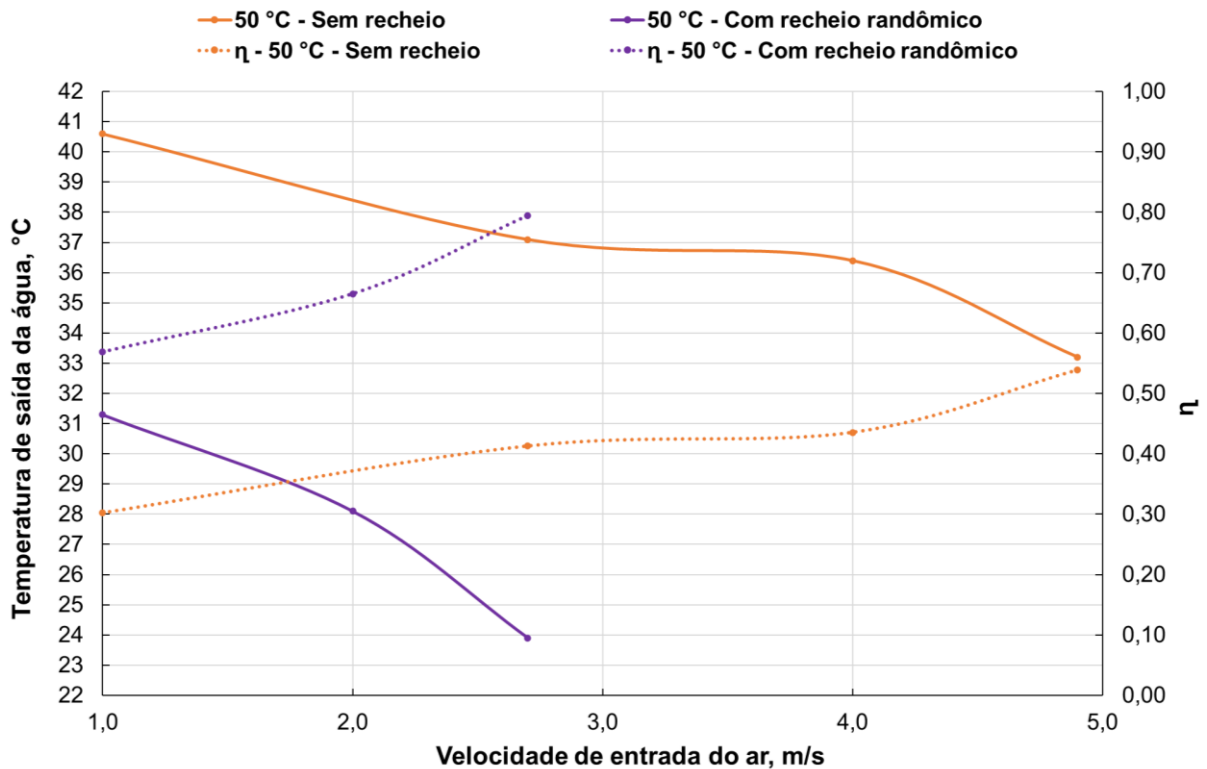
É possível observar grande variação de eficiência quando se varia a vazão da água. Quanto maior a vazão de água, menor a eficiência da torre e, conseqüentemente, menor o resfriamento do líquido. Quando a vazão foi duplicada, a eficiência resultante foi aproximadamente 24% inferior. Em decorrência disso, a temperatura de saída do líquido foi de aproximadamente 30 °C, operando na maior vazão de ar testada. Já quando se operou a torre com vazão de água de 86 mL/min, a temperatura de saída da água foi de aproximadamente 24 °C, obtendo assim um resfriamento de 6 °C a mais do que quando operada com vazão de água de 172 mL/min. Novamente, este efeito é esperado em função da relação líquido-gás no interior da coluna, que fica maior com o aumento da vazão de água.

4.5 AVALIAÇÃO DO EFEITO DO RECHEIO NA TORRE

Nos experimentos sem recheio, a velocidade do ar pôde ser aumentada até 4,9 m/s. Já nos experimentos realizados na torre de resfriamento com recheio, só foi

possível empregar três vazões de ar distintas, equivalentes a velocidades superficiais do ar de 1,0, 2,0 e 2,7 m/s, devido ao limite de operação da torre sem que a coluna fosse inundada. A Figura 21 apresenta os resultados obtidos. Nos APÊNDICE A e APÊNDICE B podem ser vistos os resultados de forma mais detalhada.

