



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA - DEMEC



ALINE DE PAULA RAFAEL

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA ALTERNATIVO
DE RESFRIAMENTO DE AR DE BAIXO CUSTO**

**OURO PRETO - MG
2019**

ALINE DE PAULA RAFAEL
aline_depaularafael@yahoo.com.br

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA ALTERNATIVO
DE RESFRIAMENTO DE AR DE BAIXO CUSTO**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: DSc. Luís Antônio Bortolaia

**OURO PRETO – MG
2019**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R136e Rafael, Aline de Paula .
Estudo experimental do desempenho de um sistema alternativo de resfriamento de baixo custo.. [manuscrito] / Aline de Paula Rafael. - 2020.
67 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Luís Antônio Bortolaia.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas.

1. Controle de temperatura . 2. Meios de transferência de calor . 3. Massa - Transferência. 4. Resfriamento evaporativo. I. Bortolaia, Luís Antônio. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB:1716



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA

Aos 05 dias do mês de dezembro de 2019, às 17h, na sala 28, localizada na Escola de Minas – Campus - UFOP, foi realizada a defesa de Monografia da aluna **Aline de Paula Rafael**, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: DSc. Elisângela Martins Leal, MSc. Sávio Sade Tayer e DSc. Luís Antônio Bortolaia. A candidata apresentou o trabalho intitulado: “**Estudo experimental do desempenho de um sistema alternativo de resfriamento de ar de baixo custo**”, sob orientação do Profº. Luís Antônio Bortolaia. Após as observações dos avaliadores, em comum acordo, os presentes consideram a aluna aprovada.

Ouro Preto, 05 de dezembro de 2019.

Profº. DSc. Luís Antônio Bortolaia
Orientador

Profº. DSc. Elisângela Martins Leal
Avaliador 1

Profº. MSc. Sávio Sade Tayer
Avalidador 2

Aline de Paula Rafael
Aluna

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus por tornar possível a realização desse sonho. Aos meus pais pelo amor incondicional e por nunca terem medido esforços. Minha mãe, maior fonte de amor e alegria do mundo e meu pai, meu exemplo de caráter e dedicação inesgotável, amo vocês. À minha família pelo incentivo. À UFOP pelo ensino gratuito e de qualidade. Aos professores Éden, Elisângela, Mateus, Sávio e Washington pela dedicação. Ao meu orientador Luís Antônio Bortolaia, pelo incentivo e orientação neste trabalho. Aos amigos pelo apoio diário, vocês tornaram tudo mais leve e possível. À República Doce Mistura - divisor de águas na minha vida - pelos anos de intenso aprendizado e amor.

"Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar."

Enfim, ENGENHEIRA! Viva a Escola de Minas!

“Não importa o que aconteça, continue a nadar.”
(WALTERS, GRAHAM)

RESUMO

RAFAEL, ALINE DE PAULA: **Estudo experimental do desempenho de um sistema alternativo de resfriamento de ar de baixo custo**, 2019. (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Ouro Preto.

O resfriador de ar evaporativo de baixo custo pode ser uma alternativa à dependência do ar condicionado para possibilitar condições de conforto térmico em ambientes com condições climáticas apropriadas. Esta alternativa é de grande importância atualmente, em que a economia de energia e preservação do meio ambiente são tópicos em todos os campos da engenharia. O processo de resfriamento evaporativo permite a redução da temperatura do ar ambiente através de mecanismos simultâneos de transferência de calor e massa entre ar e água. O presente trabalho tem o objetivo de realizar um estudo experimental do desempenho de um sistema alternativo de resfriamento de ar para conforto térmico através do princípio do resfriamento evaporativo por meio de um estudo bibliográfico e pesquisa experimental. Um protótipo do sistema alternativo foi construído para possibilitar a obtenção experimental do desempenho do sistema de resfriamento evaporativo. Os resultados foram obtidos em condições ambientais diferentes, e o desempenho do sistema em termos da diminuição da temperatura do ar e aumento da umidade relativa do ar foi determinado. Através das análises dos dados, pôde-se observar para as condições da 1ª etapa de medições que o sistema de resfriamento evaporativo proposto proporcionou uma redução de temperatura da ordem de 6,9% e de aumento da umidade relativa do ar da ordem de 12,6%. Para as condições de medição da 2ª etapa foram obtidos para os mesmos parâmetros, 14,2% e 27,6%, respectivamente. Para as condições de medição da 3ª etapa foram obtidos para os mesmos parâmetros, 7,06% e 17%, respectivamente. Finalmente, para as condições de medição da 4ª etapa foram obtidos para os mesmos parâmetros, 12,1% e 47,53%, respectivamente. Para a primeira, segunda, terceira e quarta medição, as efetividades foram respectivamente 51,7%, 44%, 57,0% e 40,6%. Os resultados obtidos por meio da avaliação do funcionamento em condição real de trabalho permitem concluir que o protótipo opera de acordo com o princípio básico de um sistema de resfriamento evaporativo, promovendo o resfriamento do ar externo e aumentando a umidade relativa do ar resfriado.

Palavras-chave: Resfriador de ar evaporativo; transferência de calor; transferência de massa; umidade relativa do ar; diminuição da temperatura.

ABSTRACT

The low cost evaporative air cooler may be an alternative to relying on air conditioning to provide thermal comfort conditions in environments with appropriate climate conditions. This alternative is of great importance today, where energy saving and environmental preservation are topical in all fields of engineering. The evaporative cooling process allows the ambient air temperature to be reduced through simultaneous mechanisms of heat and mass transfer between air and water. The present work aims to perform an experimental study of the performance of an alternative air cooling system for thermal comfort through the evaporative cooling principle through a bibliographic study and experimental research. An alternative system prototype was built to allow experimental performance of the evaporative cooling system. Results were obtained under different environmental conditions, and system performance in terms of decreasing air temperature and increasing relative humidity was determined. Through the data analysis, it was possible to observe for the conditions of the 1st measurement step that the proposed evaporative cooling system provided a temperature reduction of 6.9% and an increase of the relative humidity of the order of 12, 6%. For the measurement conditions of the 2nd stage were obtained for the same parameters, 14.2% and 27.6%, respectively. For the measurement conditions of the 3rd stage were obtained for the same parameters, 7.06% and 17%, respectively. Finally, for the 4th stage measurement conditions, 12.1% and 47.53%, respectively, were obtained for the same parameters. For the first, second, third and fourth measurements, the effectiveness was respectively 51.7%, 44%, 57.0% and 40.6%. The results obtained through the evaluation of the operation under real working conditions allow us to conclude that the prototype operates according to the basic principle of an evaporative cooling system, promoting the cooling of the outside air and increasing the relative humidity of the cooled air.

Keywords: *Evaporative air cooler; heat transfer; mass transference; relative humidity; decrease in temperature.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mudança da temperatura global de 1880 a 2015.	2
Figura 2: Frigorífico de produtos por compressão de vapor por expansão direta.	3
Figura 3: Crescimento do consumo de eletricidade total e para condicionadores de ar no setor residencial.	4
Figura 4: Esquema da fisiologia humana e das trocas térmicas.	8
Figura 5: Resfriamento Evaporativo Indireto:	13
Figura 6: Resfriamento evaporativo Direto	13
Figura 7: Resfriamento evaporativo direto, indireto e duplo estágio em carta psicrométrica. .	14
Figura 8: Resfriador Evaporativo Misto	15
Figura 9: Comportamento da TBS, TBU e TPO para um RED ideal.	16
Figura 10: Carta Psicrométrica ilustrada.	21
Figura 11: Determinação do ponto de estado a partir de TBU e TBS.....	22
Figura 12: Fluxograma do desenvolvimento do trabalho.	25
Figura 13: Cola	26
Figura 14: Cooler.....	27
Figura 15: Tijolo 8 furos.....	27
Figura 16: Caixa de isopor 13 litros.	27
Figura 17: Fonte de energia Fonte: Pesquisa direta (2019).	28
Figura 18: Protótipo do sistema de resfriamento evaporativo.	29
Figura 19: Vedação da área não ocupada pelo tijolo.....	29
Figura 20: Termo Anemômetro Digital de Fio Quente (Itan – 800).	31
Figura 21: Anemômetro em funcionamento.....	31
Figura 22: Resfriador evaporativo em funcionamento (vista frontal).	32
Figura 23: Resfriador evaporativo (vista superior).....	32
Figura 24: Resfriador evaporativo (vista lateral).....	33
Figura 25: Software GRAPSI 5.1.	34
Figura 26: Laboratório de Sistemas Térmicos, Metrologia e Instrumentação.	35
Figura 28: Gráfico de comparação entre a TBSE e TBSS para a 1ª etapa (dia 26/06/2019). ..	38
Figura 29: Gráfico de comparação entre a TBSE e TBSS para a 2ª etapa (dia 19/07/2019). ..	40
Figura 30: Gráfico de comparação entre a TBSE e TBSS para a 3ª etapa (dia 21/11/2019). ..	43
Figura 31: Gráfico de comparação entre a TBSE e TBSS para a 4ª etapa (dia 22/11/2019). ..	45
Figura 32: Gráfico Psicrométrico ASHRAE.	46
Figura 33: Resultado do cálculo da Efetividade 26/06.....	49
Figura 34: Resultado do cálculo da Efetividade 19/07.....	50

Figura 35: Resultado do cálculo da Efetividade 21/11.....	50
Figura 36: Resultado do cálculo da Efetividade 22/11.....	51
Figura 37: Resultado mostrando a média da efetividade de cada medição realizada.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variáveis e indicadores.....	33
Tabela 2: Medições do sistema de resfriamento evaporativo da 1ª etapa (26/06/2019).....	36
Tabela 3: Valores médio, máximo e mínimo das temperaturas e umidade relativa do ar 26/06/2019.....	37
Tabela 4: Medições do sistema de resfriamento evaporativo da 2ª etapa (19/07/2019).....	39
Tabela 5: Valores médio, máximo e mínimo das temperaturas e umidade do ar 19/07/2019..	39
Tabela 6: Medições do sistema de resfriamento evaporativo da 3ª etapa (21/11/2019).....	41
Tabela 7: Valores médio, máximo e mínimo das temperaturas e umidade do ar 21/11/2019..	42
Tabela 8: Medições do sistema de resfriamento evaporativo da 4ª etapa (22/11/2019).....	43
Tabela 9: Valores médio, máximo e mínimo das temperaturas e umidade do ar 22/11/2019..	44
Tabela 10: Dados referentes as medições do dia 26/06/2019.....	46
Tabela 11: Dados referentes as medições do dia 19/07/2019.....	47
Tabela 12: Dados referentes as medições do dia 21/11/2019.....	48
Tabela 13: Dados referentes as medições do dia 22/11/2019.....	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema	1
1.2	Justificativa	2
1.3	Objetivos	5
1.3.1	Geral	5
1.3.2	Específicos	5
1.4	Estrutura do trabalho	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	Transferência de calor	7
2.1.1	Mecanismos de troca de calor	7
2.2	Conforto Térmico	8
2.2.1	Stress Térmico	10
2.2.2	Influência do ambiente	11
2.3	Resfriamento evaporativo	11
2.3.1	Classificação dos sistemas de Resfriamento evaporativo.....	12
2.4	Efetividade	16
2.5	Psicrometria	16
2.5.1	Propriedades do ar	18
2.5.2	Carta Psicrométrica.....	20
3	METODOLOGIA.....	23
3.1	Tipos de pesquisa.....	23
3.2	Materiais e métodos	25
3.2.1	Construção e montagem do protótipo.....	26
3.2.2	Funcionamento do sistema	30
3.2.3	Procedimento experimental	30
3.3	Variáveis e Indicadores.....	33
3.4	Instrumentos de coleta de dados	34
3.5	Tabulação de dados.....	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1	Considerações iniciais.....	35
4.2	Resultados das medições	36

4.3	Cálculo da efetividade do resfriador	45
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	53
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

As revoluções industriais trouxeram grandes avanços à civilização, porém estes foram realizados à custa da utilização predatória de recursos naturais, acarretando problemas como degradação do meio ambiente e poluição (MARENGO, 2005). Assim, atualmente, pesquisadores de todo o mundo buscam alternativas que possam trazer economia de energia e sustentabilidade.

Desde a evolução para o ser consciente, os humanos perceberam a necessidade de buscar formas de resfriamento, tanto para a conservação de alimentos quanto para o conforto térmico. De acordo com a “American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers” – ASHRAE (2009), conforto térmico é a condição mental que expressa satisfação com o ambiente térmico e é obtida por uma avaliação subjetiva, ou seja, é o processo cognitivo influenciado por vários fatores de entrada tais como físicos, fisiológicos, psicológicos, dentre outros.

Quanto à refrigeração, Silva, Souza e Rocha (2014) a define como o processo de remoção do calor existente em um meio, a partir da redução da temperatura e da manutenção dessa condição por meios mecânicos ou naturais.

Os sistemas de refrigeração mais utilizados para o conforto, segundo Camargo (2009), são os condicionadores de ar. Contudo, desvantagens como o seu elevado consumo de energia, recirculação de ar e principalmente quanto ao fluido de trabalho, que libera gases prejudiciais à camada de ozônio, fazem com que haja uma necessidade de alternativas ecologicamente viáveis.

Neste contexto, a utilização do resfriador evaporativo (RE), ou sistemas semelhantes, para a aplicações em conforto térmico, se torna uma alternativa atraente quando comparado a sistemas de ar condicionado.

Camargo (2009) define o resfriador evaporativo como um sistema que utiliza fenômenos naturais através de processos induzidos em que água e ar são os fluidos de trabalho. A passagem de um fluxo de ar causa a evaporação da água, o que provoca a redução na temperatura daquele.

Segundo Camargo (2009), por ser um processo livre de poluição, possuir baixo consumo de energia, facilidades de manutenção, instalação e operação, ele é atrativo para diversas aplicações, dentre elas o conforto térmico de ambientes. Com relação a este, o sistema de resfriamento evaporativo do ar ao evitar a recirculação do ar, evita também possíveis problemas de saúde devido a fungos e bactérias, o que o torna atraente comparado aos sistemas condicionadores de ar comumente empregados.

Então, chega-se ao problema:

Como realizar o estudo experimental do desempenho de um sistema alternativo de resfriamento de ar de baixo custo?

1.2 Justificativa

O controle da temperatura e umidade de um ambiente fechado é de fundamental importância para o bem-estar, saúde e produtividade dos seus ocupantes. Dentre as preocupações, a que mais tem se destacado nos últimos anos é com relação às altas temperaturas, pois, independente do fato de dever-se à interferência humana ou não, a temperatura da Terra está aumentando (CAROSSI, 2006). A figura 1 apresenta dados da NASA sobre a evolução das temperaturas no planeta desde as primeiras medições confiáveis em 1880, evidenciando o aumento das temperaturas desde então.

