



UNIDADE DE ENSINO SUPERIOR DE FEIRA DE SANTANA
KEVIN DIAS DOS SANTOS ARAUJO

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE UMA TORRE DE ARREFECIMENTO UTILIZANDO
FIBRA DE SISAL COMO PREENCHIMENTO**

FEIRA DE SANTANA
2021

KEVIN DIAS DOS SANTOS ARAUJO

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE UMA TORRE DE ARREFECIMENTO UTILIZANDO
FIBRA DE SISAL COMO PREENCHIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso da
Faculdade Unidade de Ensino Superior de
Feira de Santana – UNEF, como requisito
para obtenção do título de graduado em
Engenharia Mecânica

Orientador(a): Me. Fernanda Mansani
Silva Gomes

FEIRA DE SANTANA

KEVIN DIAS DOS SANTOS ARAUJO

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE UMA TORRE DE ARREFECIMENTO UTILIZANDO
FIBRA DE SISAL COMO PREENCHIMENTO**

Feira de Santana, 22/02/2022

Banca Examinadora:

Prof. Me. Fernanda Mansani Silva Gomes
Unidade de ensino superior de Feira de Santana
Orientador(a)

Prof. Dr. Carla Adriane Ramos Segatto Fontura
Unidade de ensino superior de Feira de Santana
Examinador(a)

Prof. Me. Luccas Barbosa Carneiro
Unidade de ensino superior de Feira de Santana
Examinador(a)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a primeiramente a minha família por seu esforço para me manter em outra cidade e pelo apoio nos momentos difíceis, a minha namorada e aos meus amigos por me apoiarem nos momentos em que achei que não conseguiria, a minha orientadora por me ajudar e incentivar a manter os prazos, aos meus professores e coordenador por sempre estarem dispostos a sanarem dúvidas e transmitir seu conhecimento.

RESUMO

As torres de arrefecimento são trocadores de calor utilizadas em alguns setores industriais e comerciais, que utilizam o ar para fazer o resfriamento da água, entrando ou não em contato físico. A propriedade de maior importância nas torres de sistema aberto, é o resfriamento evaporativo, por se tratar de ser o maior responsável pela redução de temperatura da água. No interior da torre existem preenchimentos, que foram produzidos a partir de fibras de sisal, para analisar a eficácia de resfriamento, sendo necessário a observação das temperaturas de entrada e saída da água na torre de arrefecimento. Os preenchimentos de diferentes materiais possuem características distintas, existindo um maior ou menor arrefecimento da água a depender de qual material utilizado. O presente trabalho tem como objetivos utilizar a fibra de sisal como preenchimento, equiparar as temperaturas de entrada e saída da torre para avaliar a sua eficiência a partir da construção de um protótipo. O método que utilizado nesse trabalho quanto a natureza é aplicada, ao objetivo buscou fazer uma junção entre os métodos descritivos e explicativos, ao procedimento a pesquisa foi experimental, a abordagem do problema a pesquisa teve uma análise quali-quantitativa. A partir da coleta e análise de dados foi visto que a fibra de sisal apresenta boa eficiência como preenchimento para torres de resfriamento de água, chegando a 80% de eficiência em todos o processo, a sua utilização atingiu redução de temperatura da água maior que os materiais alternativos que foram comparados neste estudo, levando em consideração apenas as temperaturas de entrada e saída da água e a temperatura de bulbo úmido.

Palavras-chave: Torres, resfriamento, fibra, sisal, transferência de calor.

ABSTRACT

Cooling towers are heat exchangers used in some industrial and commercial sectors, they use air to cool the water, whether or not they come into physical contact. Inside the tower there are fillers, which will be produced from sisal fibers, to analyze the cooling efficiency, being necessary to observe the temperatures of entry and exit of the water in the cooling tower. The fillings of different materials have different characteristics, with a greater or lesser cooling of the water depending on which material is used. The most important property in open system towers is evaporative cooling, as it is the main responsible for reducing water temperature. The objectives are to analyze the sisal fiber as a filler, to match the inlet and outlet temperatures of the tower to assess its performance. The method that will be used in this work when nature is applied, the objective will seek to make a junction between the descriptive and explanatory methods, the procedure the research will be experimental, the approach to the problem the research will have a quali-quantitative analysis. From the data collection and analysis, it was seen that sisal fiber has good efficiency as a filling for water cooling towers, reaching 80% efficiency in all the process, its use achieved a greater water temperature reduction than the alternative materials that were compared in this study, taking into account only the inlet and outlet water temperatures and the wet bulb temperature.

Key-words: Tower, cooling, fiber, sisal, heat transfer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Processos de transferência de calor. (a) Convecção forçada. (b) Condução.....	17
Figura 2 – Funcionamento de uma torre de resfriamento.....	19
Figura 3 – Relação entre range e approach.....	20
Figura 4 – A planta sisal (<i>Agave Sisalana</i>).....	23
Figura 5 – Processo de secagem da fibra de sisal.....	24
Quadro 1 – Características e tipos de fibras, criando uma ligação entre eles.....	25
Figura 6 – Fios de PET.....	27
Figura 7 – Gargalo de garrafa PET.....	27
Figura 8 – Fios de fibra de coco.....	28
Figura 9 – Tigela feita com casca de coco.....	29
Figura 10 – Base do protótipo da torre de arrefecimento.....	32
Figura 11 – Corpo, tubulação e reservatório de água quente do protótipo da torre..	33
Figura 12 – Modelo da bomba utilizada no protótipo.....	33
Figura 13 – Exaustor do protótipo.....	34
Figura 14 – Bucha da fibra de sisal sendo pesada.....	34
Figura 15 – Protótipo da torre de arrefecimento em funcionamento.....	35
Figura 16 – Termômetros agulha medindo as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido.....	36
Figura 17 – Preenchimento de materiais alternativos 01.....	38
Figura 18 – Preenchimento de materiais alternativos 02.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.....	37
Tabela 2.....	39

Sumário

AGRADECIMENTOS	4
RESUMO	5
ABSTRACT	6
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	7
LISTA DE TABELAS	8
1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVO	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3. REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1. TRANSFERÊNCIA DE CALOR	15
3.1.1. Energia térmica	15
3.1.2. Condução	15
3.1.3. Convecção	15
3.2. ARREFECIMENTO DE ÁGUA	16
3.2.1. Sistemas de arrefecimento	17
3.3. TORRE DE ARREFECIMENTO DE ÁGUA	17
3.3.1. Funcionamento de torre de arrefecimento	17
3.3.2. Variáveis que influenciam no resfriamento em uma torre de arrefecimento	18
3.3.3. Resfriamento evaporativo	20
3.3.4. Teoria de Merkel	20
3.4. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE TORRES DE ARREFECIMENTO	21
3.4.1. Eficiência de acordo com a definição de capacidade do <i>Cooling Technology Institute (CTI)</i>	21
3.4.2. Modelo de eficiência	21
3.4.3. Modelo de efetividade	22
3.5. CARACTERÍSTICAS E PRODUÇÃO DE FIBRAS NATURAIS	22
3.5.1. Etapas de produção da fibra de sisal	23

3.6. MATERIAIS UTILIZADOS PARA PREENCHIMENTO	25
3.6.1. Propriedades e uso do PET (<i>tereftalato de etileno</i>).....	25
3.6.2. Coco.....	27
4. METODOLOGIA	29
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DE UMA TORRE DE ARREFECIMENTO	31
5.1.1. Coleta de dados do protótipo	36
5.1.2. O desempenho do protótipo	37
5.2. COMPARAÇÃO ENTRE MATERIAIS.....	38
6. CONCLUSÃO	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43

1. INTRODUÇÃO

A Termodinâmica é a ciência que estuda a energia, sendo uma de suas áreas o estudo do movimento dela, podendo esse movimento ser natural ou forçado. Esse deslocamento de energia pode ser para expandir ou comprimir, aquecer ou resfriar, “agitar” ou “acalmar” todo tipo de substâncias (BORGNAKKE; SONNTAG, 2018).

Como foi dito por Lavoisier, “Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma” e isso é um princípio básico da termodinâmica, os sistemas que são os objetos de estudo da termodinâmica, podem sofrer alterações em suas propriedades, como pressão, temperatura e volume, mas a energia nunca irá desaparecer. Como energia potencial se transforma em cinética, quando um copo cai da mesa. Ou no caso da temperatura, que um corpo mais quente está transferindo calor para o mais frio em um processo natural, com isso a energia que estava no corpo quente não foi perdida, apenas transferida em forma de calor (ÇENGEL; BOLES, 2013).