Figura 21 - Avaliação do efeito da velocidade de entrada do ar na temperatura de saída da água com e sem a utilização de recheio.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Foi possível constatar um aumento substancial na eficiência da torre quando operada com a utilização do recheio, atingindo valores até duas vezes maiores que os resultados obtidos para a operação da torre sem a utilização do recheio. Quando comparados os pontos com vazões de ar de 2,7 m/s, observa-se uma redução de aproximadamente 10 °C a mais com o uso do recheio randômico. O mesmo acontece para vazões mais baixas. Esse comportamento é esperado, uma vez que o recheio aumenta a área superficial de contato entre o líquido e o ar, gerando aumento da transferência de calor e massa e possibilitando o resfriamento mais eficiente do líquido.

4.6 BALANÇO DE ENERGIA

Os cálculos de balanço de energia foram realizados com os resultados obtidos a partir do experimento com parâmetros operacionais de temperatura de alimentação da água de 50 °C, vazão de água de 86 mL/min e velocidade de entrada do ar de 2,7 m/s com a utilização de recheio randômico, a fim de verificar a consistência dos dados experimentais. Conforme os cálculos realizados a partir da Equação 12, a água cedeu mais calor sensível do que o ar absorveu. O erro calculado foi de 8,15% e possíveis fontes de incerteza podem ser imprecisões na resolução dos sensores de temperaturas e perdas de calor para o ambiente. As Equações 18 e 19 apresentam os resultados dos cálculos do calor sensível cedido pela água. As Equações 20 e 21 apresentam os resultados dos cálculos do calor sensível absorvido pelo ar. A Equação 22 apresenta a discordância entre os valores obtidos para o balanço de energia. Os valores para H_1 e H_2 são oriundos da carta psicrométrica nas condições de entrada e saída da torre.

$$\text{Calor sensível cedido pela água} = Lc_L(T_{L2} - T_{L1}) \quad (18)$$

$$Lc_L(T_{L1} - T_{L2}) = 5,07 \cdot 4,186 \cdot (50,1 - 23,9) = 333 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = \mathbf{92,6 W} \quad (19)$$

$$\text{Calor sensível absorvido pelo ar} = G(H_2 - H_1) \quad (20)$$

$$G(H_2 - H_1) = 9,72 \cdot (108,91 - 48,14) = 308 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = \mathbf{85,6 W} \quad (21)$$

$$\text{Discordância entre os valores} = \mathbf{8,15 \%} \quad (22)$$

4.7 SUGESTÕES PARA EXPERIMENTOS E MELHORIAS FUTURAS

O protótipo construído apresentou resultados satisfatórios e condizentes com os encontrados na literatura. Entretanto, possíveis ajustes e variações de

experimentos podem ser realizados futuramente com a torre de resfriamento construída.

Propõe-se que seja impresso e alocado na entrada de ar da torre de resfriamento outro suporte de bulbo úmido e bulbo seco, de forma que a operação e medição de temperaturas ocorra de forma mais fácil. No protótipo atual, o suporte impresso é retirado do topo e alocado na base quando necessário. Outra sugestão seria a realização de um esquema de válvulas e tubulações para alternar a passagem de ar diretamente da base da torre para o topo, onde o suporte já está alocado.

Sugere-se também a realização de experimentos de avaliação do efeito da altura da coluna de recheio nas propriedades da água e do ar, uma vez que no protótipo atual o ar saiu saturado na maior parte dos experimentos. Além disso, pode ser avaliada a utilização de recheios estruturados.

A substituição da coluna por uma de maior diâmetro e o acoplamento de um *spray* de água na alimentação do equipamento poderiam facilitar a visualização dos discentes e aumentar a eficiência da torre, uma vez que aumentariam a área de contato entre o gás e o líquido. Além disso, possibilitaria a operação da torre com maiores vazões de água sem inundação da coluna. É importante pontuar que nesse caso, um ventilador centrífugo de maior potência também seria indicado.

5 CONCLUSÃO

A construção e avaliação dos parâmetros operacionais do protótipo da torre de resfriamento para utilização em âmbito acadêmico foi concluída de forma satisfatória. A torre apresentou resultados condizentes com os disponíveis na literatura, variando vazões de ar, água, temperatura de alimentação da água e realizando operações com ou sem recheio.