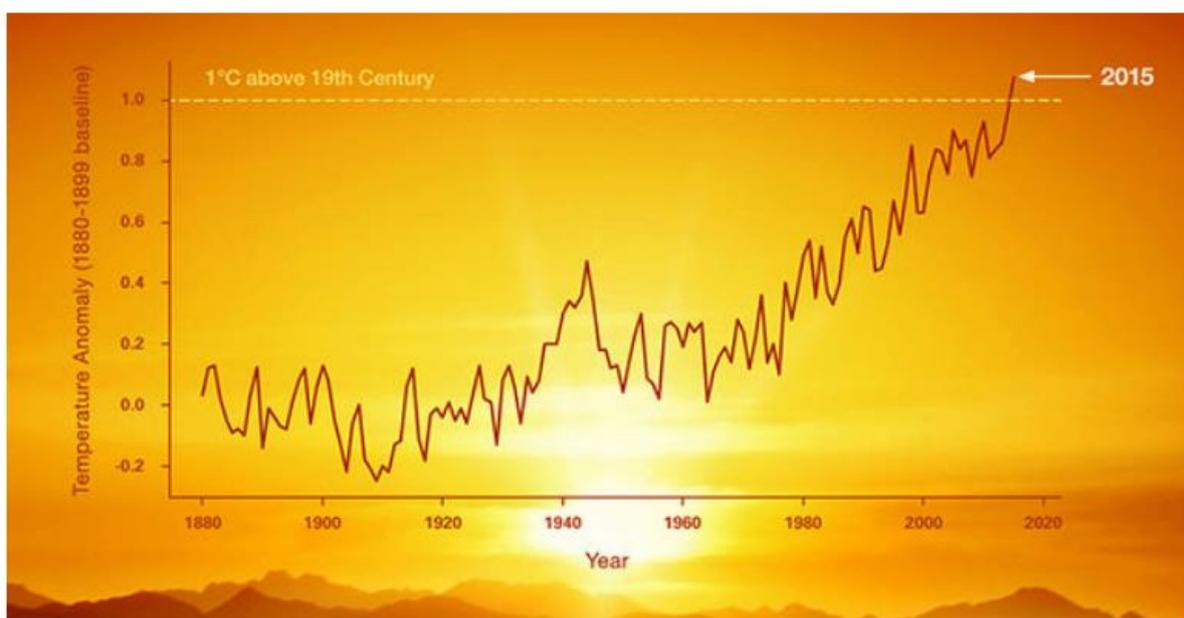


Figura 1: Mudança da temperatura global de 1880 a 2015.

Fonte: NASA/JPL-Caltech, 2017.

O condicionamento do ar contribui tanto para o aumento da eficiência do homem no trabalho quanto para seu conforto, principalmente nos períodos mais quentes do ano.

No âmbito industrial, é frequente a ocorrência de situações de calor excessivo. Em tais circunstâncias, o ritmo de execução das atividades operacionais dos trabalhadores é afetado, impactando negativamente na produtividade da empresa e favorecendo à ocorrência de acidentes de trabalho. Temperaturas elevadas, principalmente associadas a umidades relativas altas, causam estresse térmico, que apresenta sintomas como: cansaço, sonolência, irritabilidade, redução da atenção e da capacidade de concentração e em temperaturas mais extremas, dores de cabeça, cãimbra, desidratação, insolação e até AVC (acidente vascular cerebral) e morte.

Atualmente o sistema mais utilizado para esse fim é o sistema de refrigeração por compressão de vapor (Figura 2).

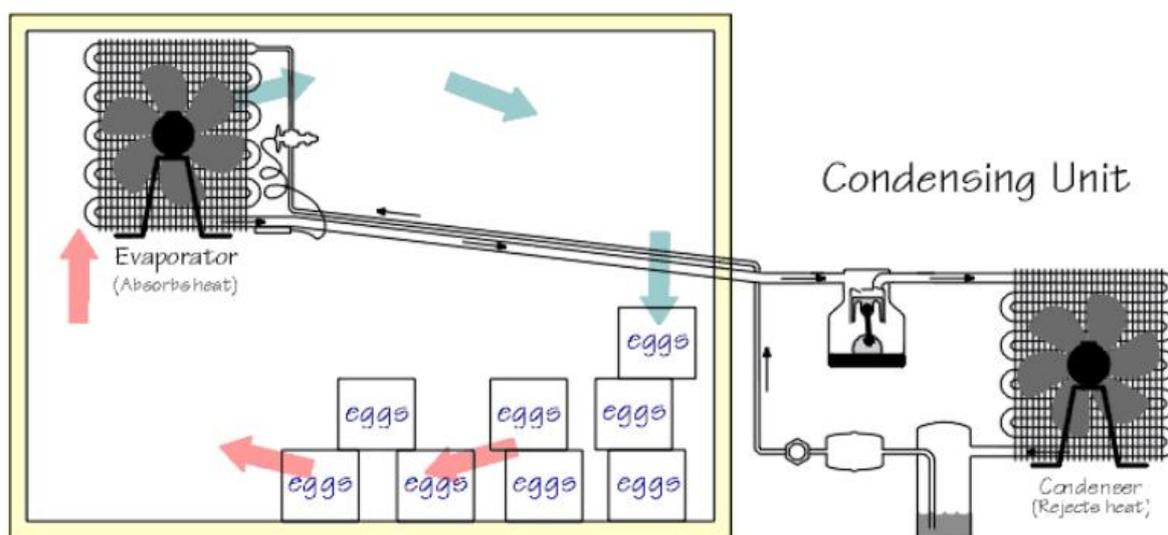


Figura 2: Frigorífico de produtos por compressão de vapor por expansão direta.

Fonte: Slides Aulas UNICAMP

O esquema mostrado na figura 2 representa um sistema frigorífico para produtos: os ovos estão na câmara frigorífica, que é mantida à temperatura baixa pela troca de calor que ocorre no evaporador. O evaporador é um trocador de calor (no caso, de tubos aletados) que resfria o ar que circula na câmara, movimentado pela ação do ventilador. No evaporador ocorre a evaporação do fluido refrigerante, idealmente um processo isobárico (na realidade, com pequena variação de pressão). Ainda no interior da câmara, próximo do evaporador, está o

dispositivo de expansão (a válvula termostática). Este então é um dispositivo frigorífico de expansão direta: a expansão ocorre no ambiente a ser resfriado. No exterior da câmara estão o compressor e o condensador e outros dispositivos auxiliares, como o vaso acumulador e o filtro. Esse é exatamente o esquema de uma geladeira comum, por compressão de vapor.

Para que a climatização ocorra é necessário que energia seja consumida, visto que os processos de climatização não são naturais. Esse consumo de energia aumenta consideravelmente de acordo com a condição final desejada, pois quanto mais distante da condição natural do ambiente ela esteja, maior será o consumo de energia (CAMARGO, 2009).

Entre 2005 e 2017, o consumo de energia elétrica do setor residencial passou de 83 TWh para 134 TWh, crescimento de 61% no período. Tal crescimento foi fortemente influenciado pela elevação do uso de ar-condicionado, como mostrado na Figura 3. Estima-se que o consumo de energia elétrica devido aos condicionadores de ar no setor residencial tenha mais que triplicado (cerca de 237%) nos últimos 12 anos, atingindo 18,7 TWh em 2017 (EPE, 2018).

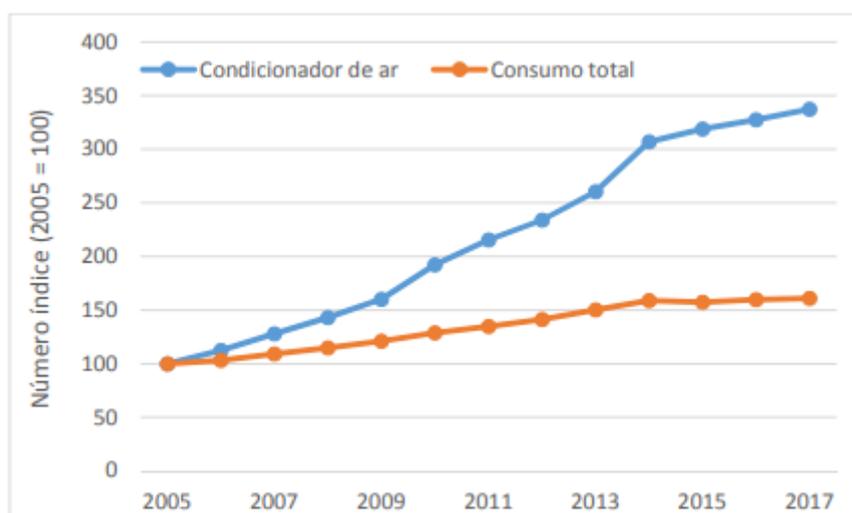


Figura 3: Crescimento do consumo de eletricidade total e para condicionadores de ar no setor residencial.

Fonte: EPE, 2018.

A busca por fontes de energia renováveis tem ganhado destaque, sobretudo pelo fato de tratar-se de energias de menores impactos ambientais, quando comparadas às energias não renováveis, apesar de ainda representarem uma parcela menor em seu uso. No Brasil, as fontes renováveis representam cerca de 41,2% das fontes de energia, enquanto que a média mundial é em torno de 13,8% (BEN, 2017).

Mesmo com essa possibilidade de um uso maior de fontes renováveis de energia, sobretudo por apresentar vantagens como bom clima, solo e vasta extensão territorial, quando comparado ao restante do mundo, necessita-se de estudos para melhoria da qualidade dos equipamentos já existentes, sobretudo, os que demandam um gasto energético maior, como o ar condicionado, que tem atualmente o seu uso exacerbado, devido ao aumento da temperatura média anual.

Sendo assim, o resfriamento evaporativo pode ser uma alternativa econômica em muitos casos, podendo substituir o sistema convencional sob inúmeras condições ou ser utilizado como pré-resfriador no sistema convencional. Isso leva a uma minimização dos custos de operação dos sistemas que utilizam a refrigeração mecânica somente.

A proposta deste trabalho de conclusão de curso é estudar um sistema de climatização através do resfriamento evaporativo. Trocadores de calor do tipo evaporativo utilizam água como fluido refrigerante como meio de resfriamento e umidificação de ambientes. Inúmeras são os tipos e as aplicações dadas a esse método que estão sendo introduzidas pouco a pouco no mercado, motivadas pelas enormes vantagens que esse sistema apresenta. Os sistemas evaporativos combatem a carga térmica de calor sensível, consomem pouca energia, têm baixo custo de instalação e manutenção. Além do conforto térmico, esses dispositivos estão sendo utilizados para umidificação e purificação de ambientes, tratamento do ar em ambientes hostis, resfriamento e umidificação de culturas de pequeno e médio porte, resfriamento e umidificação no armazenamento de produtos agrícolas, diminuição do estresse térmico em animais, dentre outras.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Realizar o estudo experimental do desempenho de um sistema alternativo de resfriamento de ar para conforto térmico através do princípio do resfriamento evaporativo.

1.3.2 Específicos

- Realizar pesquisa bibliográfica sobre o processo de resfriamento evaporativo direto e sobre resfriadores de ar de baixo custo.
- Construir um protótipo de um resfriador de ar de baixo custo.

- Realizar experimentos no resfriador protótipo com a finalidade de determinar o desempenho (efetividade) do mesmo em termos da redução da temperatura do ar e da umidade relativa do ar.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos onde o capítulo 1 apresenta a formulação do problema, sua justificativa, e os objetivos para este trabalho. O capítulo 2 é tratado a revisão bibliográfica, onde se tem os conceitos de Conforto térmico, Resfriamento evaporativo e Psicrometria. O capítulo 3 expõe a metodologia adotada no desenvolvimento do trabalho. No capítulo 4 são mostrados os resultados e discussões em relação ao estudo. E fechando o trabalho tem-se o capítulo 5, o qual irá apresentar as conclusões deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo são expostas a base teórica do trabalho e suas respectivas pesquisas bibliográficas. Serão apresentados os conceitos de transferência de calor, resfriamento evaporativo, psicrometria e a importância do conforto térmico.

2.1 Transferência de calor

Segundo Gaspar (2002) calor é a transferência de energia térmica entre corpos com temperaturas diferentes, tendendo ao equilíbrio térmico, conforme a lei zero da termodinâmica. Quando dois corpos com temperaturas diferentes fazem contato, ocorre uma transferência de energia, onde a temperatura do corpo "mais quente" diminui, e a do corpo "mais frio" aumenta, essa transferência ocorre até o momento em que os dois corpos apresentem temperatura igual. Essa transferência se dá pela passagem de energia térmica do corpo "mais quente" para o corpo "mais frio", sendo denominado de calor.

O sistema de funcionamento do equipamento de ar condicionado, por exemplo, baseia-se na transferência de calor e massa. A Transferência de Calor é a energia em trânsito devido a uma diferença de temperatura. Sempre que existir uma diferença de temperatura em um meio ou entre meios ocorrerá transferência de calor. (INCROPERA, 2018).

2.1.1 Mecanismos de troca de calor

Existem mecanismos de trocas secas e úmida, os mecanismos de trocas secas são: radiação, convecção e condução e a troca úmida: evaporação.

Na Figura 4 é possível observar o esquema da fisiologia humana e das trocas térmicas. O conforto térmico é obtido pelos métodos de trocas térmicas citados acima, sendo esses regidos por processos de transferência de calor.

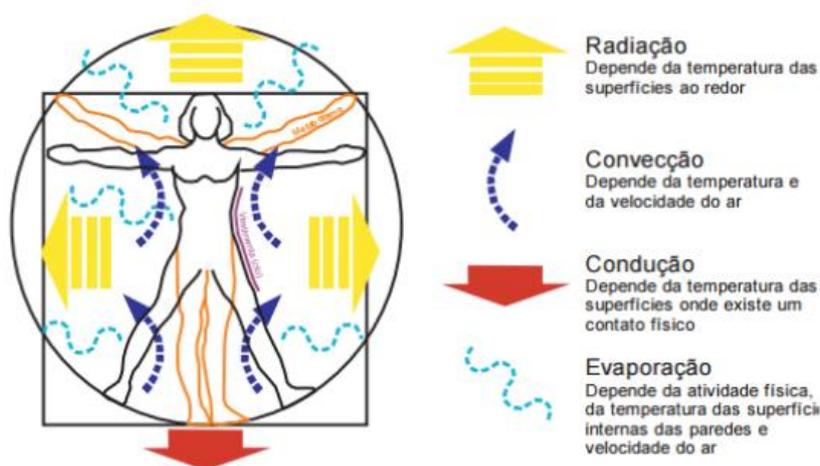


Figura 4: Esquema da fisiologia humana e das trocas térmicas.

Fonte: Eficiência energética na Arquitetura.

Segundo Gaspar (2002) a radiação térmica é o processo de transferência de calor através de ondas eletromagnéticas, calor radiante. O calor radiante independe do meio podendo transferir energia até mesmo no vácuo. Ainda segundo o autor, a condução é um processo de transporte de energia sem transporte de matéria, que necessita de um meio e ocorre de maneira mais eficiente nos materiais sólidos. Assim a condução nada mais é do que a troca de calor que dois corpos fazem quando entram em contato.

A convecção segundo Frota e Schiffer (1987) ocorre quando existe troca de calor entre dois corpos sendo um deles fluido (líquido ou gás).

A evaporação é resultado da mudança de estado do fluido líquido para o gasoso, após o desprendimento de uma certa quantidade de energia, um exemplo, é a evaporação do suor presente na superfície da pele, onde o ar, evaporando o suor promove o resfriamento da pele.