A transferência de calor vai existir naturalmente em um meio ou entre meios que possuam diferentes temperaturas, podendo haver três tipos de processos para que essa transferência ocorra, a condução, convecção e radiação. A condução é quando há variação de temperatura entre extremidades de um corpo ou entre dois ou mais corpos diferentes em contato, gerando um movimento de energia térmica do ponto ou corpo de maior temperatura para um de menor temperatura. A convecção existe quando um fluido em movimento entra em contato com alguma superfície, ela pode ser forçada onde há algum equipamento gerando fluxo no fluido e o “obrigando” a ter deslocamento e contato com a superfície. O outro modo de convecção é a natural, no qual o movimento é gerado através do empuxo, que é a diferença de densidade e temperatura do fluido fazendo-o se mover. E o ultimo modo de transferência de calor é a radiação térmica, que consiste na emissão de energia por todo corpo que esteja em uma temperatura diferente do zero absoluto (ou zero kelvin), que é de -273° Celsius, se um corpo está com uma temperatura superior a essa, ele emite radiação térmica. A principal diferença desse modo é que ele não precisa de um meio para que a energia se propague, é propagada por meio de ondas eletromagnéticas, sendo ainda mais eficiente no vácuo. Quando o calor é retirado de um meio ou corpo, o mesmo é refrigerado (INCROPERA *et al.*, 2007).

Segundo Stoecker e Jabardo (2018), a refrigeração industrial se difere principalmente dos condicionadores de ar para conforto por sua temperatura de

trabalho, no setor da indústria pode chegar a temperaturas de até 70 °C negativos, enquanto para o conforto se usa temperaturas acima de 15°C. Os equipamentos utilizados nos dois setores são basicamente iguais, tendo como diferença apenas a potência. Alguns desses equipamentos são o condensador, evaporador, compressor e válvulas de expansão. No condensador é onde o gás entra em alta temperatura e tem a necessidade de ser resfriado, havendo uma troca térmica com a água, aquecendo-a, essa água que foi aquecida no condensador precisa ser resfriada de alguma forma para que recomece o ciclo, então ela é enviada para um trocador de calor.

Em alguns processos industriais é necessário que haja redução de temperatura da água para que seja reutilizada ou descartada sem que ocorra algum tipo de agressão ao meio, por isso são utilizadas torres de arrefecimento (ARAÚJO, 2020).

As torres de arrefecimento possuem três classificações, podendo ser secas, úmidas ou mistas. As secas ou de sistema fechado, são aquelas onde não há o contato entre os dois fluidos. As úmidas ou de sistema aberto, os fluidos entram em contato, gerando a maior parte do resfriamento através do resfriamento evaporativo e as mistas onde os fluidos também não entram em contato, mas existe o resfriamento evaporativo (SAMPAIO, 2013).

As fibras vegetais são feitas principalmente de celulose e encontradas em diferentes plantas, como coco, bananeira, piaçava, bagaço da cana e sisal. A utilização das fibras vegetais possui algumas vantagens, entre elas estão, o baixo custo, resistência à temperatura, baixa densidade e como são encontradas em vários produtos naturais, existe em abundância. Dado que as fibras tem como característica a alta absorção de umidade, elas apresentam-se como boa opção de preenchimento de torres, já que é necessário criar uma dificuldade na passagem da água por ela (ALBINANTE; PACHECO; VISCONTE, 2013).

O sisal é uma planta adaptada para regiões semiáridas, pois ela tem uma capacidade alta de sobreviver em locais mais secos que têm escassez de chuvas ou uma precipitação anual baixa. É dessa planta que provém a fibra vegetal mais comercializada do mundo, o corte dela é feito nos períodos de maior temperatura

anual, por conta que é necessária a secagem ao sol, obtendo a fibra de sisal (OLIVEIRA, 2018).

A maior produção de fibra de sisal do Brasil está na Bahia e Paraíba sendo o Brasil maior produtor e exportador do mundo (em torno de 80% da produção é para exportação). Essa fibra é advinda da folha do sisal, que sofre processos de desfibramento, lavagem e secagem, nesses processos há perda de muita massa da folha, gerando resíduos diversos. Com ela pode-se produzir cordas, barbantes, tapetes, fios e também pode gerar produtos que serão utilizados na indústria marinha, por conta de suas propriedades de resistência mecânica, durabilidade e elasticidade (SILVA, 2020).

O objetivo desse trabalho é criar um protótipo de torre de arrefecimento, utilizando preenchimentos de fibra de sisal, para que possa fazer uma comparação entre outros materiais através da diferença de temperatura de entrada da água na torre com a de saída e utilizando os mesmos parâmetros calcular a eficiência do protótipo da torre.

A importância desse trabalho é para que seja feito um estudo em cima da fibra de sisal como preenchimento, por se tratar de um material sustentável, biodegradável e de baixo custo.

A torre de resfriamento é bastante utilizada na indústria em geral, sendo de suma importância para a refrigeração dos efluentes usados para os processos industriais.

A necessidade do resfriamento dos efluentes é importantíssima, pois se esses resíduos forem descartados no meio ambiente em altas temperaturas podem gerar problemas graves no ecossistema da área.

Os preenchimentos das torres podem ser feitos de materiais alternativos, que visam principalmente manter a eficácia de refrigeração e reduzir os custos, visto que esses materiais podem ser o vidro estilhaçado ou até mesmo a fibra de sisal.

O uso da fibra de sisal utilizada como preenchimento de torres de resfriamento é algo novo e a depender dos resultados obtidos com a eficácia da mesma, a Bahia pode utilizar para que haja diminuição de custos na construção de torres, visto que 95% da fibra é produzida no estado, tornando-a abundante no estado (OLIVEIRA, 2018 apud NAVES, 2013).

2. OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a eficiência de uma torre de resfriamento utilizando fibra de sisal como preenchimento.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Construir um protótipo de torre de arrefecimento.

Analisar o desempenho da torre a partir da equiparação das temperaturas.

Comparar a eficiência de refrigeração na torre de resfriamento utilizando diferentes quantidades de fibra de sisal.

Comparar a eficiência da fibra de sisal como preenchimento com materiais alternativos na bibliografia.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Por trás do funcionamento de uma torre de arrefecimento existem algumas propriedades termodinâmicas. Algumas dessas propriedades são a evaporação da água através da transferência de calor por condução, convecção natural e convecção forçada.

3.1. TRANSFERÊNCIA DE CALOR

3.1.1. Energia térmica

Segundo Çengel e Ghajar (2020) a energia térmica total é a soma entre a energia térmica sensível e a energia térmica latente, que nos estudos da termodinâmica, é chamada de calor. Segundo Bergman e Lavine (2019) o calor latente ocorre quando a temperatura de um corpo se mantém constante para que exista uma mudança de fase, como por exemplo a água quando está em processo de solidificação ela se manterá em 0 °C até que seja totalmente solidificada. O calor sensível é quando existe uma variação na temperatura e não há mudança de fase do corpo, como a água depois de totalmente solidificada se sua temperatura reduza ainda mais, o calor sensível também irá reduzir (BERGMAN; LAVINE, 2019).

3.1.2. Condução

Segundo Bergman e Lavine (2019) a condução é a transferência de calor devido a interação entre as moléculas que possuem uma maior energia para uma menos energética. Em líquidos e gases as moléculas mais energéticas possuem uma maior temperatura, gerando assim uma maior agitação, quando há esse movimento as moléculas se chocam, fazendo com que exista uma transferência de energia para suas vizinhas, em forma de calor, ocorrendo todo esse movimento de forma aleatória e desordenada. Quando a condução térmica ocorre nos sólidos quem faz essa transferência de calor são os elétrons livres, através de vibrações das moléculas.

3.1.3. Convecção

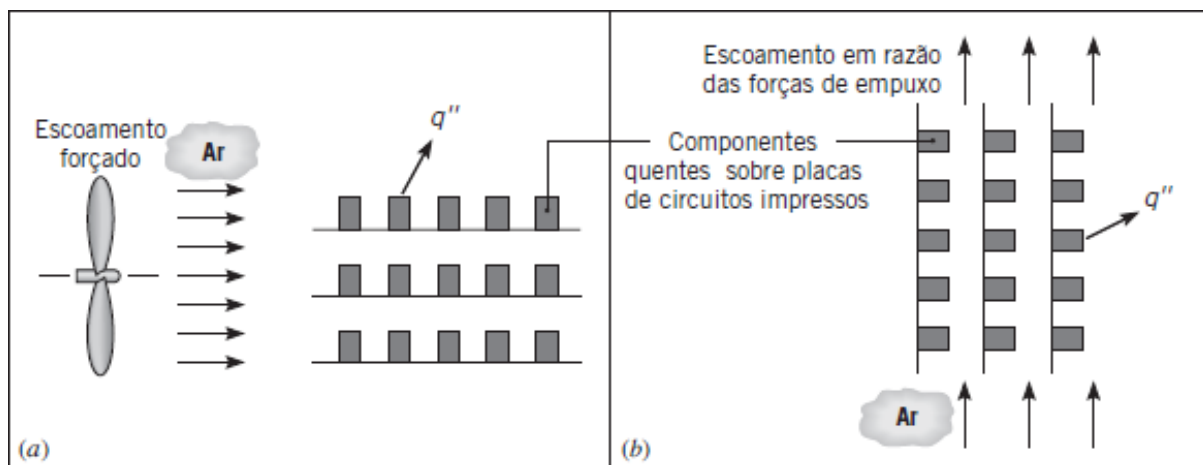
A transferência de energia em forma de calor entre sólidos e líquidos ou gases é chamada de convecção, para que ela ocorra é necessário que o fluido esteja em movimento, caso contrário terá apenas a condução. O aumento da transferência de

calor por convecção ocorrerá quando existir a maior quantidade de massa do fluido em movimento.