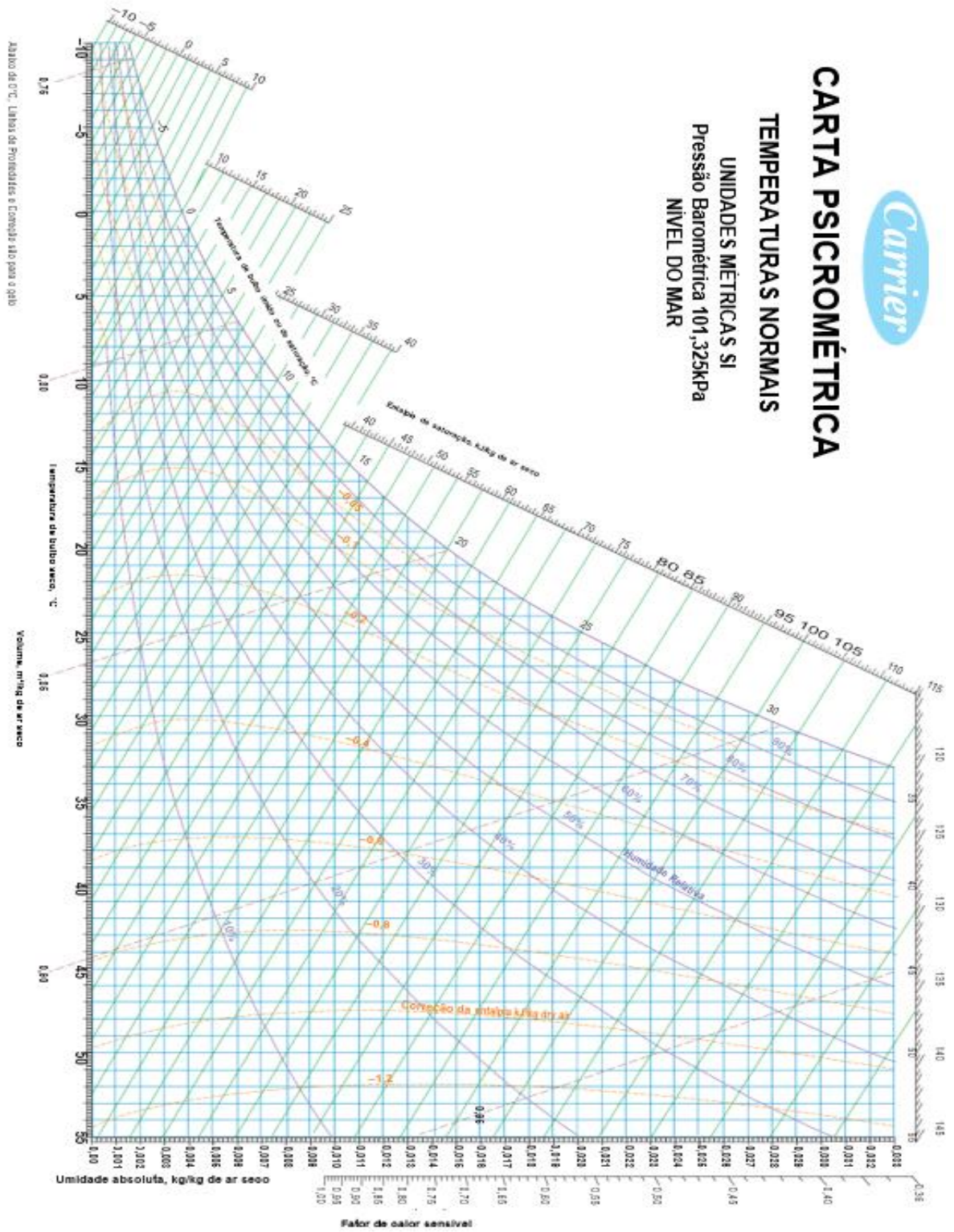
O protótipo construído apresentou relativa facilidade operacional e permitiu visualizar a operação unitária de forma simples, observar a influência de cada parâmetro e comparar os resultados experimentais com os relatados na teoria. A maior eficiência encontrada para a torre de resfriamento foi de aproximadamente 0,80 com parâmetros operacionais de temperatura de alimentação da água em 50 °C, velocidade do ar em 2,7 m/s, vazão de água em 86 mL/min e utilização de um recheio do tipo anel de Raschig.

A formação e o desenvolvimento profissional dos discentes do curso são afetados diretamente por suas experiências práticas. Desta forma, o protótipo construído encontra-se disponível no laboratório de Engenharia Química do IFRS Campus Feliz para experimentos didáticos, que virão a contribuir para o aprendizado dos acadêmicos.