2.2 Conforto Térmico

Conforme Camargo (2009), define-se conforto térmico a condição que expressa satisfação com o meio térmico. O conforto trata-se de um aspecto de neutralidade térmica. Um indivíduo, sob essas circunstâncias, não troca calor com o ambiente, e, por esse motivo, não sente frio nem calor. Logo, a definição clássica de conforto térmico está associada à condição mental que expressa satisfação diante das condições do micro-clima que o ambiente oferece. Em outras palavras, o conforto térmico pode ser entendido como a sensação térmica agradável

ou não ao indivíduo inserido em um meio ambiente qualquer. O autor salienta que duas condições devem ocorrer:

- Combinação entre a temperatura da pele e a temperatura do corpo, proporcionando sensação térmica neutra;
- Equilíbrio de energia do corpo, em que o calor produzido pelo metabolismo se iguala ao calor perdido pelo corpo.

No estudo de conforto térmico, um índice que bem representa a sensação térmica é a Temperatura Efetiva (TE). Uma vez que a temperatura, a umidade e a movimentação do ar interagem de forma independente, é necessário considerá-las juntas, pois todos esses fatores contribuem para determinar a sensação de frio ou calor sentida pelo corpo humano. A Temperatura Efetiva é uma composição desses parâmetros e procura exprimir a temperatura na qual “a maioria das pessoas se sente bem”, levando em conta o tempo de exposição e os efeitos da umidade e da movimentação do ar.

Através da avaliação combinada dos parâmetros climáticos fundamentais, temperatura, umidade e velocidade, e do julgamento subjetivo da sensação térmica de um grupo de indivíduos, dados são tratados por intermédio de análises estatísticas e interpretados em níveis e zonas de conforto térmico. Em outro tipo de abordagem, princípios biofísicos de transferência de calor e massa são utilizados em conjunto com fatores fisiológicos para deduzir uma equação geral que expresse o balanço de energia entre o corpo humano e o meio ambiente circundante (Gonçalves, 2000).

O ser humano é um animal homeotérmico. Segundo Frota e Schiffer (1987), homeotermia é uma característica que alguns animais têm de manter sua temperatura corporal relativamente constante e independente das variações térmicas no ambiente. No caso do ser humano, a temperatura interna necessária para o bom funcionamento do organismo é de aproximadamente 37°C, com limitação entre 36,1 e 37,2°C, sendo 32°C o limite inferior e 42°C o limite superior para sobrevivência. O cérebro ao identificar variações significativas da temperatura corporal, através de sensores térmicos da pele e do hipotálamo, aciona os mecanismos fisiológicos tais como taxa de batimentos cardíacos e transpiração, nível de metabolismo, fluxo sanguíneo, etc, para manter a temperatura corporal constante e restabelecer o equilíbrio térmico do corpo.

A homeotermia pode ser relacionada com o conceito de conforto térmico. “Quando as trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente ocorrem sem maior esforço, a sensação do indivíduo é de conforto térmico e sua capacidade de trabalho, desse ponto de vista, é máxima.” (FROTA e SCHIFFER, 1987). As autoras ainda apresentam as reações metabólicas do organismo ao frio e ao calor:

a) Ao frio - a redução de troca de calor se dá através do aumento da resistência térmica da pele (pela vasoconstrição e arrepiamento) e dos músculos através do tiritar e tremores;

b) Ao calor - o incremento da perda se dá através da vasodilatação, exudação, e diminuição do calor metabólico.

Sendo assim, é recomendado que se atinja a neutralidade térmica nos ambientes, a mesma foi definida por Fanger (1970) como sendo a condição na qual o indivíduo não sinta nem frio, nem calor no ambiente no qual o mesmo se encontra inserido.

Neste cenário, o conforto térmico tem importância destacada não só para promover uma sensação térmica agradável, e, em se tratando de condições térmicas extremas, torna-se uma ferramenta para manter a integridade da saúde física e mental do indivíduo.

2.2.1 Stress Térmico

Segundo Szokolay e Auliciems (1997), o stress térmico é uma condição que pode ser considerada como o estado psicofisiológico, quando uma pessoa está submetida a ambientes extremos de frio ou calor. Ao ser submetido a condições de stress térmico, o ser humano tem o seu desempenho físico-mental alterado, ou seja, há alterações das reações psicossensoriais e queda da capacidade de produção. Sob essas circunstâncias, se faz necessário o estudo sobre as condições do ambiente para cada tipo de atividade a ser desenvolvida nas empresas, como por exemplo uma ferramentaria que possui máquinas como torno, fresadoras, retíficas ou empresas que fazem fundição, injeção de plásticos ou até mesmo pequenas montagens de máquinas ou equipamentos, cada tipo de atividade desenvolvida irá exigir do trabalhador um nível de atividade, esse nível de atividade, é analisado e assim é estabelecido qual o limite de exposição ao calor a norma regulamentadora NR15 anexo III estabelece.

2.2.2 Influência do ambiente

Segundo Frota e Barros (2001) a temperatura do ar impacta na troca de calor do corpo pelo sistema respiratório onde a aspiração também ajuda na manutenção da temperatura interna. Uma temperatura elevada causa grande dificuldade à dissipação de calor por convecção sendo inclusive um aporte de calor se a temperatura do ambiente for maior que a temperatura da pele. A velocidade do ar é determinante na troca de calor por convecção entre o corpo e o ambiente. Quanto mais intensa a ventilação, menor será a sensação de calor, pois, maior quantidade de calor será trocado entre o corpo e o ar.

A umidade do ar exerce grande influência no conforto térmico. A mesma interfere diretamente nos meios de perda de água do corpo humano sendo eles: a difusão de vapor d'água através da pele, a evaporação do suor presente na pele e a umidificação do ar respirado. Conforme a temperatura ambiente aumenta a mesma prejudica as trocas de calor por condução e convecção, restando ao organismo trocar calor pela evaporação do suor. Porém se o ar estiver saturado com umidade relativa, a evaporação é severamente prejudicada, ocasionando o incremento da temperatura interna corporal. No cenário inverso em condições de baixa umidade relativa a perda de calor pelo corpo ocorre mesmo em altas temperaturas.

2.3 Resfriamento evaporativo

Camargo (2003) define o resfriador evaporativo como um sistema que utiliza fenômenos naturais através de processos induzidos em que água e ar são os fluidos de trabalho, usa-se a água para provocar uma redução na temperatura do ar, aumentando assim o conforto nos ambientes, controlando a temperatura e umidade destes. Esse processo possui como principal característica o fato de ser mais eficiente quando as temperaturas são mais elevadas, ou seja, quando a necessidade de resfriamento é maior para o conforto humano. Além disso, em regiões secas, o aumento da umidade é benéfico e, em outras regiões, com a umidificação do ar insuflado, este deixa de causar o desconfortável ressecamento que os sistemas convencionais proporcionam.

Este é um processo limpo e renovável, segundo Camargo (2009), por ser um processo livre de poluição, possuir baixo consumo de energia, facilidades de manutenção, instalação e operação, ele é atrativo para diversas aplicações, tais como processos industriais que requerem controle de umidade, armazenamento de produtos hortifrutigranjeiros, cultivo de plantas,

resfriamento de ar para operação de turbina a gás, manutenção de conforto térmico, dentre outros.

Quanto ao conforto térmico, o resfriador evaporativo ao evitar a recirculação do ar, evita também possíveis problemas de saúde devido a fungos e bactérias, o que o torna atraente comparado aos sistemas condicionadores de ar comumente empregados.

2.3.1 Classificação dos sistemas de Resfriamento evaporativo

Para Camargo (2009), existem dois tipos principais de sistemas evaporativos, o Resfriamento Evaporativo Indireto (REI) e o Resfriamento Evaporativo Direto (RED), conforme mostrado nas figuras 5 e 6.

2.3.1.1 Resfriamento evaporativo Indireto - REI

No REI (Fig.6) o ar se mantém separado do processo de evaporação da água, portanto apenas calor sensível é transferido para a corrente de ar secundária. (Camargo, 2009). Segundo Issao (2011), o resfriamento evaporativo indireto envolve duas correntes de ar que passam pelo trocador de calor simultaneamente, mas sem entrar em contato um com o outro. Nesse tipo de resfriamento, o ar principal e o ar secundário entram nas mesmas condições, porém seguem caminhos diferentes. O ar principal é resfriado e entra nos ambientes que necessitam de climatização. Este ar principal pode ser o ar de retorno do ambiente interno, ou se misturar com uma parcela do ar externo e ser resfriado logo em seguida.

O ar secundário é o ar que entra em contato com a água e que ajuda na evaporação, resfriando as superfícies do trocador de calor, que efetivamente resfriam o ar primário. O ar secundário normalmente é proveniente do ambiente externo a edificação e é descartado após o seu uso, como pode ser observado na Figura (5), em que este ar entra na parte inferior, e após trocar calor com a superfície externa do tubo, ele é descartado na parte superior através do uso de um ventilador secundário. Os elementos de maior importância dos sistemas evaporativos indiretos são as superfícies do trocador de calor que separam o ar de alimentação do ar secundário e da água em que este último ar está evaporando. As superfícies absorvem calor do ar de alimentação e transferem para o ar secundário úmido, que é descartado. As superfícies podem ser placas ou tubos, de metal ou de plástico, ou outras configurações. São exigidos das superfícies uma boa condutividade térmica, separação das duas correntes de ar e resistência à corrosão.

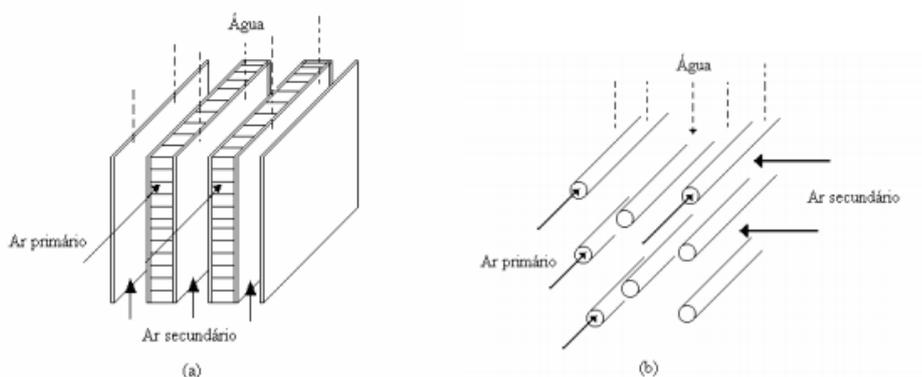


Figura 5: Resfriamento Evaporativo Indireto:

(a) tipo placa; (b) tipo bulbo.

Fonte: Camargo, 2009.

2.3.1.2 Resfriamento evaporativo Direto (RED)

Para Camargo (2009), no RED (Fig.6), o ar é resfriado e umidificado adiabaticamente ao entrar em contato com uma superfície úmida ou com gotículas de água durante a passagem da corrente de ar.

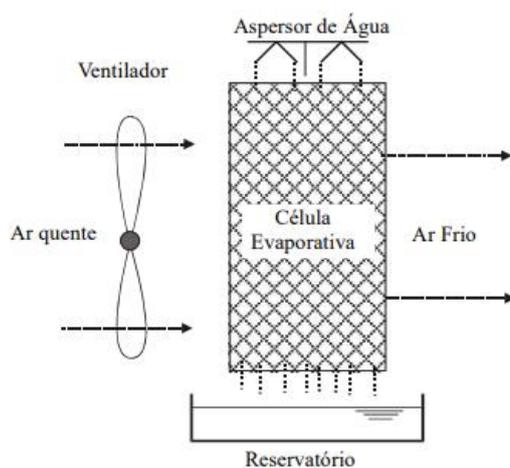


Figura 6: Resfriamento evaporativo Direto

Fonte: Camargo, 2009

Issao (2011) afirma que o processo de resfriamento evaporativo direto ocorre quando água líquida entra em contato com o ar de alimentação a ser inserida no ambiente a ser

climatizado. O calor sensível presente no ar de alimentação evapora a água líquida, e como resultado tem-se a redução da temperatura do ar e aumento da sua umidade. O processo de evaporação continua até que o ar esteja saturado e a mistura ar vapor entre em equilíbrio. Um resfriamento evaporativo ideal é adiabático, ou seja, nenhum calor entra ou sai do sistema, e ocorre somente quando a água de resfriamento está na temperatura de bulbo úmido (TBU) do ar. O processo real diferencia-se do ideal, em muitos casos, pois a água de resfriamento introduz uma parcela de calor sensível ao sistema. Ou seja, o processo não é adiabático, e o ar não é resfriado a uma entalpia e TBU constantes.

Ainda nas palavras de Issao (2011) calor pode ser transferido no sistema por outras fontes, como por exemplo, radiação solar incidindo do resfriador. O modelo evaporativo direto possui limitações, pois a quantidade de calor sensível removido não pode ser maior que o calor latente necessário para saturar o ar com vapor d'água. Outro fator limitante decorre do seu próprio processo: uma vez que utiliza o ar externo diretamente para a climatização, este modelo evaporativo é mais sensível às condições externas, sendo mais eficiente em locais de maior temperatura e menor umidade. Ao utilizar este processo, é preciso ser cauteloso para não elevar em excesso a umidade do ambiente, o que pode levar a um desconforto maior em alguns casos. A Figura 7 mostra os processos psicrométricos dos sistemas direto, indireto e duplo estágio.

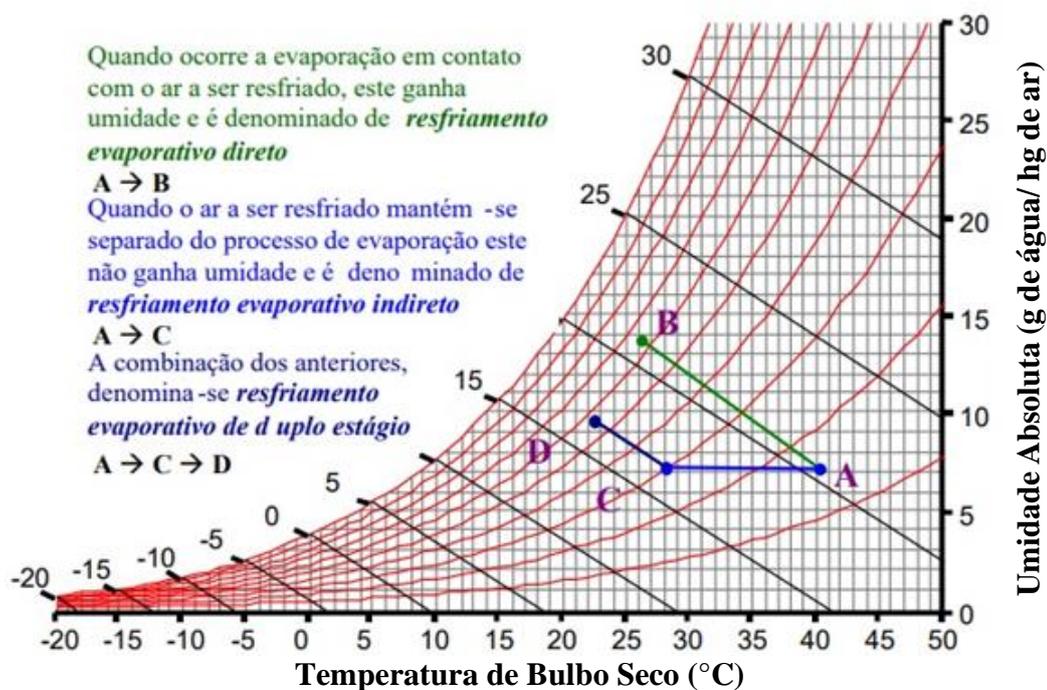


Figura 7: Resfriamento evaporativo direto, indireto e duplo estágio em carta psicrométrica.