Existem dois tipos de convecção, forçada e natural, a convecção forçada é quando se utiliza de algum equipamento para que o fluido seja forçado a passar pela superfície desejada, podendo ser este equipamento para gases um ventilador ou para líquidos a utilização de bombas (ÇENGEL; GHAJAR, 2020). Em contra partida a convecção natural depende unicamente das forças de empuxo do fluido, sendo esse fenômeno criado por conta das diferentes temperaturas do fluido em um determinado local, gerando assim uma diferente massa específica para cada ponto do mesmo fluido. Essas diferentes temperaturas e massas específicas fazem com que os gases ou líquidos se mantenham constante movimento (BERGMAN; LAVINE, 2019).

O resfriamento de placas de circuito impressos é um exemplo que pode utilizar a convecção forçada ou natural, como pode ser visto na figura 1.

Figura 1. Processos de transferência de calor por convecção. (a) Convecção forçada, onde o ventilador força a passagem de ar pelas placas. (b) Convecção natural, o empuxo do ar gera movimento do ar.



Fonte: Bergman e Lavine, (2019).

3.2. ARREFECIMENTO DE ÁGUA

O arrefecimento da água pode se dar por alguns fatores, estando entre eles o descarte proibido em temperaturas elevadas, ou por conta de qual aplicação que a água teve ou porque essa alta temperatura pode agredir o meio ambiente em que for descartada. Por isso é necessário ter processos para que seja resfriada, tanto para o descarte como para o reuso, utilizando trocadores de calor. O princípio de funcionamento de trocadores de calor é bastante parecido, trata-se de tubos dentro de tubos, possuindo diâmetros e quantidade diferentes, podendo ter correntes nas

mesmas direções ou em direções contrárias. São utilizados para aquecerem ou resfriarem fluidos sem que exista contato direto entre eles. (MILLER, 2014)

3.2.1. Sistemas de arrefecimento

Segundo Ferreira, Schiller e Costa (2014) existem três tipos de sistemas de resfriamento, sendo divididos em abertos, semiaberto e fechados. Os sistemas abertos de arrefecimento ou de passagem única (*"once-throuth"*) são usados onde existe uma grande quantidade de água disponível para que ela faça o resfriamento do sistema, normalmente empregados no litoral. Essa água passa por um trocador de calor e é descartada ainda em altas temperaturas, gerando uma poluição térmica no local. A utilização quando há necessidade de uma elevada quantidade de água para o trocador de calor, são dos sistemas semiabertos, após a sair dos equipamentos que fazem a troca térmica, a água é resfriada. Esse resfriamento pode ser feito através de torres de arrefecimento, para que seja possível o seu reuso. Os sistemas fechados são utilizados quando não há grande demanda de água para fazer o arrefecimento, pois em um mesmo sistema ela é aquecida e resfriada, por dois trocadores de calor, fazendo com que não exista a necessidade de um grande reabastecimento.

3.3. TORRE DE ARREFECIMENTO DE ÁGUA

3.3.1. Funcionamento de torre de arrefecimento

A água quente que é proveniente de um trocador de calor ou algum processo industrial, chegando em uma torre com elevadas temperaturas, através de tubulações. Na parte interior da torre, conectados às tubulações existem pulverizadores, que fazem com que a água seja bem distribuída em gotícula. Acima das tubulações e pulverizadores há um mecanismo de exaustão, que faz com que o ar adentre a torre pela parte inferior e entre em contato com as gotículas pulverizadas (PEREIRA, 2017)

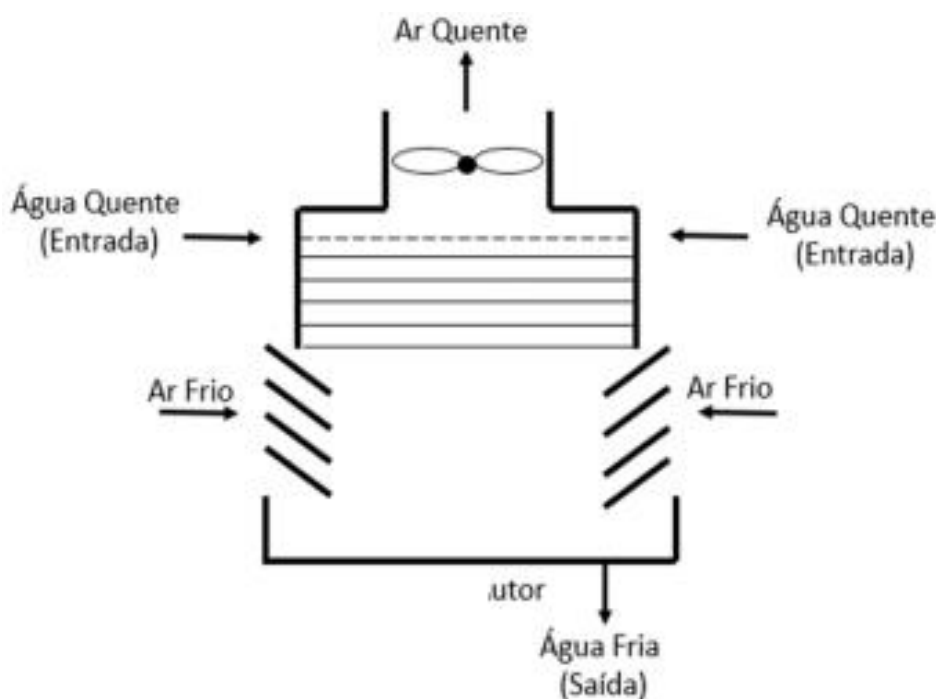
Na parte entre o centro e o inferior da torre fica localizado o preenchimento, que tem como papel criar uma resistência nas gotículas, para que elas consigam passar um tempo maior sobre o efeito da convecção forçada que é criada através do fluxo de ar que o exaustor gera (OLIVEIRA, 2012). Quando esse fluxo de ar entra em contato com as gotas, troca calor latente e calor sensível, sendo o calor latente responsável pela evaporação da água e o calor sensível pela redução da temperatura da que não será evaporada (SAMPAIO, 2013).

Na parte inferior da torre existem aberturas para que possa haver fluxo de ar, em menores temperaturas, no sentido contrário ao fluxo de água, que sempre estará sendo renovado. Pode-se projetar essas aberturas da torre para que o fluxo de ar

proveniente do vento adentre com maior facilidade e quantidade na torre (DOUNG *et al.*, 2018).

Pode ser visto na figura 2 o princípio básico de uma torre de arrefecimento utilizada no resfriamento de água para redução de temperatura de fluido refrigerante.

Figura 2. Funcionamento de uma torre de resfriamento. A água quente é aspergida na parte superior da torre e o ar frio entra na parte inferior sendo forçado subir pelo exaustor, troca calor com a água no preenchimento, fazendo com que na parte inferior da torre saia água fria e na parte superior, pelo exaustor, saia ar quente.



Fonte: Átila, Nascimento e Filho (2019).

3.3.2. Variáveis que influenciam no resfriamento em uma torre de arrefecimento

Segundo Ferreira, Schiller e Costa (2014) diferentes fatores podem influenciar na eficácia de processos distintos. Nas torres de arrefecimento não é diferente. A temperatura e a umidade do ar, a localização e até mesmo a estação. Como no inverno a temperatura do ar é menor, se for mantida a mesma vazão e temperatura de entrada da água, ela terá um maior resfriamento, ocorrendo o inverso no verão.