REFERÊNCIAS

- CHEREMISINOFF, Nicholas P.; CHEREMISINOFF, Paul N. **Cooling towers : selection, design, and practice**. [S. l.]: Ann Arbor Science Publishers, 1981.
- FERREIRA, Andreo K. **TORRE DE RESFRIAMENTO DIDÁTICA**. 2012. - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2012.
- GEANKOPLIS, Christie John; HERSEL, A. Allen; LEPEK, Daniel H. **Transport Processes and Separation Process Principles**. 5th. ed. [S. l.]: Pearson Education, Inc., 2018.
- GOMIDE, Reynaldo. **Umidificação, condicionamento e secagem de gases, resfriamento de líquidos**. São Paulo: Palas Athenas, 2005. v. V
- HILL, G. B.; PRING, E. J.; OSBORN, Peter D. **Cooling towers : principles and practice**. 3ª ed.ed. [S. l.]: Butterworth-Heinemann, 1990.
- KJ, Dileep *et al.* Design and Fabrication of Cooling Tower. **International Journal of Latest Engineering Research and Applications**, [s. l.], v. 02, n. 05, p. 27–37, 2017. Disponível em: www.ijlera.com.
- KONG, Qing Jie *et al.* Experimental investigation of the heat and mass transfer phenomena in a counterflow wet cooling tower with foam ceramic packing. **Advances in Mechanical Engineering**, [s. l.], v. 10, n. 1, 2018.
- MCCABE, Warren L.; SMITH, Julian C.; HARRIOT, Peter. **UNIT OPERATIONS OF CHEMICAL ENGINEERING**. 5th ed.ed. Singapore: McGraw-Hill, 1993.
- PERRY, Robert H.; GREEN, Don W.; MALONEY, James O. **Perry's chemical engineers' handbook**. 7ª ed.ed. [S. l.]: McGraw-Hill, 1997.
- ROCHA, Raquel Estevez *et al.* CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE UMA TORRE DE RESFRIAMENTO PARA REAPROVEITAMENTO DO EFLUENTE DOS DESTILADORES DE BANCADA. **Anais do VII Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe**, [s. l.], 2015. Disponível em: www.simprod.ufs.br.
- WANG, Lawrence K; PEREIRA, Norman C; HUNG, Yung-Tse. **Advanced Air and Noise Pollution Control: Volume 2 (Handbook of Environmental Engineering)**. Nova Jersey: Humana Press, 2004. v. 2

ANEXO A – CARTA PSICROMÉTRICA DE CARRIER



Fonte: Carrier Corporation.

APÊNDICE A - DADOS OBTIDOS PARA EXPERIMENTO EM TORRE DE RESFRIAMENTO COM UTILIZAÇÃO DE RECHEIO RANDÔMICO

TORRE DE RESFRIAMENTO COM UTILIZAÇÃO DE RECHEIO RANDÔMICO										
Velocidade de entrada do ar, m/s	Vazão de entrada do ar, m ³ /s	Vazão de entrada água, mL/min	T entrada água, °C	T saída água, °C	T _w saída, °C	T bulbo seco saída, °C	T _w entrada, °C	T bulbo seco entrada, °C	Umidade relativa de saída, %	η
1,0	0,00091		30,2	26,1	25,3	25,8	16,2	19,8	96,2	0,29
2,0	0,00182	171,6	30,6	26,1	25,7	26,2	17,7	20,6	96,2	0,35
2,7	0,00245		30,1	25,0	24,9	25,2	17,6	19,7	97,7	0,41
1,0	0,00091		40,2	32,8	32,4	32,3	18,0	19,4	100,0	0,33
2,0	0,00182	171,6	40,0	30,5	32,2	31,9	18,0	19,4	100,0	0,43
2,7	0,00245		39,9	28,2	31,9	31,8	18,0	19,4	100,0	0,53
1,0	0,00091		50,0	36,3	38,6	38,6	17,1	18,9	100,0	0,42
2,0	0,00182	171,6	50,1	33,6	37,8	37,5	17,1	18,9	100,0	0,50
2,7	0,00245		49,8	30,3	37,9	37,8	17,1	18,9	100,0	0,60