Fonte: Adaptado de Silva (2004).

2.3.1.3 Resfriamento Evaporativo Misto (REM) ou Duplo Estágio

Segundo Patil, Hirde e Badnera (2013), o REM visa combinar os dois casos descritos (direto e indireto) através de uma sequência de estágios, de forma que haja uma melhora na eficiência. A figura 8 ilustra a configuração de um REM.

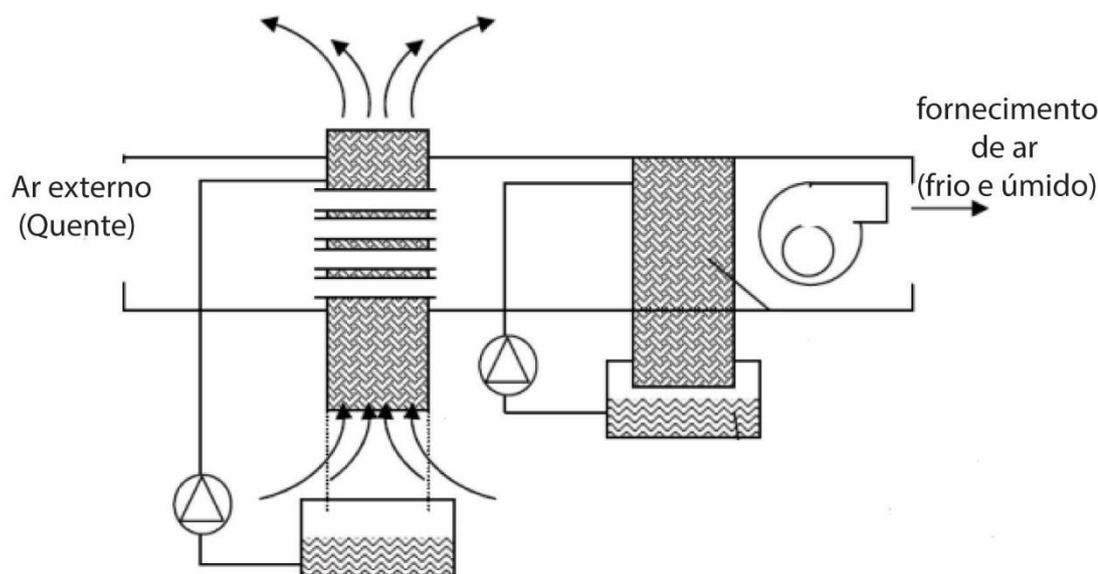


Figura 8: Resfriador Evaporativo Misto

Fonte: Adaptado de Patil, Hirde e Badnera (2013)

Segundo Patil, Hirde e Banera (2013), no verão, em condições de ar seco e quente, o ar fornecido por um REI apresenta T_{bs} acima de 21°C e umidade relativa abaixo de 50%. Assim, pode ser interessante incluir um sistema RED adicional que diminua esta temperatura embora também aumente a umidade relativa. Para atingir este objetivo, dois resfriadores evaporativos são instalados em série, primeiro o indireto e depois o direto. As características de operação são dadas pelos equipamentos instalados em cada estágio.

Brown apud Hernandez et al. (2008) realizou estudos experimentais comparativos entre resfriadores evaporativos e condicionadores de ar convencionais, o autor constatou uma redução no consumo de energia de 15% para resfriadores do tipo direto e 38% para o tipo indireto. Sistemas inovadores combinando resfriamento evaporativo direto com outros equipamentos têm demonstrado serem projetos altamente eficientes do ponto de vista energético (ASHRAE, 1999). O resfriamento evaporativo tem grande potencial para propiciar conforto térmico em locais onde a temperatura de bulbo úmido é baixa, mas, no Brasil, o

sistema direto tem limitações de utilização devido às condições climáticas que variam constantemente (Camargo e Ebinuma, 2001). Ainda nas palavras de Camargo (2009), os sistemas de resfriamento evaporativo são uma alternativa aos sistemas convencionais em muitas situações, ou mesmo podem ser utilizados em conjunto com os mesmos.

2.4 Efetividade

Para Camargo (2009), a efetividade (ε_d) de um resfriador evaporativo direto é definida como a taxa entre a queda real da temperatura de bulbo seco e a máxima queda teórica que a TBS poderia ter se o resfriador fosse 100% eficiente e o ar saísse saturado. Neste caso, TBS na saída seria igual à TBU do ar na entrada (TRANE, 1978). A efetividade é definida através da seguinte equação:

$$\varepsilon_d = \frac{(TBS_e - TBS_s)}{(TBS_e - TBU_e)} \quad (1)$$

sendo e e s correspondentes à entrada e saída, respectivamente.

A Figura 9 exemplifica o que ocorre com as temperaturas de bulbo seco (TBS), de bulbo úmido (TBU) e de ponto de orvalho (TPO) quando o ar passa através de um resfriador evaporativo direto.

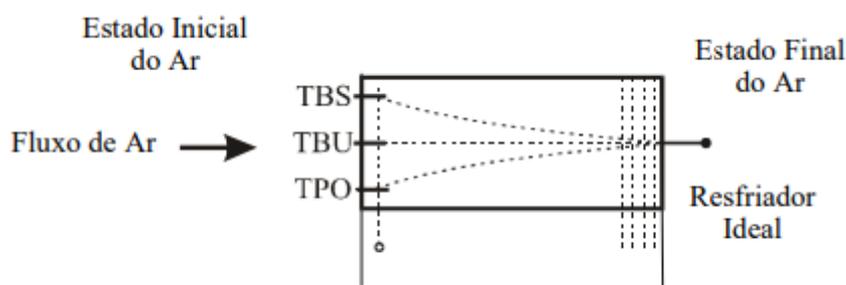


Figura 9: Comportamento da TBS, TBU e TPO para um RED ideal.

Fonte: Camargo (2009).

2.5 Psicrometria

A Psicrometria é o estudo das misturas de ar e vapor d'água. Segundo Silva (2000), o ar ambiente é composto por uma mistura de gases (N_2 , O_2 , CO_2 , etc.), vapor d'água e uma série

de contaminantes como partículas sólidas em suspensão e outros gases. O ar é considerado seco quando se retira da sua composição, a presença de vapor d'água e contaminantes. Silva (2000) afirma que a composição do ar é relativamente constante e varia com a localização geográfica e altitude. É composto por nitrogênio (78%), oxigênio (20,948%), Argônio (1%), gás carbônico (0,033%) e outros gases (0,001%).

De acordo com Camargo (2009), a umidade do ar refere-se à quantidade de vapor d'água presente. Seu conceito é de grande importância na conservação de produtos, em sistemas de refrigeração e, em certas ocasiões, o conforto térmico depende mais da quantidade de vapor d'água presente no ar que de sua temperatura. Estes conceitos são essenciais para compreender a psicrometria.

Bhatia (2012) define a psicrometria como o estudo das interações entre o calor, a umidade e o ar. É basicamente o estudo detalhado (parâmetros, propriedades, etc.) da mistura ar seco e vapor d'água ($[H_2O]_v$), e é uma base essencial para a compreensão de como modificar o ar de uma condição para outra. Quando a temperatura do ar aumenta, sua capacidade de manter $[H_2O]_v$ aumenta também, e o ar mais quente se torna menos denso. Isto torna a umidade um fator de grande influência no ganho de calor.

Conforme Bhatia (2012) afirma, o entendimento dos sistemas que consistem em ar seco e vapor d'água é essencial para o projeto e a análise de dispositivos de ar condicionado, torres de resfriamento e dos processos industriais que requerem grande controle na quantidade de vapor d'água no ar. A interação entre umidade do ar e calor é bastante complexa, e de forma simples essa interação pode ser analisada em um gráfico.

Os conceitos mais relevantes da psicrometria que tem relação direta com o conforto térmico e o sistema de resfriamento evaporativo, segundo Camargo (2009) são: umidade absoluta, umidade relativa, volume específico, entalpia, calor específico à pressão constante, temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido e de ponto de orvalho, sendo essas algumas das propriedades termodinâmicas do ar. Logo, antes de explicar como usar a carta psicrométrica, esses conceitos, definições e princípios usados no estudo destes sistemas devem ser introduzidos.

2.5.1 Propriedades do ar

De acordo com Silva (2000) e Bhatia (2012) as propriedades do ar úmido podem ser relacionadas à temperatura, quantidade de $[H_2O]_v$ e energia. Essas propriedades são conceituadas a partir da abordagem de Silva (2000) e Bhatia (2012).

1. Propriedades relacionadas à temperatura

- Temperatura de bulbo seco (TBS):

Refere-se à temperatura do ar ambiente medida usando um termômetro normal exposto livremente ao ar, porém protegido de radiação e umidade. É chamado de bulbo seco porque a temperatura do ar indicada pelo termômetro não é afetada pela umidade do ar. A temperatura de bulbo seco é um indicador do teor de calor do ar. Quando a TBS aumenta, a capacidade que o ar tem de absorver umidade também se eleva.

- Temperatura de bulbo úmido (TBU):

É a temperatura medida após cobrir o termômetro comum com algodão embebido em água destilada. A TBU é um indicador do teor de umidade do ar, ela é muito útil em processos de resfriamento evaporativo já que a diferença entre a temperatura de bulbo seco e a de bulbo úmido é uma medida da eficiência do resfriamento. Em 100% de umidade relativa, a temperatura de bulbo úmido é igual à temperatura de bulbo seco.

- Temperatura de ponto de orvalho (TPO):

É a temperatura em que o vapor d'água começa a se condensar e o ar úmido torna-se completamente saturado. Acima desta temperatura a umidade irá permanecer no ar. A Tpo é um indicador da quantidade atual de umidade no ar.

A temperatura de ponto de orvalho representa uma medida absoluta da umidade do ar a uma determinada pressão constante. Se a TPO está próxima da temperatura do ar, a umidade relativa é alta, e se a TPO encontra-se muito abaixo da temperatura do ar, a umidade relativa é baixa.

2. Propriedades relacionadas à umidade

- Umidade:

O termo umidade descreve a quantidade de vapor d'água no ar. Se a umidade está baixa, então a capacidade do ar em absorver vapor d'água é maior, e uma quantidade maior de evaporação acontece. A umidade pode ser expressa como um valor absoluto ou relativo.

- Pressão de vapor:

É a pressão exercida pelo vapor d'água (depende da concentração de vapor).

- Umidade relativa (UR):

É a quantidade atual de umidade no ar comparada com a quantidade máxima de umidade que o ar pode suportar a uma dada temperatura. Quando o ar possui 50% de umidade relativa, pode-se dizer que ele está 50% saturado. Pode-se concluir que quando o ar aproxima-se de 100% de saturação, ele pode absorver cada vez menos $[H_2O]_v$ até que a 100% de UR, o ar não pode mais absorver vapor d'água e diz-se que ele está na condição de saturação.

A umidade relativa pode ser determinada ao comparar os valores lidos de T_{bu} e T_{bs} . As temperaturas de bulbo seco e úmido são aferidas simultaneamente e então plotadas em um gráfico psicrométrico. A UR é determinada pelo valor da intersecção entre estas duas linhas de temperatura. Outra forma de encontrar a umidade relativa é através da relação entre a pressão parcial de $[H_2O]_v$ presente no ar e a sua pressão de saturação, representada pela equação a seguir:

$$UR\% = \frac{\text{Pressão parcial } [H_2O]_v}{\text{Pressão de saturação } [H_2O]_v} = \left(\frac{P_v}{P_{vs}} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

- Razão de mistura, umidade específica ou umidade absoluta (U_a):

É a razão entre o valor atual da massa de vapor d'água presente no ar úmido e a massa do ar seco (kgv/kgar). A umidade específica é muito útil em resfriamento evaporativo porque ela fornece uma medida da quantidade de umidade absorvida pela corrente de ar, o que é útil na determinação dos requisitos necessários para o sistema de borrifamento de água no topo dos painéis.

$$U_a = \frac{\text{massa } ([H_2O]_v) \left[\frac{kg \text{ vapor}}{kg \text{ ar seco}} \right]}{\text{massa ar seco}} \quad (2)$$

- Grau de saturação:

Relação entre a razão de mistura atual com a razão de mistura em condições de saturação para valores iguais de temperatura e pressão.

1. Propriedades relacionadas ao volume ocupado e energia

- Volume específico (v_e):

O volume específico é a razão entre o volume e a massa de ar seco (m^3/kgar):

$$v_e = \frac{\text{Volume}}{\text{massa de ar seco}} \quad (3)$$

- Entalpia (h):

A entalpia da mistura ar seco e $[\text{H}_2\text{O}]_v$ é a energia contida no ar úmido por unidade de massa (kJ/kg).

- Calor sensível:

É a energia térmica associada a translação, rotação ou vibração das moléculas, macroscopicamente falando, variações de calor sensível ($\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$) irão sempre causar uma mudança na temperatura da substância.

- Calor Latente:

É a energia térmica envolvida na mudança de fase da água. O calor irá somente mudar a estrutura ou fase do material sem que haja mudança de temperatura.

2.5.2 Carta Psicrométrica

Os conceitos anteriores são necessários para a compreensão de uma importante ferramenta necessária para a determinação das propriedades do ar, a Carta Psicrométrica.

Conforme Camargo (2009), a carta psicrométrica é um método gráfico desenvolvido para demonstrar as propriedades do ar, sendo utilizada para se prever os resultados entre as interações das propriedades termodinâmicas do ar quando se utiliza um sistema de resfriamento evaporativo. Os indicadores obtidos através da correta aplicação da carta psicrométrica são:

- Temperatura de bulbo seco (termômetro comum);
- Umidade relativa (percentual de saturação);
- Umidade absoluta;

- Pressão de vapor;
- Ponto de orvalho;
- Entalpia;
- Temperatura de bulbo úmido.

A figura 10 é um exemplo de carta psicrométrica e está ilustrando as variáveis do ar.