Além de fatores climáticos há também fatores quantitativos, como a vazão de água que é inserida na torre que se for mantido constante o fluxo de ar não haverá a mesma troca térmica por conta de uma maior quantidade de massa de água ou o fluxo de ar em contracorrente da água caso a vazão de água se mantenha constante e o fluxo de ar aumente ou diminua terá o mesmo efeito, a quantidade de preenchimentos

que estão sendo utilizados, por conta da dificuldade de passagem que está sendo imposta para a água e o ar (STAPENHORST, 2020). A temperatura de entrada na torre da água é mais um fator que influencia, assim também como o material que é produzido o preenchimento, que é uma parte importante, pois através dele que ocorre troca térmica, influenciando a depender do material que é produzido, o custo final da torre (JAYAPRABAKAR, 2015; TOMÁS *et al.*, 2018).

Outras variáveis importantes para o estudo e realização dos resultados neste trabalho, são elas temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, approach e range.

- Temperatura de bulbo seco (TBS): É a temperatura do ar no ambiente, pode ser medida por qualquer termômetro (BORDINHÃO, 2018).

- Temperatura de bulbo úmido (TBU): É a temperatura medida através de um termômetro, quando colocada uma gaze úmida na ponta do mesmo. Essa temperatura tem que ser menor que a TBS, por conta da evaporação da água da gaze, fazendo com que haja uma redução de temperatura, por conta do resfriamento evaporativo (BORDINHÃO, 2018).

- Approach: Esse termo utilizado em torres de resfriamento se dá a diferença de temperatura da água de saída torre de resfriamento e a temperatura de bulbo úmido (CORTINOVIS; SONG).

- Range: Esse termo é usado para definir a diferença de temperatura da água quente que entra na torre de resfriamento e a temperatura da água fria que sai da torre (CORTINOVIS; SONG).

Podem ser vistas como funcionam na operação da torre na figura 3.

Figura 3. Relação entre range e approach.



Fonte: Bordinhão (2018).

3.3.3. Resfriamento evaporativo

O resfriamento evaporativo é responsável pela maior redução de temperatura nas torres de arrefecimento de contracorrente, esse resfriamento evaporativo é um processo que ocorre depois que a água quente é lançada no interior da torre e o fluxo de massa de ar que é inspirado pelo exaustor para torre entram em contato (LIMA JUNIOR, 2011). Após isso uma parte da água recebe calor de outra parte, fazendo com que haja a evaporação de uma parte e a diminuição de temperatura da outra (PEREIRA, 2017)

3.3.4. Teoria de Merkel

A teoria de Merkel é utilizada em torres de arrefecimento considerando a transferência de calor e de massa, sendo a diferença de entalpia considerada a força motriz do processo (BORDINHÃO, 2018; ÁVILA; NASCIMENTO; FILHO, 2019). Nessa teoria são consideradas algumas hipóteses para que a análise seja simplificada, são elas:

- Fluxo de ar e água, as temperaturas e entalpias do ar são considerados em uma mesma seção horizontal da torre, constantes.
- O ar de entrada da torre, está na temperatura de bulbo úmido e saturado.
- Não há transferência de calor pelas paredes da torre, tornando-a adiabática.

Utilizando-se dessas simplificações existirá troca térmica somente entre o ar e a água, como a torre é um sistema adiabático, desprezará efeitos da radiação e convecção entre torre e a vizinhança (BORDINHÃO, 2018).

Segundo Ávila, Nascimento e Filho (2019) a Lei de Merkel é aplicada a partir do balanço de massa e energia que possuem correlação pela Equação (1).

$$Q = KS(hU - hA) \quad (1)$$

Sendo:

Q = calor transferido (J/s);

K = coeficiente global de transferência de massa (kg.s/m²);

S = superfície total na transferência de calor (m);

hU = entalpia da película de ar na temperatura da água (J/kg de ar seco);

hA = entalpia do ar não saturado (J/kg de ar seco);

E sabendo que:

$$Q = mCPdT \quad (2)$$

Juntando as Equações (1) e (2) e integrando, pode-se observar a Equação 3:

$$\frac{KaV}{L} = NUT = \int_{T_{UF}}^{T_{UQ}} \frac{c_L dT}{h_U - h_A} \quad (3)$$

Onde:

Os termos $\frac{KaV}{L}$ e NUT são parâmetros do coeficiente de desempenho de uma torre, sendo ele adimensional.

c_L = capacidade calorífica da água (J/kg.K);

T_{UQ} = temperatura de entrada da água (K);

T_{UF} = temperatura de saída da água (K);

h_U = entalpia da película de ar na temperatura da água (J/kg de ar seco);

h_A = entalpia do ar não saturado (J/kg de ar seco)

3.4. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE TORRES DE ARREFECIMENTO

Segundo Bordinhão (2018) dentro da indústria existem diferentes métodos para avaliar uma torre de arrefecimento, por isso existe uma dificuldade para criar um padrão nos modos da avaliação. Além disso os métodos mais conhecidos utilizam apenas a água como parâmetro, por ser de mais fácil monitoramento. A seguir, serão apresentados alguns desses modelos, sendo que cada um deles utilizam parâmetros diferentes.

3.4.1. Eficiência de acordo com a definição de capacidade do *Cooling Technology Institute (CTI)*

Esse modelo de eficiência pelo CTI é determinado pela capacidade térmica da torre de arrefecimento, que utiliza por padrão a norma ATC 105 para testes em torres de arrefecimento do CTI. De acordo com essa norma existem 5 métodos para calcular a eficiência de uma torre. Normalmente, esses métodos fazem uma comparação entre as condições em que a torre está sendo operada atualmente e especificações do preenchimento, que são dadas pelos fornecedores (COOLING TECHNOLOGY INSTITUTE, 2000).

3.4.2. Modelo de eficiência

Nesse modelo de eficiência utiliza-se como parâmetro a temperatura de bulbo úmido, tendo uma limitação de redução da temperatura de saída da água da torre de arrefecimento a igualdade com a temperatura de bulbo úmido (CHEMICAL ENGINEERING SITE, 2018). Sendo assim, a eficiência é calculada a partir da razão entre o range real ($T_{ent} - T_{sai}$) pelo range máximo ou ideal ($T_{ent} - T_{bulb\ umd}$), dado pela Equação 4.

$$\text{Eficiência (\%)} = \frac{T_{ent} - T_{sai}}{T_{ent} - T_{bulb\ umd}} * 100 \quad (4)$$

3.4.3. Modelo de efetividade

A utilização desse modelo tem uma relação com a eficiência da troca de calor em uma torre de arrefecimento, sendo a efetividade ϵ_a definida como a eficiência operacional de uma torre, mas utilizando parâmetros diferentes para a troca térmica, que são a massa de ar geradas pelos ventiladores em contracorrente da água quente, a temperatura de bulbo úmido, massa de água de entrada, saída e reposição, e temperatura de entrada e saída da água da torre, sendo definida pela Equação 5 (LIZARAZU, 2016).

$$\epsilon_a = \frac{\dot{m}_{agua.ent} T_{agua.ent} + \dot{m}_{agua.reposição} T_{água.reposição} - \dot{m}_{agua.sai} T_{sai}}{\dot{m}_{agua.sai} (T_{agua.ent} - T_{bulb\ umd})} \quad (5)$$

3.5. CARACTERÍSTICAS E PRODUÇÃO DE FIBRAS NATURAIS

As fibras naturais são oriundas de certos tipos de vegetação, por isso é considerado um produto renovável, pois são provenientes até de vegetação que necessita de uma baixa quantidade de água para sobreviver, além de serem completamente sustentáveis, por gerar substratos orgânicos e biodegradáveis (GUIMARÃES, 2014). As fibras naturais possuem alguns atributos como atoxidade, são biodegradáveis, baixo consumo de energia, baixa abrasividade e baixo custo (OLIVEIRA, 2011). Uma das fibras mais comercializadas no mundo é a de sisal que é produzida a partir da folha da planta sisal (*Agave sisalana*), original do México, mas é o Brasil que é o maior produtor do mundo. Por se tratar de uma planta que se adapta a regiões secas, a maior produção no Brasil é no Nordeste, sendo a Bahia o estado que mais produz (FREITAS *et al.*, 2018; FRANCKLIN *et al.*, 2019). A *Agave sisalana* pode ser vista na figura 4.

Figura 4. A planta sisal (*Agave sisalana*).



Fonte: EMBRAPA, 2014.

3.5.1. Etapas de produção da fibra de sisal

Sua produção é feita após a colheita do sisal, por se tratar de uma produção pouco mecanizada a colheita é feita por homens com facões ou foices fazendo o corte da planta, que é levada para o desfibramento, onde ela é posta em um equipamento chamado “motor de agave” ou “maquina paraibana”, fazendo a remoção através de raspagem mecânica (EMBRAPA, 2014).