TORRE DE RESFRIAMENTO COM UTILIZAÇÃO DE RECHEIO RANDÔMICO										
Velocidade de entrada do ar, m/s	Vazão de entrada do ar, m ³ /s	Vazão de entrada água, mL/min	T entrada água, °C	T saída água, °C	T _w saída, °C	T bulbo seco saída, °C	T _w entrada, °C	T bulbo seco entrada, °C	Umidade relativa de saída, %	η
1,0	0,00091		29,9	24,8	23,8	24,2	17,6	19,8	96,8	0,41
2,0	0,00182	85,6	29,8	24,6	24,9	25,0	17,7	20,6	99,2	0,43
2,7	0,00245		30,1	22,9	23,7	23,8	17,6	19,8	99,2	0,58
1,0	0,00091		40,2	28,6	28,4	28,3	18,2	19,4	100,0	0,53
2,0	0,00182	85,6	39,9	26,7	27,3	27,1	18,2	19,4	100,0	0,61
2,7	0,00245		40,2	24,5	26,2	26,3	18,2	19,4	99,2	0,71
1,0	0,00091		50,0	31,3	34,7	34,7	17,1	18,8	100,0	0,57
2,0	0,00182	85,6	49,9	28,1	31,1	30,8	17,1	18,8	100,0	0,66
2,7	0,00245		50,1	23,9	31,7	31,5	17,1	18,8	100,0	0,79

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

APÊNDICE B - DADOS OBTIDOS PARA EXPERIMENTO EM TORRE DE RESFRIAMENTO SEM UTILIZAÇÃO DE RECHEIO

TORRE DE RESFRIAMENTO SEM UTILIZAÇÃO DE RECHEIO												
Velocidade de entrada do ar, m/s	Vazão de entrada do ar, m ³ /s	Vazão de entrada água, mL/min	T entrada água, °C	T saída água, °C	T _w saída, °C	T bulbo seco saída, °C	T _w entrada, °C	T bulbo seco entrada, °C	Umidade relativa de saída, %	η		
1,0	0,00091		30,1	29,7	22,8	22,8	17,6	20,5	100,0	0,03		
2,7	0,00245	171,6	29,9	28,7	21,8	22,0	17,6	20,5	98,3	0,10		
4,0	0,00363	171,6	29,9	27,0	21,3	21,8	17,6	20,5	95,8	0,24		
4,9	0,00445		30,0	26,9	21,2	21,8	17,6	20,5	95,0	0,25		
1,0	0,00091		40,0	37,1	23,9	24,3	16,2	18,3	96,8	0,12		
2,7	0,00245	171,6	40,0	35,9	23,1	23,1	16,2	18,3	100,0	0,17		
4,0	0,00363	171,6	39,9	33,3	22,5	22,9	16,2	18,3	96,7	0,28		
4,9	0,00445		40,2	33,2	22,2	22,4	16,2	18,3	98,3	0,29		
1,0	0,00091		50,2	43,6	28,8	29,3	17,4	18,6	96,4	0,20		
2,7	0,00245	171,6	50,0	40,9	27,1	27,4	17,4	18,6	97,8	0,28		
4,0	0,00363	171,6	50,2	38,4	26,6	26,8	17,4	18,6	98,5	0,36		
4,9	0,00445		50,0	37,9	25,2	25,5	17,4	18,6	97,7	0,37		

TORRE DE RESFRIAMENTO SEM UTILIZAÇÃO DE RECHEIO												
Velocidade de entrada do ar, m/s	Vazão de entrada do ar, m ³ /s	Vazão de entrada água, mL/min	T entrada água, °C	T saída água, °C	T _w saída, °C	T bulbo seco saída, °C	T _w entrada, °C	T bulbo seco entrada, °C	Umidade relativa de saída, %	η		
1,0	0,00091		30,0	28,2	22,3	22,6	18,2	21,5	97,5	0,15		
2,7	0,00245	85,6	30,0	27,0	21,3	21,9	18,2	21,5	95,0	0,25		
4,0	0,00363	85,6	30,0	24,8	20,7	21,6	18,2	21,5	92,4	0,44		
4,9	0,00445		30,2	23,5	20,8	21,9	18,2	21,5	90,9	0,56		
1,0	0,00091		40,2	32,1	24,1	24,8	19,5	23,8	94,5	0,39		
2,7	0,00245	85,6	40,2	29,7	24,5	25,0	19,5	23,8	96,1	0,51		
4,0	0,00363	85,6	39,8	27,8	23,8	24,8	19,5	23,8	92,2	0,59		
4,9	0,00445		40,1	27,1	23,6	24,8	19,5	23,8	90,7	0,63		
1,0	0,00091		50,0	40,6	28,2	28,3	18,9	20,8	99,3	0,30		
2,7	0,00245	85,6	49,9	37,1	25,6	25,7	18,9	20,8	99,2	0,41		
4,0	0,00363	85,6	49,9	36,4	24,8	25,0	18,9	20,8	98,4	0,44		
4,9	0,00445		49,9	33,2	24,6	24,8	18,9	20,8	98,4	0,54		

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).