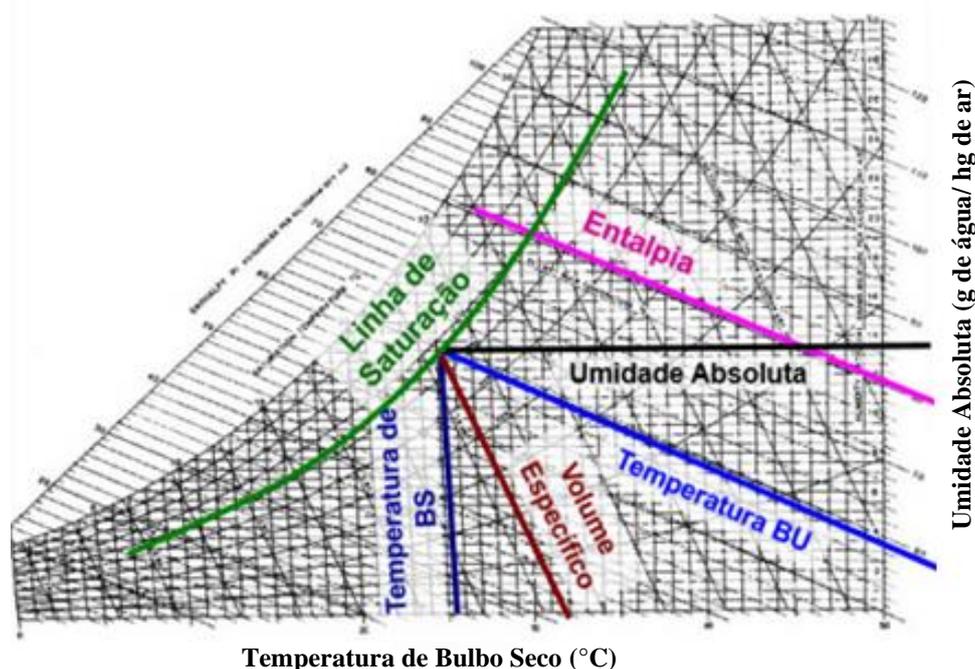


Figura 10: Carta Psicrométrica ilustrada.

Fonte: Adaptado de (CAMARGO, 2009)

A interpretação da carta psicrométrica é descrita de maneira sucinta:

As linhas curvas são as linhas de umidade relativa, a mais externa representa uma umidade relativa de 100% e é chamada linha de vapor saturado ou linha de saturação. Sobre ela lê-se a temperatura de bulbo úmido (TBU) e a temperatura do ponto de orvalho (TPO).

A entalpia é medida através das retas acima das linhas de umidade relativa. As linhas do volume específico do ar seco são as que estão inclinadas à esquerda em aproximadamente 65°, sua leitura é realizada começando pelo eixo da Temperatura de bulbo seco (TBS).

Na carta psicrométrica, conhecendo-se dois parâmetros, por exemplo TBU e TBS, pode-se obter as demais propriedades do ar úmido. Um exemplo é ilustrado na Figura 11. Primeiro traça-se a partir da TBU lida, uma paralela à linha de entalpia. Após isto, levanta-se uma perpendicular à linha TBS, a partir do ponto TBS lido. O cruzamento dessas duas linhas é chamado “ponto de estado”, e a partir dele, pode-se determinar as demais propriedades do ar.

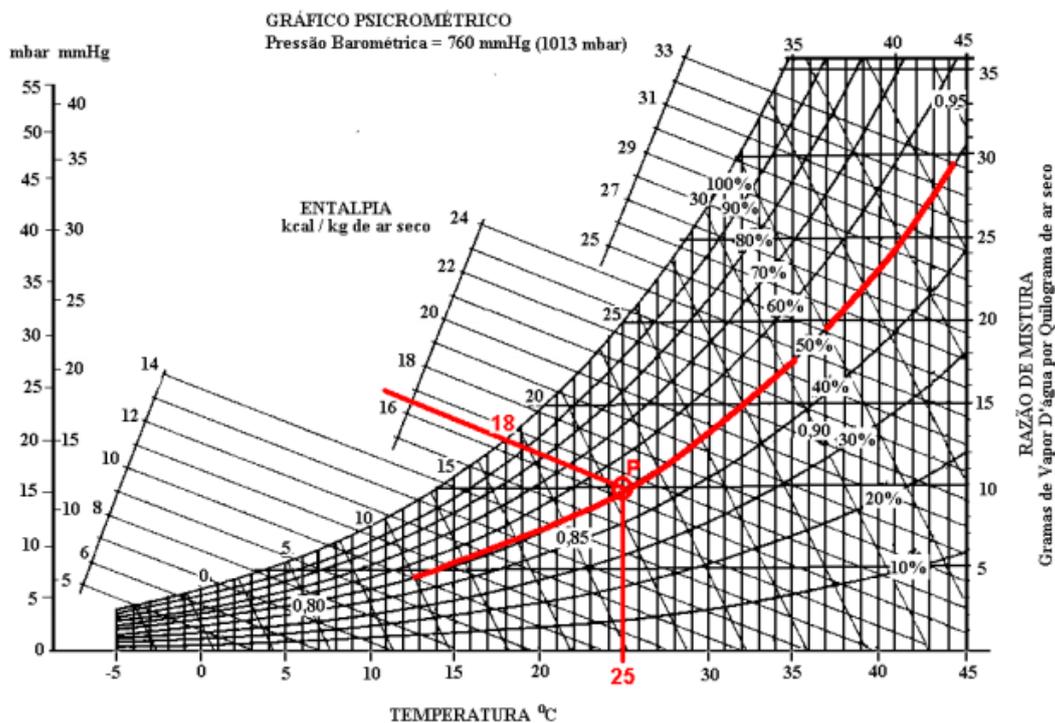


Figura 11: Determinação do ponto de estado a partir de TBU e TBS.

Fonte: Silva, (2000).

3 METODOLOGIA

Este capítulo objetiva apresentar as características dos procedimentos utilizados para a pesquisa.

3.1 Tipos de pesquisa

Luna (1997) define que pesquisa é a produção de um novo conhecimento, significativa dentro do contexto teórico e social, preenchendo uma lacuna importante em uma determinada área de conhecimento. Gil (2002) destaca que a pesquisa é uma atividade racional e sistemática, exigindo que as ações por ela produzidas sejam planejadas em todas suas etapas.

Um método de pesquisa constitui-se de um conjunto de etapas ordenadas, que aliadas ao conhecimento, propiciam a investigação de um fenômeno científico. As etapas abrangem desde a escolha do tema, o planejamento da investigação, o desenvolvimento metodológico, a coleta e a tabulação de dados, a análise dos resultados, a elaboração das conclusões e finalizando a divulgação de resultados (SILVA e MENEZES, 2005).

Sabe-se que existem diversos modos de se classificar uma pesquisa, que dependem da natureza, da abordagem ou assunto, do propósito ou objetivo, e dos procedimentos efetivados para alcançar os dados. Para todos os tipos de pesquisa é necessário ter conhecimento da pesquisa qualitativa e a pesquisa quantitativa, que independentemente do tema e a área escolhida pelo pesquisador, possuirá uma das características presentes além do tipo de pesquisa.

Pesquisas Quantitativas:

- Os conceitos da hipótese devem ser mensuráveis e verificados. Transformação de conceitos em medidas.
- Demonstrar relação de causa-efeito na hipótese.
- A pesquisa deve dirigir-se para conclusões que possam ser generalizadas além dos limites restritos da pesquisa.
- A pesquisa deve ser capaz de ser aplicada.

Pesquisa Qualitativa:

- O pesquisador analisa os fatos sob a ótica do membro interno da organização.

- A pesquisa procura uma profunda compreensão do contexto da situação.
- A pesquisa destaca a ordem dos fatos no decorrer do tempo.
- Foco da pesquisa é mais desestruturado, flexível.
- A pesquisa normalmente adota mais uma fonte de dados.

Quanto ao tipo, Filippini (1997), divide a pesquisa em categorias:

- *Survey* – uso de instrumento de coleta de dados único (em geral um questionário), aplicado a amostras de grande tamanho, com o uso de técnicas de amostragem e análise e inferência estatística.

- Estudo de caso – análise aprofundada de um ou mais objetos (casos), com o uso de múltiplos instrumentos de coleta de dados e presença da interação entre pesquisador e objeto de pesquisa.

- Modelagem – uso de técnicas matemáticas para descrever o funcionamento de um sistema ou de parte de um sistema produtivo.

- Simulação – uso de técnicas computacionais para simular o funcionamento de sistemas produtivos a partir de modelos matemáticos.

- Estudo de campo – outros métodos de pesquisa (principalmente de abordagem qualitativa) ou presença de dados de campo, sem estruturação formal do método de pesquisa.

- Experimento – estudo da relação causal entre duas variáveis de um sistema sob condições controladas pelo pesquisador.

- Teórico/conceitual – discussões conceituais a partir da literatura, revisões bibliográficas e modelagens conceituais.

Assim a pesquisa qualitativa considera que existe relação ativa entre o mundo real e o sujeito, esse modelo de pesquisa não requer o uso de métodos e técnicas estatísticas sendo o ambiente a fonte direta para coleta de dados, é uma pesquisa descritiva.

Já a pesquisa quantitativa considera o que pode ser quantificável, compilando informações para analisá-las. Utilizando técnicas estatísticas como percentagem, média, moda, mediana, desvio-padrão, coeficiente de correlação, análise de regressão. Martins e Bicudo (1989) explicam a Ideia de Fato e Fenômeno, que resume-se a descrever:

a) a Pesquisa “Quantitativa” lida com fatos ou tudo aquilo que pode se tornar objetivo através da observação sistemática, evento bem especificado, delimitado e mensurável;

b) a Pesquisa “Qualitativa” lida com fenômenos, ou seja, aquilo que se mostra, que se manifesta, evento cujo sentido existe apenas num âmbito particular e subjetivo e os conceitos da hipótese devem ser mensuráveis e verificados.

O presente trabalho apresenta uma abordagem quantitativa do tipo exploratória, que partindo da pesquisa experimental (coleta e análise de dados), tem como objetivo realizar um estudo experimental do desempenho de um sistema alternativo de resfriamento de ar para conforto térmico através do princípio do resfriamento evaporativo.

3.2 Materiais e métodos

As etapas de desenvolvimento do trabalho são mostradas no fluxograma da Figura 12.

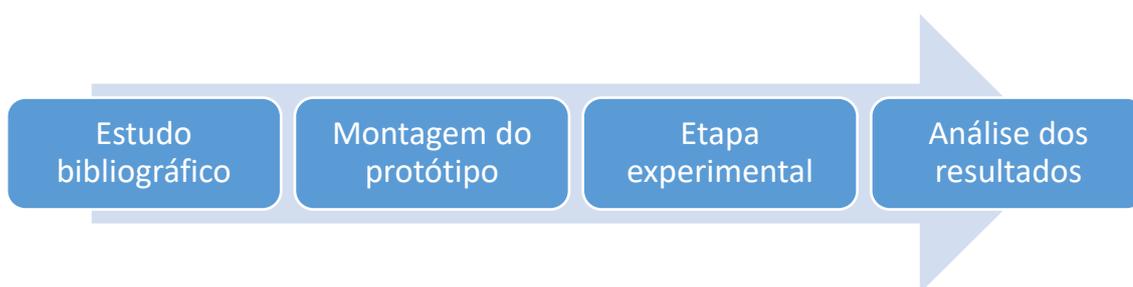


Figura 12: Fluxograma do desenvolvimento do trabalho.

Fonte: Pesquisa direta (2019)

A primeira etapa da pesquisa consiste no estudo bibliográfico do processo de resfriamento evaporativo e a sua aplicação em equipamentos de baixo custo.

A construção de um protótipo experimental de um sistema de resfriamento de evaporativo de baixo custo, com as suas partes constitutivas e todo o procedimento de montagem é mostrada na segunda etapa.

A terceira etapa aborda o procedimento de medição experimental, tendo como objetivo as medições da temperatura e da umidade do ambiente, e da temperatura, umidade e velocidade do ar após a passagem do mesmo pelo sistema de resfriamento.

A quarta etapa consiste da análise das medições realizadas e verificação dos resultados obtidos, que fornecerão a base das conclusões do trabalho.

3.2.1 Construção e montagem do protótipo

Para a realização dos experimentos e obtenção da efetividade de funcionamento do sistema de resfriamento evaporativo de baixo custo proposto deve-se proceder à construção e montagem do mesmo. O sistema de resfriamento de ar proposto será constituído de: uma caixa de isopor, um tijolo de cerâmica com furos, dois ventiladores para a circulação de ar desde a entrada até a saída do resfriador, um tubo de saída e uma quantidade de água dentro de alguns furos do tijolo cerâmico.

Para a montagem do protótipo proposto do sistema de resfriamento de baixo custo foram utilizados:

- 1 Caixa de isopor (13 litros);
- 1 Tijolo cerâmico de 8 furos (11,5 x 19 x 24) cm;
- 2 Coolers de computador (12V e 0,3A);
- Cano PVC (10cm diâmetro);
- Fonte de Energia;
- Cola;
- Manta térmica;
- Água.

Alguns dos equipamentos utilizados na montagem do protótipo como a cola, os coolers, o tijolo, a caixa de isopor e a fonte de energia estão ilustrados nas Figuras 13, 14, 15, 16 e 17. respectivamente.



Figura 13: Cola

Fonte: Pesquisa direta (2019)



Figura 14: Cooler

Fonte: Pesquisa direta (2019)

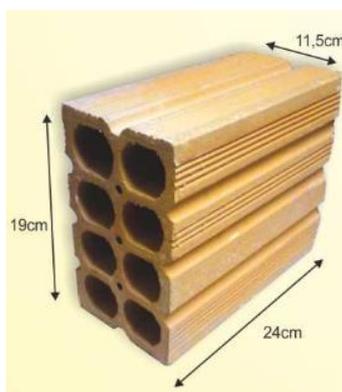


Figura 15: Tijolo 8 furos

Fonte: Pesquisa direta (2019)



Figura 16: Caixa de isopor 13 litros.

Fonte: Pesquisa direta (2019).



Figura 17: Fonte de energia

Fonte: Pesquisa direta (2019).

O procedimento de construção e montagem do protótipo, para adequá-lo a um sistema que viesse a produzir uma boa eficiência final, foi realizado através de vários processos e etapas, que são:

- Corte de 4 cm no tijolo para adequá-lo ao tamanho da caixa;
- Vedação de 4 buracos alternados no tijolo, na sua parte inferior, para enchimento do espaço vedado com água;
- Colocação de um apoio para que o tijolo fique a uma distância de 5 cm do fundo da caixa, o que permite a passagem de ar nos buracos livres e na superfície inferior da caixa;
- Dois cortes na tampa da caixa de isopor para fixar os coolers;
- Um corte lateral com o diâmetro de 10 cm do cano pvc para a saída do ar resfriado;
- Corte do cano de comprimento 8 cm e encaixe na lateral da caixa;
- Vedação da área onde o tijolo não ocupa o espaço na caixa, utilizando a manta térmica e cola;
- Ligação dos coolers na fonte de energia.

O protótipo do sistema de resfriamento evaporativo de ar após a montagem é mostrado na Figura 18.