Após passar pelo processo de desfibramento, as fibras com alta umidade é transportada para que seja lavada, no processo de lavagem elas são colocadas dentro de tanques com água, onde permanecem de 8 a 12 horas submersas, esse processo é feito durante a noite. Depois que ela é lavada irá ser secada, depois de retirada da água a fibra de sisal será colocada em varais, permanecendo de 8 a 10 horas em exposição ao sol (SILVA *et al.*, 2008). A secagem, a depender de onde a fibra será utilizada, pode ser o processo mais importante, pois é necessário que a fibra não possua água, porque na criação de compósitos utilizando-a, gerará poros (MILANESE; CIOFFI; VOORWALD, 2012). Esse processo pode ser visto na figura 5.

Figura 5. Processo de secagem da fibra de sisal.



Fonte: Agência USP, 2011.

Assim que terminado o processo de secagem da fibra ela é transferida para que possa ser limpa, dentro de bateadeiras que fazem com que tire todo o pó que não agrega valor e também as fibras mais curtas, esses substratos podem ser utilizados de outra maneira, como o adubo orgânico para a utilização do pó e a produção de celulose para as fibras curtas (SILVA *et al.*, 2008).

Segundo Silva (2008) as fibras são divididas em quatro classes que levam em consideração o comprimento das fibras, sendo divididas em curtas que possuem de 60 a 70 centímetros, médias que tem entre suas extremidades 70 a 90 centímetros, longas possuem de 90 a 110 centímetros e as extra-longas possuindo um comprimento superior a 110 centímetros.

Também são divididas em quatro tipos que levam em consideração a qualidade das fibras, sendo eles o superior, um, dois e três. Essa divisão é feita através de características que tornam a fibra de menor ou maior qualidade, essa qualificação pode ser vista no quadro 1.

Quadro 1 – Características e tipos das fibras, criando uma ligação entre eles.

CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS	TIPO SUPERIOR	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3
Coloração creme claro	x	x		
Coloração amarelada		x	x	x
Coloração pardacenta			x	x
Ótimo estado de maturação, brilho resistência e maciez	x	x		

Bom estado de maturação, brilho resistência e maciez			x	x
Ligeiramente ásperas			x	
Ásperas				x
Umidade máxima de 13,5%	x	x	x	x
Soltas e desembaraçadas, isentas de impurezas, estраçamentos, nós e cascas	x	x	x	x
Isentas de substâncias pécticas e quaisquer outros defeitos	x	x		
Isenta de manchas	x			
Manchas com pequena variação em relação coloração		x		
Manchas esverdeadas			x	x
Manchas pardacentas ou avermelhadas				x
Secas, bem batidas	x	x	x	x

Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2008).

A fibra que não obtiver essas qualificações ou um comprimento mínimo de 60 centímetros será considerada refugo.

3.6. MATERIAIS UTILIZADOS PARA PREENCHIMENTO

Há vários estudos sobre diferentes tipos de materiais que podem ser utilizados como preenchimento em uma torre de arrefecimento, entre eles estão os polímeros, biomateriais e compósitos.

3.6.1. Propriedades e uso do PET (*tereftalato de etileno*)

O PET é um polímero da família do poliéster, possuindo uma vasta área de aplicação, sendo o mais conhecido a produção de garrafas para refrigerantes, mas usado também para garrafas de produto de limpeza, sucos integrais, entre outros. O PET como películas tem como propriedade a alta resistência mecânica, nessa forma é utilizada no setor eletrônico, para isolamento de capacitores (OLIVEIRA, 2012).

Segundo Oliveira (2012) o PET possui subclassificações de acordo com sua forma de fabricação, formação cristalina e propriedades mecânicas, sendo elas o OPET, APET e CPET.

- OPET: PET orientado, sofre um estiramento antes que ocorra o sopro da garrafa, provocando uma maior cristalização, fazendo com que aumente suas propriedades de barreira e resistência mecânica.
- APET: PET amorfo, não sofre um estiramento, fazendo com que tenha uma menor cristalização e não possua orientação, por conta disso apresenta propriedades de barreira inferiores ao OPET e também menor resistência mecânica. Entretanto, possui muito brilho e transparência. É bastante utilizado na indústria de termo formados.
- CPET: PET cristalino, possui uma alta cristalização por conta de aditivos que são inseridos na sua produção, por ter uma alta cristalização se torna opaco, sendo termicamente estável pode ser aquecido e resfriado e não perde suas propriedades.

O PET pode ser um bom substituto para o enchimento de torres, por ter uma propriedade importante igual ao PVC, material que a ALPINA produz seus enchimentos, que é a temperatura de amolecimento, podendo utilizar tiras, fios ou gargalos de garrafas produzidas de PET, como pode ser visto nas figuras 6 e 7 (OLIVEIRA, 2012).

Figura 6. Fios de PET.



Fonte: Oliveira, 2012.

Figura 7. Gargalo de garrafa PET.



Fonte: adaptado da página do site Ohoh Deco, 2012.¹

3.6.2. Coco

O coco é o fruto originado do coqueiro (*Cocos nucifera Linnaeus*), sendo uma planta que gera minerais, gorduras, vitaminas essenciais e o óleo, sendo ele utilizado em larga escala nas indústrias alimentícias, de cosméticos, de materiais de limpeza e até mesmo na produção de fluido de freio de aviões (OLIVEIRA, 2012).

Além disso, a casca do coco também é responsável por ser a matéria prima de alguns produtos, como tapetes e cordas, por conta disso é bastante importante para sociedade, nas regiões onde é encontrada (OLIVEIRA, 2012).

Segundo Oliveira (2012) a casca do coco é onde fica localizada a fibra, no mesocarpo da casca sendo mais específico, onde as fibras são mais grossas e duras, possuindo aparência física com a do sisal, como pode ser visto na figura 8.

Figura 8. Fio de fibra de coco.



Fonte: Oliveira, 2012

¹ Disponível em: < <https://www.ohohdeco.com/diy-lampshade-pantalla/>>. Acesso em: 15 de dez. 2021.

A fibra do coco possui boas propriedades como resistência a umidade, boa resistência mecânica, baixa condutividade térmica, sendo essa uma boa propriedade por ter suas maiores aplicações no artesanato, tem ação fungicida e classificação ao fogo B2, ou seja, em caso de incêndio já desenvolvido, não há contribuição significativa para o desenvolvimento do fogo e nem para o aumento da carga térmica (OLIVEIRA, 2012)

Além de todas essas propriedades tem o benefício de se tratar de um produto biodegradável, sendo bastante importante para evitar poluição ambiental. Em contrapartida a casca está sendo tratada como resíduo, por ter um tempo de degradação alto, mas é necessário uma mudança para que comece a ser tratada como matéria prima, como por exemplo o artesanato (OLIVEIRA, 2012), mostrado na figura 9.

Figura 9. Tigela feita com casca de coco.



Fonte: Adaptado da página do site casa.com.br².

² Disponível em: < <https://casa.abril.com.br/sustentabilidade/faca-voce-mesmo-tigelas-com-casca-de-coco/>>. Acesso em: 15 de dez. 2021.

4. METODOLOGIA

O método utilizado nesse trabalho quanto a natureza foi aplicada, pois usou-se aplicações práticas para que possa solucionar os problemas propostos. Quanto ao objetivo buscou fazer uma junção entre os métodos descritivos e explicativos, usando o descritivo para mostrar o funcionamento de cada equipamento, fenômenos e processos e o explicativo para que tenha uma maior profundidade de compreensão desses fenômenos.

A princípio a construção do protótipo da torre de resfriamento foi feita a partir de tubo de PVC para que seja utilizado como o revestimento, em uma das extremidades desse tubo foi colocado um cooler de computador para que faça o papel do exaustor na torre, fazendo uma passagem forçada de ar da parte inferior da torre para parte superior, havendo assim uma troca térmica entre o ar e a água.

Para o bombeamento dessa água do reservatório para o sistema utilizou-se bomba de aquário, junto com uma tubulação de silicone para que seja possível ter uma melhor irrigação de água dentro da torre.

Foi colocada no reservatório uma resistência elétrica, para que possa aquecer a água antes do bombeamento para o sistema. Em outra extremidade do tubo foi colocado um preenchimento da torre feito de fibra de sisal, com os mesmos tubos utilizados para o revestimento, foram abertos cortes para que aumente a capacidade de troca térmica entre o ar e água aquecida, e uma luva de tubo de PVC foi utilizada para que fizesse a união do cano de revestimento com o tubo com os cortes.

Quanto ao procedimento a pesquisa foi experimental, pois houve uma observação, medição e registro de variáveis do processo, juntamente com um estudo de caso, pois existiu um aprofundamento nas características da fibra de sisal para que ela pudesse ser usada como preenchimento.

Quanto a abordagem do problema a pesquisa utilizou-se de uma análise qualitativa, pois teve um estudo de dados numéricos e esses dados mostraram que o material possui características desejáveis para que possa ser aplicado em pequenas escalas. Com a pesquisa feita eu utilizei em média 50 artigos, mas nem todos precisaram ser citados por conta de os assuntos serem iguais, para a comparação entre a fibra de sisal e os materiais alternativos utilizei de dois estudos de Tomás *et al.* (2018) e Oliveira (2012) por trazerem materiais que possuem características e propriedades parecidas com a fibra de sisal. Infelizmente não foi encontrado trabalho com vazões de água e ar próximas deste, para que também pudessem ser

comparados. Neste trabalho foram feitos seis testes, três por dias consecutivos, em horários específicos, sendo feitos entre 10 e 11 horas, entre 15 e 16 horas e entre 21 e 22 horas, os resultados dos testes foram parecidos entre todos eles e foi escolhido para gerar a tabela dos resultados o horário que obteve maior eficiência e foram realizados todos os testes na mesma localização e posição.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esse tópico será destinado a apresentar os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados no protótipo construído, visto que nesse estudo o método de analisar a torre de arrefecimento foi o modelo de eficiência, que leva em consideração o range da torre e a temperatura de bulbo úmido.

5.1. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DE UMA TORRE DE ARREFECIMENTO

A construção do protótipo é de suma importância para o trabalho em questão, por conta de falta de disponibilidade de modelos industriais para que pudesse fazer os experimentos necessários. Para a construção fez-se a aquisição dos materiais listados a seguir:

- 2 metros de tubo PVC de 150mm de diâmetro – Como corpo da torre de arrefecimento;
- 1 Bomba Sarlo better S300 com 280L/h de vazão e 0,89 m de coluna d'água;
- 1 Cooler Fan de 120mm de alta potência com 2000 RPM – Como exaustor;
- 0,5 kg da bucha de fibra de sisal – Como preenchimento;
- 1 luva simples e um Cap tampão de PVC de 150mm;
- 2 metros de mangueira de silicone – Como tubulação;
- 1 balde de 20 litros – Como reservatório;
- 1 m² de tela;
- 1 balança de precisão com variação de 1 grama;
- 2 termômetros tipo agulha com variação de 0,1 °C;
- 1 adaptador de P4

E para a construção utilizou-se algumas ferramentas, como serra mármore, furadeira e agulha.

Para iniciar o tubo foi cortado utilizando a serra mármore em tamanhos de 0,7 e 0,5 metros, após isso utilizando a mesma ferramenta foram feitos cortes longitudinais para que pudesse existir entrada de ar e foi encaixada a luva simples em uma das extremidades, como na figura 10.

Figura 10. Base do protótipo da torre de arrefecimento, a parte superior é a luva que uniu a base com o corpo da torre, a base aberta serve para a entrada de ar frio na parte inferior da torre.



Fonte: Autor, 2021.

Após isso utilizou-se a furadeira para fazer furos na outra peça de tubo, que foi usada o corpo da torre e um furo no balde que foi utilizado como reservatório de água quente, dentro dos furos da peça foi introduzida a mangueira com pequenos cortes para criar gotejamento e filamentos de água, sendo responsável pelo transporte e pulverização da água quente no corpo da torre, podendo ser visto na figura 11.

Figura 11. Corpo da torre é o cano de PVC com 150mm de diâmetro, tubulação a mangueira de silicone que sai do reservatório para o corpo da torre e reservatório de água quente do protótipo da torre foi utilizado um balde preto de 20 litros.



Fonte: Autor, 2021.

A bomba foi colocada no interior do reservatório e conectada a tubulação do sistema, por se tratar de uma bomba com uma baixa capacidade em relação a coluna d'água o reservatório foi colocado a uma altura superior à altura onde as tubulações são posicionadas no corpo, podendo visualizar anteriormente na figura 6. O modelo da bomba pode ser visto na figura 12.

Figura 12. Bomba utilizada no protótipo.



Fonte: Autor, 2021.

Utilizando o cooler e o tampão de PVC foi feita a parte superior do protótipo que fez o papel de exaustor da torre, utilizando a serra mármore foi feito um corte com o diâmetro de 120mm, para que o cooler tivesse contato com a massa de ar do interior da torre, como pode ser visto na figura 13.

Figura 13. Exaustor do protótipo.



Fonte: Autor, 2021.

A balança de precisão foi usada para medir a gramatura exata da bucha da fibra de sisal que foi utilizada como preenchimento, por conta de que um dos objetivos dos estudos é analisar a eficiência do protótipo com diferentes gramaturas de recheio, que será colocado na parte inferior do corpo do protótipo, visto anteriormente na figura 11. A medição para complementar a quantidade correta do estudo é apresentada na figura 14.

Figura 14. Bucha da fibra de sisal sendo pesada.



Fonte: Autor, 2021.

Após a construção individual de cada parte do protótipo foi feita a montagem e a conexão elétrica dos equipamentos que eram necessários, para que os experimentos pudessem ser feitos, o protótipo da torre de arrefecimento pode ser visto na figura 15.

Figura 15. Protótipo da torre de arrefecimento, o exaustor está na parte mais superior da torre conectado ao tampão que faz a conexão com o corpo da torre, onde fica a tubulação e o preenchimento e a luva faz a conexão do corpo com a base da torre.



Fonte: Autor, 2021.

5.1.1. Coleta de dados do protótipo

O passo seguinte ao funcionamento do protótipo é coletar e analisar os dados. Por se tratar de um estudo voltado apenas para as temperaturas, foi utilizado o modelo

de eficiência que já foi descrito anteriormente na subseção 4.4.2. Apresentando os outros modelos apenas a nível de informação.

Para a medição das temperaturas de entrada e saída da água e de bulbo úmido e seco, foram utilizados termômetros tipo agulha, como demonstrada na figura 16.

Figura 16. Termômetros agulha medindo as temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco.



Fonte: Autor, 2021.

5.1.2. O desempenho do protótipo

Segundo Ávila, Nascimento e Filho (2019) para que a torre tenha um bom desempenho é preciso que esteja em um intervalo de eficiência de $\pm 20\%$ do valor do projeto da torre que para o trabalho em questão foi utilizado 75% como parâmetro, sendo assim a eficiência deve estar entre 55% e 95% para que a eficiência seja satisfatória.

Após a coleta dos valores de todas das temperaturas e com as diferentes gramaturas de fibra, utilizou-se a Equação 4 para que pudesse calcular a eficiência, sendo apresentada na tabela 1.

Tabela 1. Dados do projeto.

Gramatura de fibra de sisal (g)	Temperatura de entrada da água (°C)	Temperatura de saída da água (°C)	Temperatura de bulbo úmido (°C)	Eficiência (%)
60g	51,5	34,6	26,6	67,87
100g	51,1	31,3	26,3	79,84
170g	51,5	31,1	26,6	80,95
250g	53,2	32,4	25,9	76,19

Como visto na tabela 1, os resultados da eficiência foram dentro dos parâmetros exigidos para que o protótipo da torre possua um bom desempenho, visto que a faixa de melhor desempenho foi utilizando entre 100 e 170 gramas. O pior desempenho do estudo foi com a menor gramatura de preenchimento (60 gramas), pois não conseguiu gerar a resistência necessária na passagem da água por ele, havendo pouca troca térmica entre o ar e água no interior do protótipo. Na maior gramatura utilizada como recheio (250 gramas) houve uma queda de eficiência, isso pode ter ocorrido pela potência insuficiente do exaustor para fazer com que a massa de ar ideal adentrasse na torre de resfriamento, dado que a vazão de água em todos os experimentos foi a mesma.