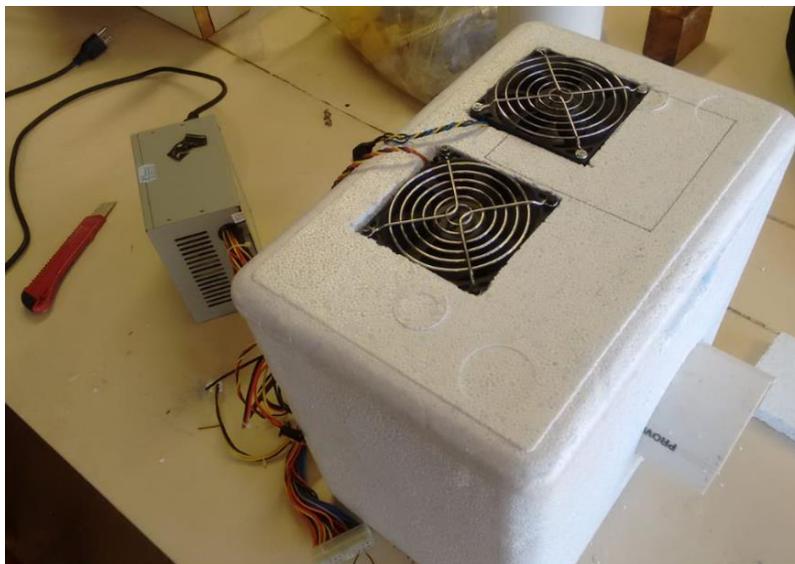


Figura 18: Protótipo do sistema de resfriamento evaporativo.

Fonte: Pesquisa Direta (2019).

O detalhe da vedação da área onde o tijolo não ocupa o espaço na caixa de isopor utilizando a manta térmica é apresentado na Figura 19.



Figura 19: Vedação da área não ocupada pelo tijolo.

Fonte: Pesquisa direta (2019).

3.2.2 Funcionamento do sistema

O funcionamento e operacionalização do protótipo baseia-se no princípio básico de funcionamento de um sistema de resfriamento evaporativo de ar. A água presente em alguns buracos vedados do tijolo, tem a função de umedecer o mesmo pois, sendo um material poroso e permeável tem a característica de absorver umidade, e o tijolo tem o papel de fazer a função da célula evaporativa como apresentado na Figura 6. O ar soprado pelos coolers passa pelos buracos não vedados e ocorre a transferência de calor e massa entre o ar e as paredes úmidas do tijolo, resfriando o ar que sai pelo furo lateral na caixa de isopor.

3.2.3 Procedimento experimental

O procedimento experimental consiste em fazer circular uma determinada vazão de ar, provida pelos *coolers*, através do resfriador. Este ar, em contato com a água na caixa e das paredes do tijolo, provocará uma vaporização de parte desta água, proporcionando a diminuição da temperatura do ar. Realizar-se-á a medição de:

1) Temperatura e umidade relativa do ar no ambiente de realização do experimento. Estes valores são atribuídos à temperatura e umidade relativa do ar de entrada do sistema de resfriamento do ar;

2) Temperatura, umidade relativa e velocidade do ar após a passagem pelo sistema de resfriamento. Esta medição é realizada na saída do resfriador, ou seja, no tubo de saída do tubo de ar, e permite a avaliação do perfil de redução da temperatura.

As medições das temperaturas, umidade relativa do ar e velocidade foram realizadas através do Termo Anemômetro Digital de Fio Quente (Itan – 800), apresentado na figura 20.



Figura 20: Termo Anemômetro Digital de Fio Quente (Itan – 800).

Fonte: Pesquisa direta (2019).

As figuras 21, 22, 23 e 24 mostram o Anemômetro e o resfriador evaporativo em funcionamento.

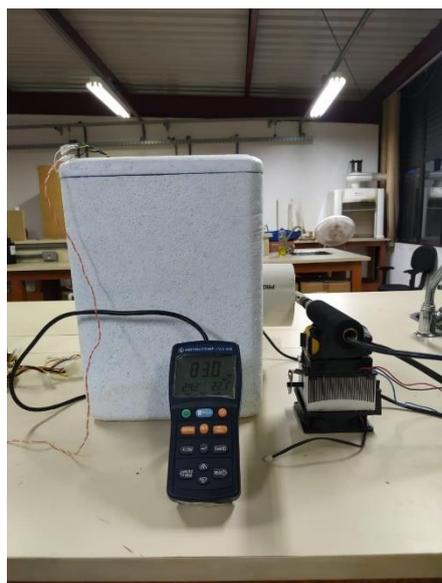


Figura 21: Anemômetro em funcionamento.

Fonte: Pesquisa direta (2019).



Figura 22: Resfriador evaporativo em funcionamento (vista frontal).

Fonte: Pesquisa direta (2019).

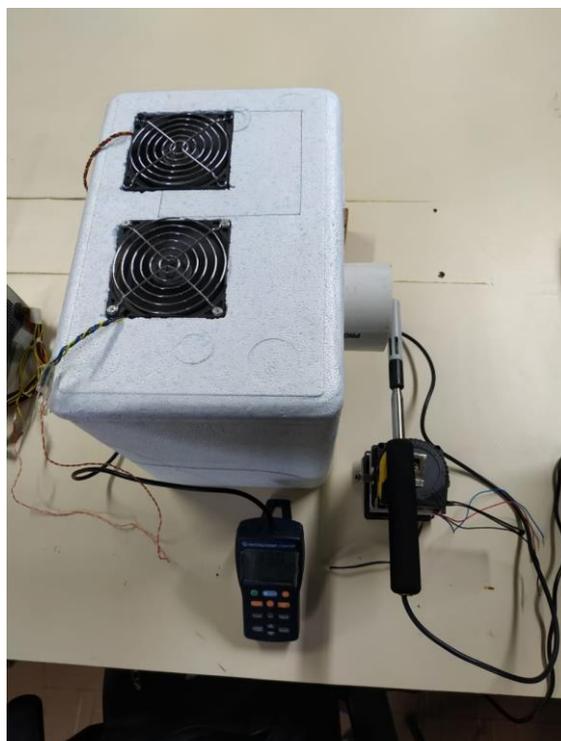


Figura 23: Resfriador evaporativo (vista superior).

Fonte: Pesquisa direta (2019).



Figura 24: Resfriador evaporativo (vista lateral).

Fonte: Pesquisa direta (2019).

3.3 Variáveis e Indicadores

De acordo com Triviños (1987), a variável, é conceituada como a característica observável de algo que podem apresentar diferentes valores (Indicadores). Para Deponti (2002), indicador é o instrumento que permite mensurar as modificações nas características de um sistema.

Tabela 1: Variáveis e indicadores.

VARIÁVEL	INDICADORES
Resfriador de ar de baixo custo	Temperatura de Bulbo Seco na entrada e na saída.
	Umidade Relativa na entrada e na saída.
	Efetividade/Desempenho.

3.4 Instrumentos de coleta de dados

Para a coleta de dados, escolheu-se o equipamento Termo Anemômetro Digital de Fio Quente (Itan – 800) já citado anteriormente. O monitoramento da temperatura, umidade relativa do ar na (entrada e na saída) e a velocidade do ar foi feito no inverno e na primavera entre 12h e 17h (horário de maior temperatura durante o dia) com intervalos de 5 minutos em média entre as medições. Desta forma, foi possível obter um detalhamento maior de como as variáveis se comportam ao longo do período em que o equipamento permaneceu funcionando.

3.5 Tabulação de dados

Neste trabalho são utilizados os *softwares* Microsoft Excel, para criação de tabelas e construção de gráficos, tanto para comparação dos dados, quanto para o cálculo da efetividade e o GRAPSI (Figura 28), como alternativa mais ágil ao gráfico psicrométrico para encontrar a TBU.

Nas palavras do desenvolvedor, o GRAPSI é um programa para calcular as propriedades psicrométricas do ar úmido. Esse software é capaz de executar os cálculos das propriedades psicrométricas do ar e até simular os processos de aquecimento e resfriamento, umidificação adiabática e mistura de dois fluxos de ar. Ele pode ser usado para temperaturas entre -100 a 372 °C e altitudes até 4.000 m.

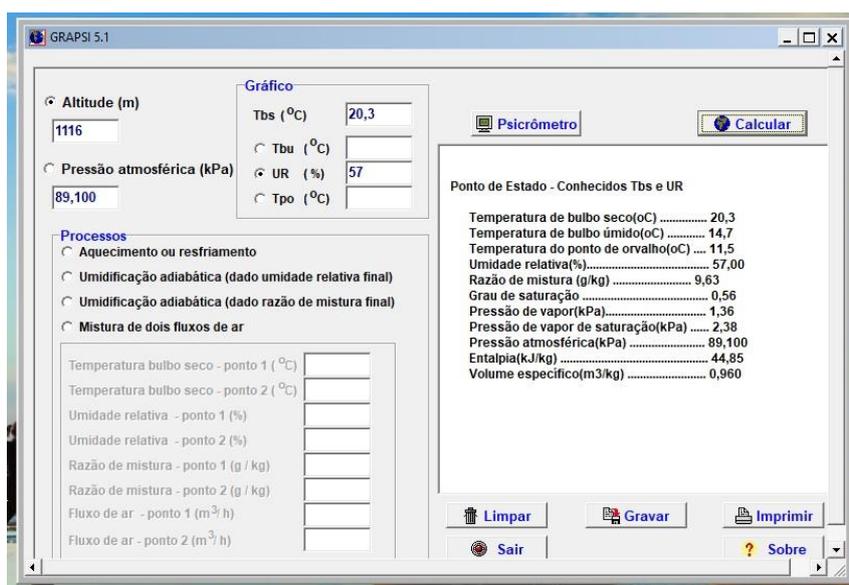


Figura 25: Software GRAPSI 5.1.

Fonte: Pesquisa direta (2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Considerações iniciais

Dentre as possibilidades de configurações e de materiais para a construção de um resfriador evaporativo analisados, foram escolhidos os mais baratos, comuns e de fácil acesso.

Para a coleta de dados foi necessário obter algum ambiente disponível para a realização do projeto e também a utilização de um equipamento para monitorar as variáveis desejadas (temperatura de bulbo seco na entrada e na saída, umidade relativa na entrada e na saída e a velocidade do ar).

O ambiente escolhido para a realização da coleta de dados foi o Laboratório de Sistemas Térmicos, Metrologia e Instrumentação, parte do conjunto de laboratórios da Escola de Minas – Universidade Federal de Ouro Preto, apresentado na figura 25.



Figura 26: Laboratório de Sistemas Térmicos, Metrologia e Instrumentação.

Fonte: Pesquisa direta. (2019).

4.2 Resultados das medições

Apresenta-se neste capítulo os resultados das medições experimentais realizadas e as discussões das mesmas. Conforme citado anteriormente, as medições foram realizadas através do equipamento Termo Anemômetro Digital de Fio Quente (Itan – 800). Em função das características do equipamento e das medições a realizar (temperatura, umidade relativa e velocidade do ar) padronizou-se um intervalo de tempo, em média de 5 minutos entre diferentes medições, uma vez que o Anemômetro exige um tempo para estabilizar as mesmas.

A primeira etapa de medições foi realizada no dia 26/06/2019 e os resultados são mostrados nas Tabelas 1 e 2 e na Figura 29.

Tabela 2: Medições do sistema de resfriamento evaporativo da 1ª etapa (26/06/2019)

Tamb (°C)	URamb (%)	Velocidade do ar (m/s)	UR Ar Resfriado (%)	Tar Resfriado (°C)
24,4	73,9	2,76	83,2	22,6
24,1	73,0	2,65	81,8	22,7
24,0	73,5	2,72	81,3	22,6
24,0	71,8	2,73	81,3	22,3
24,1	71,8	2,58	81,3	22,5
24,2	72,0	2,62	82,0	22,3
24,0	72,1	2,70	82,1	22,2
24,3	72,0	2,69	81,8	22,4
24,2	73,0	2,67	81,5	22,6
24,1	73,3	2,68	81,6	22,6

Observando os valores medidos, fez-se uma análise indicando os valores médios, máximos e mínimos das temperaturas e das umidades relativas do ar, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 3: Valores médio, máximo e mínimo das temperaturas e umidade relativa do ar 26/06/2019

	Tamb (°C)	URamb (%)	UR Ar Resfriado (%)	Tar Resfriado (°C)
Valor médio	24,14	72,64	81,79	22,48
Valor máximo	24,4	73,9	83,2	22,7
Valor mínimo	24,0	71,8	81,3	22,2

Para o dia e tempo total de duração do experimento não se observa uma variação expressiva entre os valores mínimo, médio e máximo da Tabela 2. Assim, analisando-se os dados obtidos através das medições adquiridas e seus valores médios, observa-se:

- Aumento na umidade relativa do ar em 12,59 %;
- Resfriamento do ar em 6,88%;

Comparando os valores máximos e mínimos das temperaturas e umidades relativas do ar, nota-se:

- Aumento da umidade relativa do ar comparando a máxima umidade de 12,58%;
- Resfriamento do ar comparando a máxima temperatura de aproximadamente 6,97%;
- Aumento da umidade relativa do ar comparando a mínima umidade de 13,23%;
- Resfriamento do ar comparando a mínima temperatura de aproximadamente 7,5%.

A Figura 29 ilustra o perfil das temperaturas do ambiente e do ar resfriado em função das medições realizadas (intervalo de 5 minutos entre medições).

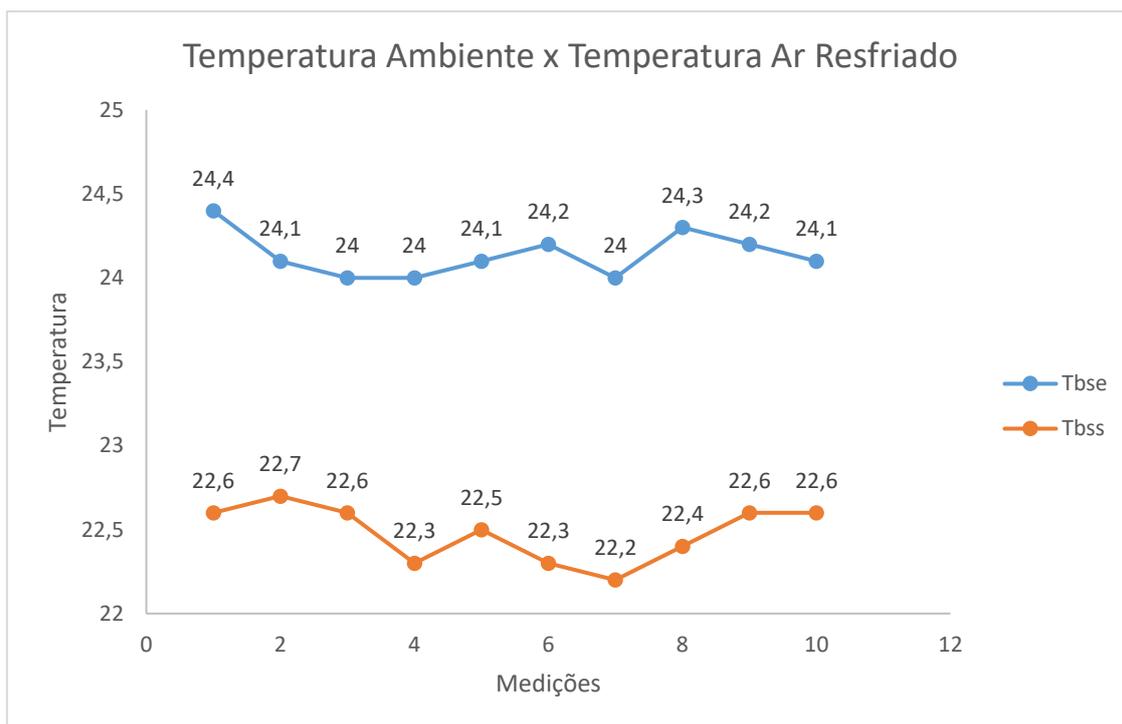


Figura 27: Gráfico de comparação entre a TBSE e TBSS para a 1ª etapa (dia 26/06/2019).

Fonte: Pesquisa direta (2019).

Pode-se observar no gráfico o quanto o ar foi resfriado pelo sistema de resfriamento evaporativo relacionado às medições realizadas no dia 26 de junho de 2019, sendo a diferença média na temperatura para o resfriamento de $1,7^{\circ}\text{C}$.

Dos resultados apresentados verifica-se a concordância com o estudo teórico, ou seja, o resfriamento evaporativo proporciona a diminuição da temperatura do ar e aumenta a sua umidade relativa.

No dia 19 de julho de 2019 foi realizada a segunda etapa de medições. O mesmo intervalo de 5 minutos entre as medições foi considerado. Os resultados são apresentados nas Tabela 3 e 4 e na Figura 30.

A Tabela 3 mostra as temperaturas do ambiente e do ar resfriado e a umidade relativa do ar ambiente e do ar resfriado.

Novamente, observando os valores medidos, fez-se uma análise indicando os valores médio, máximo e mínimo das temperaturas e das umidades relativas do ar, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Medições do sistema de resfriamento evaporativo da 2ª etapa (19/07/2019).

Tamb (°C)	URamb (%)	Velocidade do ar (m/s)	UR Ar Resfriado (%)	Tar Resfriado (°C)
22,1	52,1	2,26	69,1	19,1
21,8	53,5	2,20	69,0	18,9
21,8	53,7	2,20	70,5	18,2
21,2	54,8	2,19	70,2	18,3
21,3	55,5	2,22	70,7	18,2
21,4	57,0	2,22	72,3	18,3
21,3	57,0	2,26	72,2	18,3
21,3	57,3	2,29	72,7	18,3
21,0	57,5	2,26	72,4	18,2
21,2	57,8	2,27	73,6	18,2
21,2	58,1	2,20	73,2	18,3
20,9	58,2	2,33	73,4	17,9
20,7	58,2	2,39	73,4	17,8
20,5	58,3	2,32	73,1	17,7
20,7	56,0	2,20	72,6	17,6
20,3	57,0	2,15	72,7	17,3

Tabela 5: Valores médio, máximo e mínimo das temperaturas e umidade do ar 19/07/2019

	Tamb (°C)	URamb (%)	UR Ar Resfriado (%)	Tar Resfriado (°C)
Valor médio	21,17	56,38	71,94	18,16
Valor máximo	22,1	58,3	73,6	19,1
Valor mínimo	20,3	52,1	69	17,3

Analisando os dados obtidos através das medições adquiridas e seus valores médios, observa-se:

- Aumento na umidade relativa do ar em 27,6 %;

- Resfriamento do ar em 14,2%;

Comparando os valores máximos e mínimos das temperaturas e umidades relativas do ar, nota-se:

- Aumento da umidade relativa do ar comparando a máxima umidade de 26,2%;

- Resfriamento do ar comparando a máxima temperatura, de aproximadamente 13,6%;

- Aumento da umidade relativa do ar comparando a mínima umidade de 32,4%;

- Resfriamento do ar comparando a mínima temperatura, de aproximadamente 14,78%.

A Figura 30 ilustra o perfil das temperaturas do ambiente e do ar resfriado em função das medições realizadas (intervalo entre medições de 5 minutos).

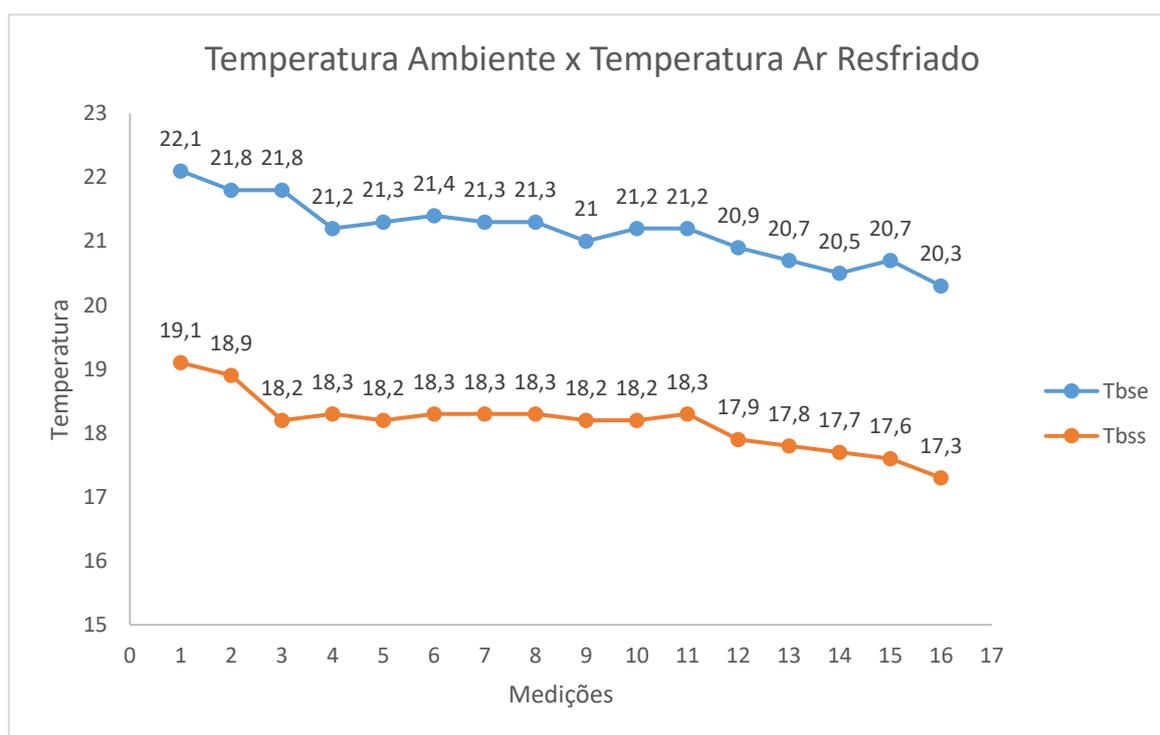


Figura 28: Gráfico de comparação entre a TBSE e TBSS para a 2ª etapa (dia 19/07/2019).

Fonte: Pesquisa direta (2019).

Pode-se observar no gráfico o quanto o ar foi resfriado pelo sistema de resfriamento evaporativo relacionado às medições feitas no dia 19 de julho de 2019, sendo esse valor médio em 3,54°C.

No dia 21 de novembro de 2019 foi realizada a terceira etapa de medições. O mesmo intervalo de 5 minutos entre as medições foi considerado. Os resultados são apresentados nas Tabela 5 e 6 e na Figura 31.

Tabela 6: Medições do sistema de resfriamento evaporativo da 3ª etapa (21/11/2019).

Tamb (°C)	URamb (%)	Velocidade do ar (m/s)	UR Ar Resfriado (%)	Tar Resfriado (°C)
22,5	81,7	3,01	90,5	21,4
22,4	81,3	2,84	88,7	21,6
23,6	79,4	3,24	89,1	21,7
23,4	80,8	2,52	88,9	22,0
24,1	78,5	2,39	87,5	22,8
24,1	78,8	1,37	85,6	23,1
25,8	71,5	1,04	81,2	24,4
24,9	65,5	2,62	77,2	24,9
26,9	64,4	2,22	75,9	25,7
27,0	66,3	2,30	76,0	25,7
27,5	62,5	2,28	73,9	26,0
28,0	59,5	2,32	77,5	25,7
27,8	60,6	1,75	73,9	25,8
28,2	58,9	2,64	78,3	25,6
27,7	61,8	2,70	77,0	25,7
28,1	63,5	2,01	75,6	25,7
28,1	61,9	1,48	74,2	25,0
28,1	60,2	1,70	75,9	23,3

Tabela 7: Valores médio, máximo e mínimo das temperaturas e umidade do ar 21/11/2019

	Tamb (°C)	URamb (%)	UR Ar Resfriado (%)	Tar Resfriado (°C)
Valor médio	26,07	68,73	80,38	24,23
Valor máximo	28,2	81,7	90,5	26,0
Valor mínimo	22,4	58,9	73,9	21,4

Analisando os dados obtidos através das medições adquiridas e seus valores médios, observa-se:

- Aumento na umidade relativa do ar em 17%;
- Resfriamento do ar em 7,06%;

Comparando os valores máximos e mínimos das temperaturas e umidades relativas do ar, nota-se:

- Aumento da umidade relativa do ar comparando a máxima umidade de 10,8%;
- Resfriamento do ar comparando a máxima temperatura, de aproximadamente 7,8%;
- Aumento da umidade relativa do ar comparando a mínima umidade de 25,47%;
- Resfriamento do ar comparando a mínima temperatura, de aproximadamente 4,46%.

A Figura 31 ilustra o perfil das temperaturas do ambiente e do ar resfriado em função das medições realizadas (intervalo entre medições de 5 minutos).

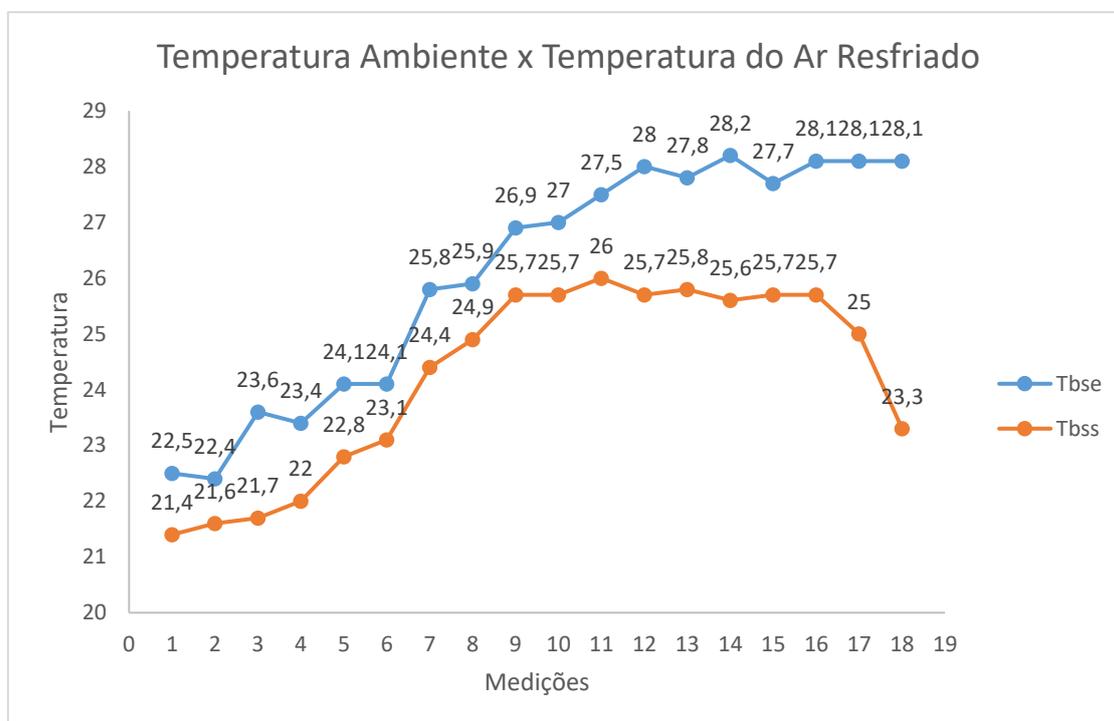


Figura 29: Gráfico de comparação entre a TBSE e TBSS para a 3ª etapa (dia 21/11/2019).

Fonte: Pesquisa direta (2019).

Pode-se observar no gráfico o quanto o ar foi resfriado pelo sistema de resfriamento evaporativo relacionado às medições feitas no dia 21 de novembro de 2019, sendo esse valor médio de 1,70°C.

No dia 22 de novembro de 2019 foi realizada a quarta etapa de medições.

Tabela 8: Medições do sistema de resfriamento evaporativo da 4ª etapa (22/11/2019).

Tamb (°C)	URamb (%)	Velocidade do ar (m/s)	UR Ar Resfriado (%)	Tar Resfriado (°C)
27,1	68,0	1,42	77,1	25,7
27,1	69,9	1,48	77,8	25,0
27,4	69,0	1,16	76,9	25,5
27,3	68,4	1,19	76,3	25,8

28,6	63,0	1,30	76,0	24,9
28,9	61,8	1,15	74,7	26,3
29,3	61,6	1,35	76,1	25,9
29,9	58,2	1,27	77,4	25,7
30,6	56,8	1,31	76,1	26,0
29,5	59,7	1,77	80,6	24,6
30,1	59,6	1,18	76,4	25,3
29,5	59,0	3,01	81,4	24,5
29,9	58,5	1,42	82,2	24,7

Tabela 9: Valores médio, máximo e mínimo das temperaturas e umidade do ar 22/11/2019.

	Tamb (°C)	URamb (%)	UR Ar Resfriado (%)	Tar Resfriado (°C)
Valor médio	28,86	52,6	77,6	25,38
Valor máximo	30,6	69,9	88,2	26,3
Valor mínimo	27,1	58,5	74,7	24,5

Analisando os dados obtidos através das medições adquiridas e seus valores médios, observa-se:

- Aumento na umidade relativa do ar em 47,53%;
- Resfriamento do ar em 12,1%;

Comparando os valores máximos e mínimos das temperaturas e umidades relativas do ar, nota-se:

- Aumento da umidade relativa do ar comparando a máxima umidade de 26,2%;
- Resfriamento do ar comparando a máxima temperatura, de aproximadamente 14,05%;
- Aumento da umidade relativa do ar comparando a mínima umidade de 27,7%;
- Resfriamento do ar comparando a mínima temperatura, de aproximadamente 9,6%.

A Figura 32 ilustra o perfil das temperaturas do ambiente e do ar resfriado em função das medições realizadas (intervalo entre medições de 5 minutos).