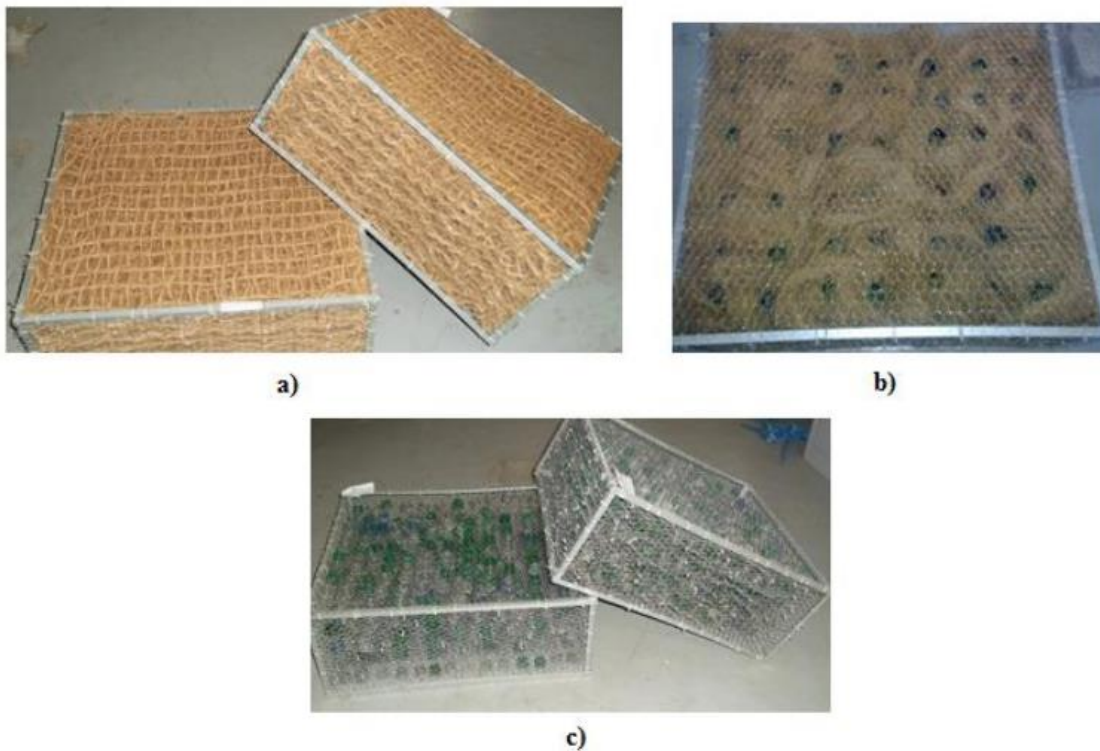
5.2. COMPARAÇÃO ENTRE MATERIAIS

Como já foi citado em subseções anterior existem vários métodos de avaliação de uma torre de arrefecimento e também muitas variáveis que podem modificar o desempenho de uma torre de resfriamento. Sendo assim a comparação será feita utilizando apenas a temperatura de resfriamento da água.

No trabalho de Tomás *et al.* (2018) foi utilizado fibra de coco, gargalo de PET, tiras de PET e um recheio industrial como preenchimento, também fazendo junção de materiais e fazendo rearranjos diferentes entre eles, sendo:

- Preenchimento de fibra de coco cruzada, visto na figura 17a;
- Recheio combinando fibra de coco solta e gargalo de PET, visto na figura 17b;
- Preenchimento de gargalo de PET em camadas, visto na figura 17c;

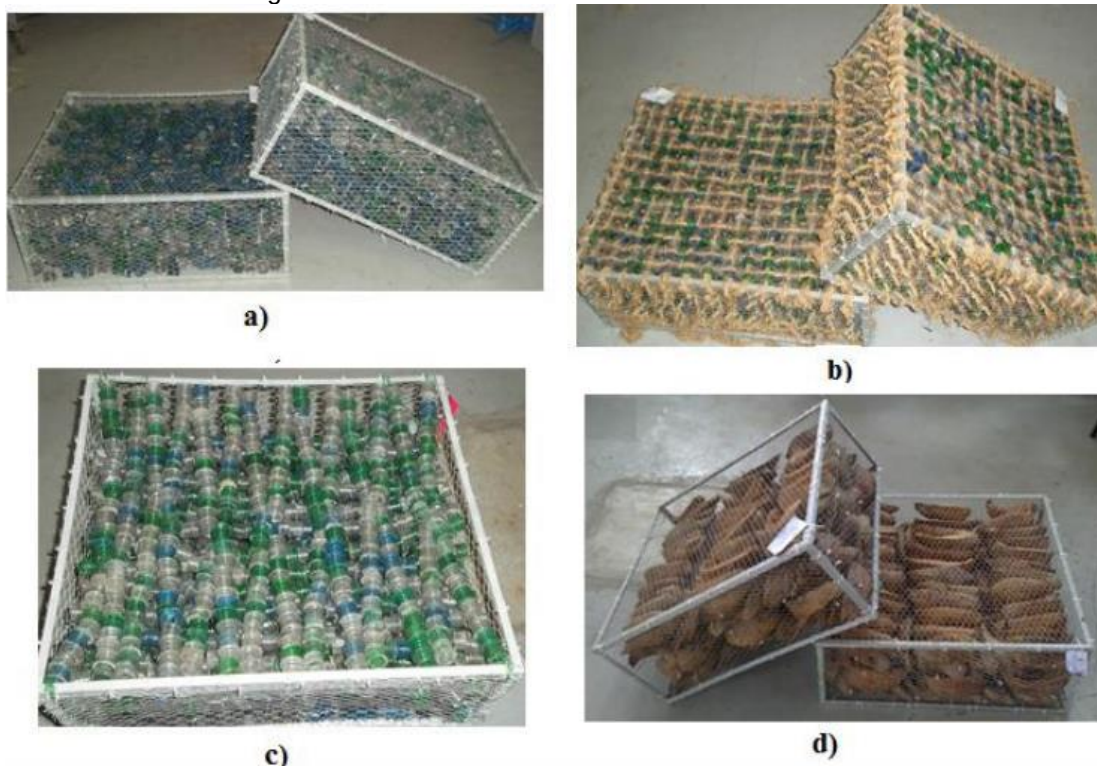
Figura 17. Preenchimentos de materiais alternativos 01.



Fonte: Tomás *et al.* (2018).

- Recheio de gargalo de PET soltos, visto na figura 18a;
- Preenchimento de fibra cruzada com gargalo de PET, visto na figura 18b;
- Recheio de tira de PET com gargalo de PET, visto na figura 18c;
- Preenchimento de casca de coco, visto na figura 18d;

Figura 18. Preenchimentos de materiais alternativos 02.



Fonte: Tomás *et al.* (2018).

Os setores industriais precisam resfriar a água em 8°C e no seu estudo os preenchimentos alternativos ao industrial são viáveis como preenchimento, apesar do industrial ter um resultado 20% melhor que recheio alternativo que teve maior resfriamento, que foi feito de tiras de PET com gargalos de PET (fig. 18c). O preenchimento de fibras de coco soltas e o de gargalos de PET teve seu desempenho menor por conta da dificuldade na passagem da massa de ar (TOMÁS *et al.*, 2018).

O estudo de Tomás *et al.* (2018) reforça a eficiência do protótipo da torre feito no presente trabalho, além de comprovar que a utilização de uma gramatura maior de fibra de sisal foi responsável pela resistência da massa de ar e diminuição da troca térmica e consequentemente da eficiência da torre. Utilizando o modelo de eficiência nos dois estudos foi visto que o desempenho da torre será maior quando houver o menor *approach*, como apresentado na tabela 2.

Tabela 2. Relação entre *approach*, gramatura de fibra e eficiência.

Diferença de temperatura saída da água e temperatura de bulbo úmido (°C)	Gramatura da fibra de sisal (g)	Eficiência (%)
4,5	8	80,95
5	5	79,84
6,5	4,5	76,19
8	6,5	67,87

Fonte: Autor, 2021.

De acordo com a tabela 2, a eficiência de torres de arrefecimento são inversamente proporcionais ao valor de approach resultantes de seu funcionamento, demonstrando também que quanto mais próximo o valor da temperatura da água de saída da torre estiver da temperatura de bulbo úmido a torre tem o seu melhor desempenho.

Os melhores valores de resfriamento no estudo de Tomás et al. (2018) foram com o preenchimento industrial, utilizando quaisquer que fossem os métodos, mas ainda assim tendo uma eficiência e resfriamento menor que os encontrados por meio do protótipo construído para este trabalho.

A diferença entre esses valores pode ser por conta das constantes no presente trabalho, como por exemplo a vazão da água, que utilizando a taxa de fluxo de água é possível saber que a vazão volumétrica no estudo citado no parágrafo anterior, podendo chegar a ser 3.600 vezes maior que a vazão do protótipo.

6. CONCLUSÃO

Pelos resultados obtidos nesse trabalho, a utilização da fibra de sisal como preenchimento tem potencial para torres de arrefecimento, mostrado neste estudo que possui boa eficiência e bom desempenho, chegando a ter redução na temperatura da água de entrada para a água de saída de 20,4°C em seu maior rendimento estudado.

Como os resultados foram positivos, pode vir a ser uma alternativa viável para a refrigeração em torres de resfriamento, além de ser um material biodegradável reduzindo a poluição ambiental, evitando o descarte de preenchimento industrial que normalmente é produzido de polímeros.

Este estudo faz contribuição para sistemas de refrigeração térmica utilizando água e faz a sugestão para que a fibra de sisal seja usada como preenchimento em torres de arrefecimento. E sugere a estudos futuros para examinarem a fibra de sisal de diferentes qualidades, citadas no quadro 1, e fazer diferentes tipos de arranjos combinando com outros materiais. E faz a sugestão para que use torres de resfriamento de nível industrial para que possa coletar os dados de mais parâmetros, para observar se é eficiente em maior escala.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A., C. Y. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**. Porto Alegre: Grupo A, 2020. 9788580551280. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#!/books/9788580551280/>. Acesso em: 10 May 2021

A., Ç.Y.; A., B.M. **Termodinâmica**. Porto Alegre: Grupo A, 2013. 9788580552010. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#!/books/9788580552010/>. Acesso em: 18 May 2021

ALBINANTE, S. R.; PACHECO, E. B. A. V.; VISCONTE, L. L. Y. A review on chemical treatment of natural fiber for mixing with polyolefins. **Química Nova**, Rio de Janeiro - RJ, v. 36, n. 1, p. 114-122, 2013.

ARAÚJO, S. D. O. **ANÁLISE EXPERIMENTAL E SIMULAÇÃO EM CFD DE UM ENCHIMENTO ALTERNATIVO PARA TORRES DE RESFRIAMENTO**. Orientador: Dr. José Carlos Charamba Dutra. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PERNAMBUCO, Recife - PE, 2020.

ÁVILA, J. S.; NASCIMENTO, L.; FILHO, S. Á. DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA AVALIAR A EFICIÊNCIA DE UMA TORRE DE RESFRIAMENTO. **CONIMAS**, [s. l.], 2019. Disponível em: https://www.editorarealize.com.br/editora/anais/conimas-e-conidis/2019/TRABALHO_EV133_MD1_SA39_ID1723_07112019191019.pdf. Acesso em: 13 dez. 2021.

BORDINHÃO, C. **AVALIAÇÃO OPERACIONAL DA TROCA DE RECHEIO DE UMA TORRE DE RESFRIAMENTO**. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Química) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, Porto Alegre - RS, 2018.

BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R.E. **Fundamentos da termodinâmica**. São Paulo: Editora Blucher, 2018. 9788521207931. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#!/books/9788521207931/>. Acesso em: 18 May 2021

CHEMICAL ENGINEERING SITE. **Cooling Tower Efficiency Calculations**. 2018. Disponível em: < Cooling Tower Efficiency Calculations - Chemical Engineering Site>

COOLING TECHNOLOGY INSTITUTE. **Acceptance Test Code for Water Cooling Towers**. , 2000.

CORTINOVIS, G. F.; SONG, T. W. **Funcionamento de uma Torre de Resfriamento de Água**.

L., B. T. **Incropera - Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2019. 9788521636656. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#!/books/9788521636656/>. Acesso em: 10 May 2021

DUONG, S.; CRAVEN, R.; GARNER, S. Measurements of spray water evaporation rates for an inflatable fabric duct cooling tower. **ASHRAE Transactions**, v. 126, p. 857-869, 2020.

FRANCKLIN, H. M., MOTTA, L. A. C., CUNHA, J., SANTOS, A. C., & LANDIM, M. V. **Study of epoxy composites and sisal fibers as reinforcement of reinforced concrete structure**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 12(2), 255–287, 2019. doi:10.1590/s1983-41952019000200004

FREITAS, A. B. T. M.; SANTOS, A. M. B.; SANTOS, J. P. P.; SOUZA, J. S.; MIELEZRSKI, F. DESENVOLVIMENTO DE Agave sisalana Perrine SOB DIFERENTES MANEJOS DE ADUBAÇÃO E CONSÓRCIO. **Colloquium Agrariae**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 39-46, 2018.

FERREIRA, C. K.; SCHILLER, M.; COSTA, P. R. **DESENVOLVIMENTO DE UMA TORRE AUTOMATIZADA PARA O RESFRIAMENTO DE ÁGUA**. Orientador: Rosângela Winter. 2014. Trabalho de conclusão de curso (Tecnologia em Automação Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba - PR, 2014.

GUIMARÃES, B. M. G. **Estudo das características físico-químicas de fibras têxteis vegetais de espécies de Malvaceae**. Orientador: Dr^a Júlia Baruque Ramos. 2014. Dissertação (Mestre em Ciências) - Escola de Artes, Ciências e Humanidade da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2014.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC, 2007.

JAYAPRABAKAR, J. Experimental Investigation on the effect of Fill materials in Cooling Towers. **AMM**, India, v. 766-767, p. 505-510, 2015.

LIMA JUNIOR, R. C. **MODELAGEM FENOMENOLÓGICA DO DESEMPENHO DE TORRES DE RESFRIAMENTO DE ÁGUA ACOPLADAS E ESTUDO DE CASOS**. Orientador: Dr. José Luís de Paiva. 2011. Dissertação (Mestre em Engenharia Química) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2011.

LIZARAZU, M. S. D. **Otimização multiobjetivo aplicada a eficiência energética de Torres de Resfriamento**. 2016. [s. l.], 2016.

MILANESE, A. C.; CIOFFI, M. O. H.; VOORWALD, J. C. Thermal and mechanical behaviour of sisal/phenolic composites. **Composites: Part B** 43, Guaratinguetá - SP, p. 2843-2850, 2012.

OLIVEIRA, A. C. C. T. **ESTUDO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA O ENCHIMENTO DE TORRES DE RESFRIAMENTO**. Orientador: Ana Rosa Mendes Primo. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PERNAMBUCO, Recife - PE, 2012.

OLIVEIRA, A. F. L. **DESENVOLVIMENTO DE PLANTAS DE SISAL EM MANEJO SUSTENTÁVEL NO CURIMATAÚ PARAIBANO OCIDENTAL**. Orientador: Dr.

Fabio Mielezrski. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Agrônômica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA, Areia - PB, 2018.

OLIVEIRA, R. S. **Análise experimental e numérica da eficiência de resfriamento de painéis de fibras vegetais utilizados em sistemas de resfriamento evaporativo**. Orientador: Ana Rosa Mendes Primo. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PERNAMBUCO, Recife - PE, 2011.

PEREIRA, J. M. **AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO PAINEL DE PLÁSTICO PET PARA RESFRIAMENTO EVAPORATIVO**. Orientador: Mario Benjamin Siqueira. 2017. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, Brasília - DF, 2017.

REX, M.; MARK, M. **Ar-Condicionado e Refrigeração, 2ª edição**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2014. 978-85-216-2612-1. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#!/books/978-85-216-2612-1/>. Acesso em: 18 May 2021

SAMPAIO, F. S. **TORRE DE RESFRIAMENTO: MODELAGEM, SIMULAÇÃO E TESTES EXPERIMENTAIS PARA APOIO AO ENSINO DE ENGENHARIA MECÂNICA**. Orientador: João Manoel Dias Pimenta. 2013. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE DE BRASILIA, Brasília - DF, 2013.

SILVA, J. **PRODUÇÃO DE BIOCOMPOSTOS POR Rhodotorula mucilaginosa UTILIZANDO O HIDROLISADO DO SISAL (Agave sisalana) COMO SUBSTRATO**. Orientador: Dr. Flávio Luiz Honorato da Silva. 2020. Tese de doutorado (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos.) - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA, João Pessoa - PB, 2020.

SILVA, O. R. R. F. et al. **Cultivo do Sisal no Nordeste Brasileiro**. Campina Grande - PB: EMBRAPA, 2008. 24 p.

SILVA, O. R. R. F. **Cadeia Produtiva do Sisal no Nordeste Brasileiro**. [S. l.]: Odilon Reny Ribeiro Ferreira Silva, 2014. Disponível em: https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_lifecycle=0&p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducaolf6_1ga1ceportlet&p_p_col_count=1&p_p_col_id=column-2&p_p_state=normal&p_r_p_-76293187_sistemaProducaoId=3716&p_r_p_-996514994_topicId=3255&p_p_mode=view. Acesso em: 24 maio 2021.

STAPENHORST, R. **TORRE DE RESFRIAMENTO INDUSTRIAL AUTOMATIZADA**. Orientador: Prof. Dr. Eng. Maurício de Campos. 2020. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL – UNIJUI, Ijuí - RS, 2020.

Tomás, A. C. C., Araujo, S. D. O., Paes, M. D., Primo, A. R. M., Da Costa, J. A. P., & Ochoa, A. A. V. Experimental Analysis of the Performance of New Alternative Materials for Cooling Tower Fill. Applied Thermal Engineering, 2018.

Wilbert, J. **Refrigeração industrial**. São Paulo: Editora Blucher, 2018.
9788521212652. Disponível em:
<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#!/books/9788521212652/>. Acesso em: 18
May 2021