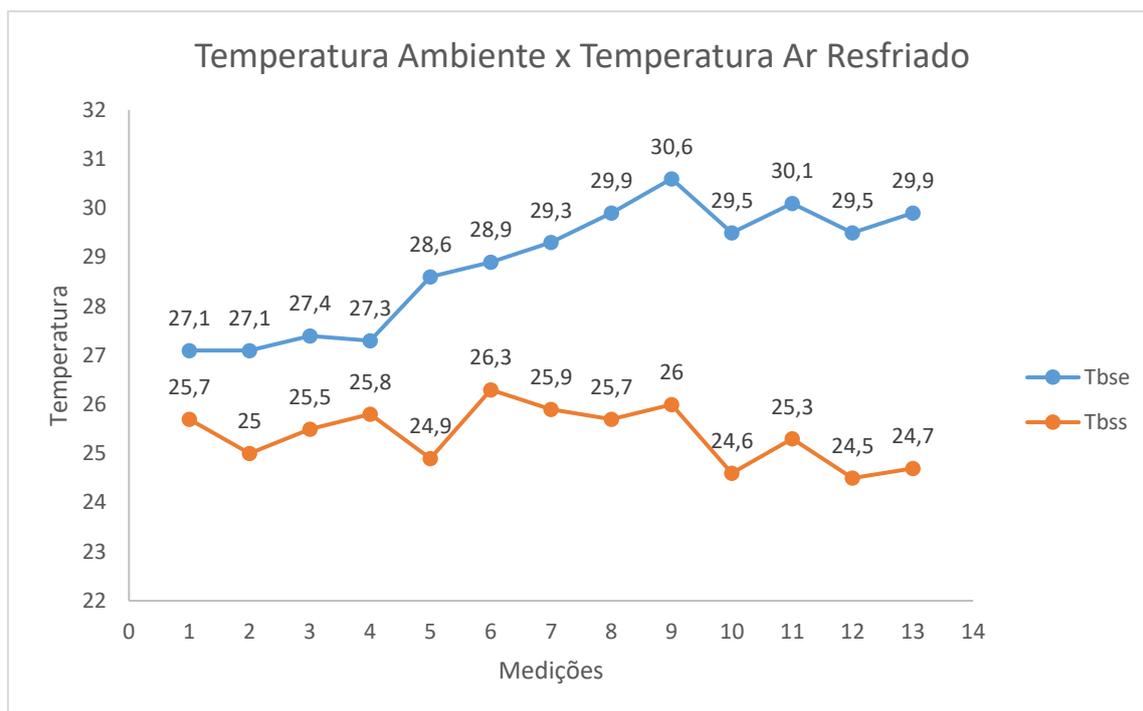


Figura 30: Gráfico de comparação entre a TBSE e TBSS para a 4ª etapa (dia 22/11/2019).

Fonte: Pesquisa direta (2019).

Pode-se observar no gráfico o quanto o ar foi resfriado pelo sistema de resfriamento evaporativo relacionado às medições feitas no dia 22 de novembro de 2019, sendo esse valor médio de 3,5°C.

4.3 Cálculo da efetividade do resfriador

Com o intuito de analisar mais profundamente a capacidade do equipamento de resfriamento evaporativo em questão, faz-se necessário o cálculo da sua eficiência. Para esse cálculo é necessário encontrar a TBU, então para fim de demonstração, uma amostra da TBSe e URe das medições realizadas foi projetada no gráfico psicrométrico e a TBU foi encontrada.

Para encontrar a temperatura de bulbo úmido na entrada do sistema, entra-se com a temperatura de 30,6 °C e umidade relativa de 56,8%, projeta-se estes dados na carta psicrométrica e obtém-se a temperatura de bulbo úmido na entrada do sistema.

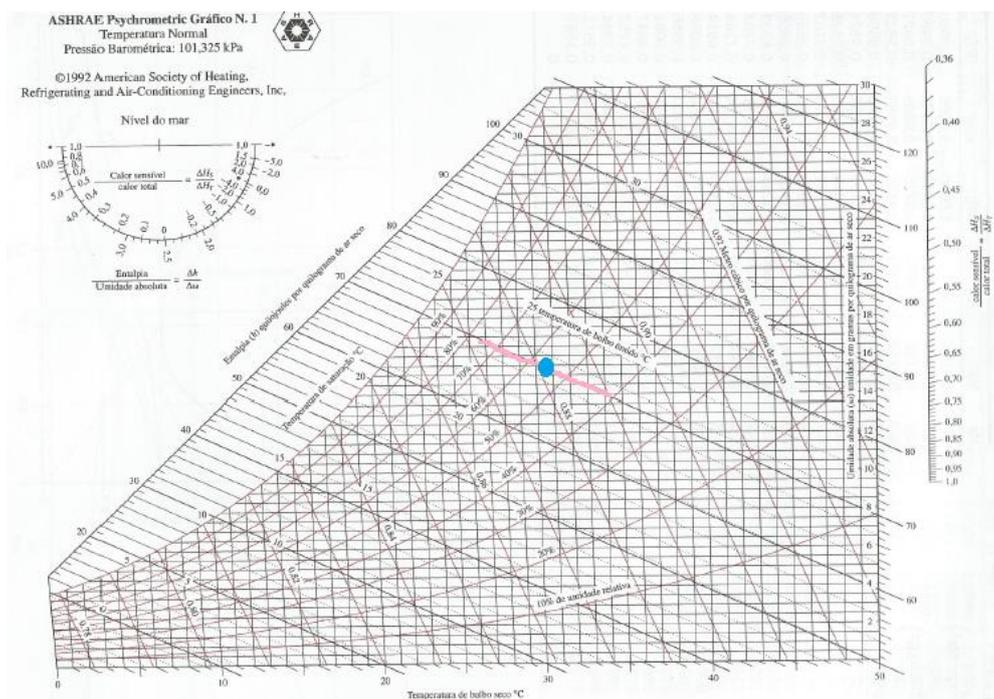


Figura 31: Gráfico Psicrométrico ASHRAE.

Fonte: Adaptado de Gráfico Psicrométrico ASHRAE.

Assim, a temperatura de bulbo úmido encontrada é de aproximadamente 23,5°C como demonstrado na figura 33.

Com objetivo de agilizar os cálculos da TBU, o software GRAPSI foi utilizado. As tabelas 9, 10, 11 e 12 apresentam os valores da TBS, URe, URs, TBUe, TBUs e da efetividade já calculada através da equação (1).

Tabela 10: Dados referentes as medições do dia 26/06/2019

Tamb (°C)	URamb (%)	Tbu amb. (°C)	Tar Resfriado (°C)	UR Ar Resfriado (%)	Tbu Ar Resfriado (°C)	Efetividade Resfriador (%)
24,4	73,9	20,8	22,6	83,2	20,4	50
24,1	73,0	20,4	22,7	81,8	20,3	37,8
24,0	73,5	20,4	22,6	81,3	20,2	38,9
24,0	71,8	20,1	22,3	81,3	19,9	43,6
24,1	71,8	20,2	22,5	81,3	20,1	41,0

24,2	72,0	20,3	22,3	82,0	20	48,7
24,0	72,1	20,2	22,2	82,1	19,9	47,4
24,3	72,0	20,4	22,4	81,8	20,1	48,7
24,2	73,0	20,5	22,6	81,5	20,2	43,2
24,1	73,3	20,4	22,6	81,6	20,2	40,5

Tabela 11: Dados referentes as medições do dia 19/07/2019

Tamb (°C)	URamb (%)	Tbu amb. (°C)	Tar Resfriado (°C)	UR Ar Resfriado (%)	Tbu Ar Resfriado (°C)	Efetividade Resfriador (%)
22,1	52,1	15,5	19,1	69,1	15,3	45,5
21,8	53,5	15,4	18,9	69,0	15,1	45,3
21,8	53,7	15,5	18,2	70,5	14,7	57,1
21,2	54,8	15,1	18,3	70,2	14,7	47,5
21,3	55,5	15,3	18,2	70,7	14,7	51,7
21,4	57,0	15,6	18,3	72,3	15,0	53,4
21,3	57,0	15,5	18,3	72,2	15,0	51,7
21,3	57,3	15,6	18,3	72,7	15,1	52,6
21,0	57,5	15,4	18,2	72,4	14,9	50,0
21,2	57,8	15,6	18,2	73,6	15,1	53,6
21,2	58,1	15,6	18,3	73,2	15,1	51,8
20,9	58,2	15,4	17,9	73,4	14,8	54,5
20,7	58,2	15,2	17,8	73,4	14,7	52,7
20,5	58,3	15,1	17,7	73,1	14,6	51,9
20,7	56,0	14,9	17,6	72,6	14,4	53,4
20,3	57,0	14,7	17,3	72,7	14,1	53,6

Tabela 12: Dados referentes as medições do dia 21/11/2019

Tamb (°C)	URamb (%)	Tbu amb. (°C)	Tar Resfriado (°C)	UR Ar Resfriado (%)	Tbu Ar Resfriado (°C)	Efetividade Resfriador (%)
22,5	81,7	20,1	21,4	90,5	20,2	45,8
22,4	81,3	20,0	21,6	88,7	20,2	33,3
23,6	79,4	20,9	21,7	89,1	20,2	70,4
23,4	80,8	20,9	22,0	88,9	20,6	56
24,1	78,5	21,2	22,8	87,5	21,2	44,8
24,1	78,8	21,2	23,1	85,6	21,2	34,5
25,8	71,5	21,7	24,4	81,2	21,9	34,1
25,9	65,5	20,9	24,9	77,2	21,8	20,0
26,9	64,4	21,6	25,7	75,9	22,3	22,6
27,0	66,3	22,0	25,7	76,0	22,3	26,0
27,5	62,5	21,8	26,0	73,9	22,3	26,3
28,0	59,5	21,7	25,7	77,5	22,5	36,5
27,8	60,6	21,7	25,8	73,9	22,1	32,8
28,2	58,9	21,8	25,6	78,3	22,6	40,6
27,7	61,8	21,8	25,7	77,0	22,5	33,9
28,1	63,5	22,5	25,7	75,6	22,3	42,9
28,1	61,9	22,2	25,0	74,2	21,4	52,5
28,1	60,2	21,9	23,3	75,9	20,1	77,4

Tabela 13: Dados referentes as medições do dia 22/11/2019

Tamb (°C)	URamb (%)	Tbu amb. (°C)	Tar Resfriado (°C)	UR Ar Resfriado (%)	Tbu Ar Resfriado (°C)	Efetividade Resfriador (%)
27,1	68,0	22,4	25,7	77,1	22,5	29,8
27,1	69,9	22,7	25,0	77,8	21,9	47,7
27,4	69,0	22,8	25,5	76,9	22,3	41,3

27,3	68,4	22,6	25,8	76,3	22,5	31,9
28,6	63,0	22,8	24,9	76,0	21,6	63,8
28,9	61,8	22,9	26,3	74,7	22,7	43,3
29,3	61,6	23,2	25,9	76,1	22,5	55,7
29,9	58,2	23,1	25,7	77,4	22,5	61,8
30,6	56,8	23,5	26,0	76,1	22,6	64,8
29,5	59,7	23,0	24,6	80,6	22,0	75,4
30,1	59,6	23,5	25,3	76,4	22,0	72,7
29,5	59,0	22,9	24,5	81,4	22,0	75,8
29,9	58,5	23,2	24,7	82,2	22,3	77,6

Através dos dados coletados observou-se como já esperado, que em sua maioria a eficiência se torna mais expressiva quanto maior for a temperatura de bulbo seco de entrada e menor for a umidade relativa do ar de entrada, isso explica a variação dos valores entre os testes realizados, essa variação pode ser vista nas figuras 34, 35, 36, e 37.

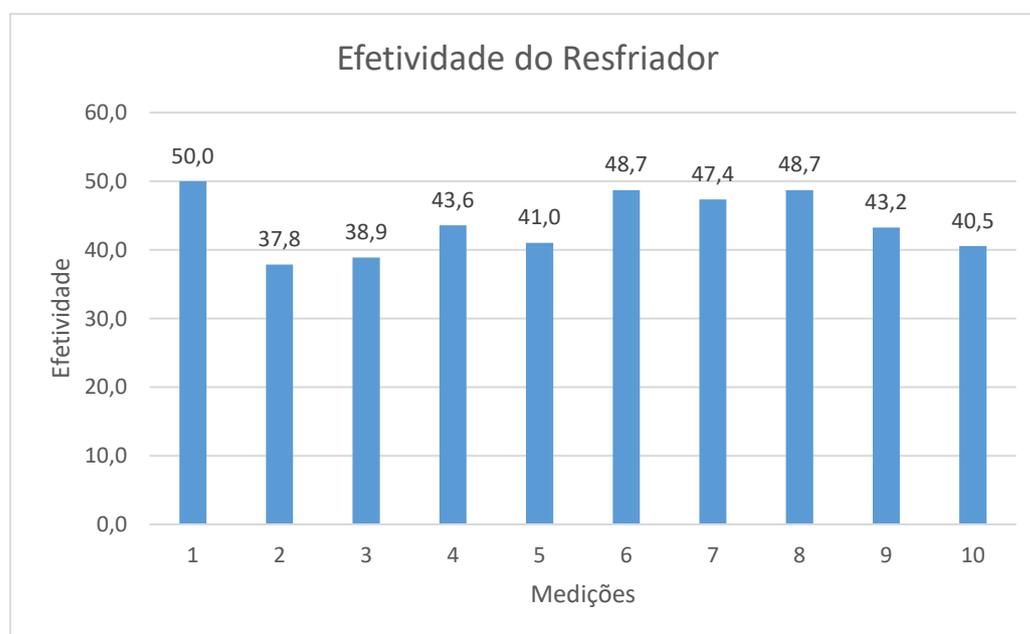


Figura 32: Resultado do cálculo da Efetividade 26/06.

Fonte: Pesquisa direta (2019).

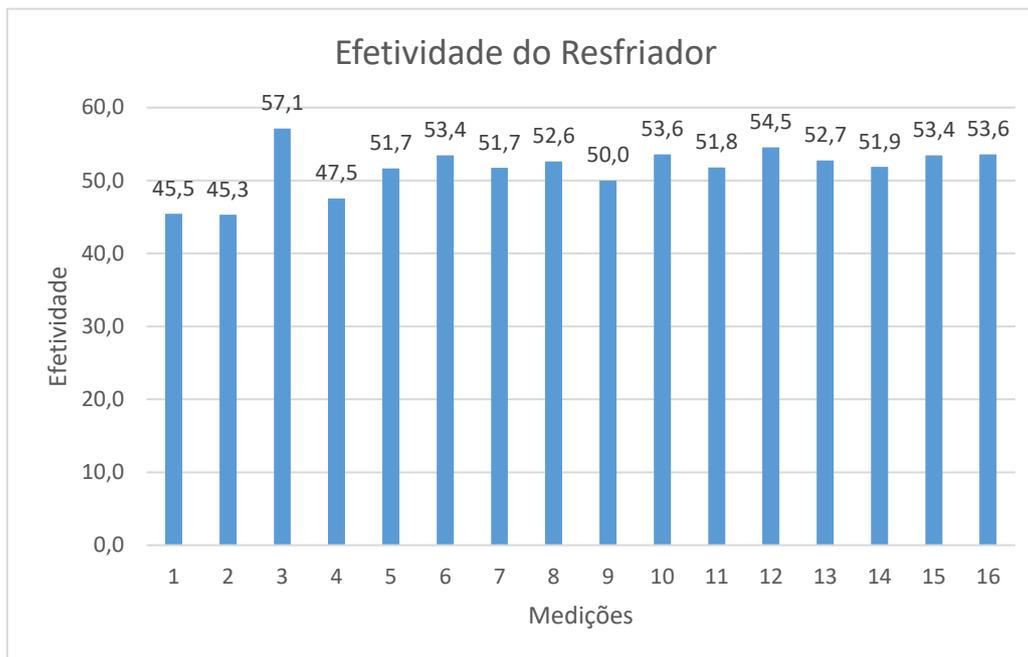


Figura 33: Resultado do cálculo da Efetividade 19/07.

Fonte: Pesquisa direta (2019).

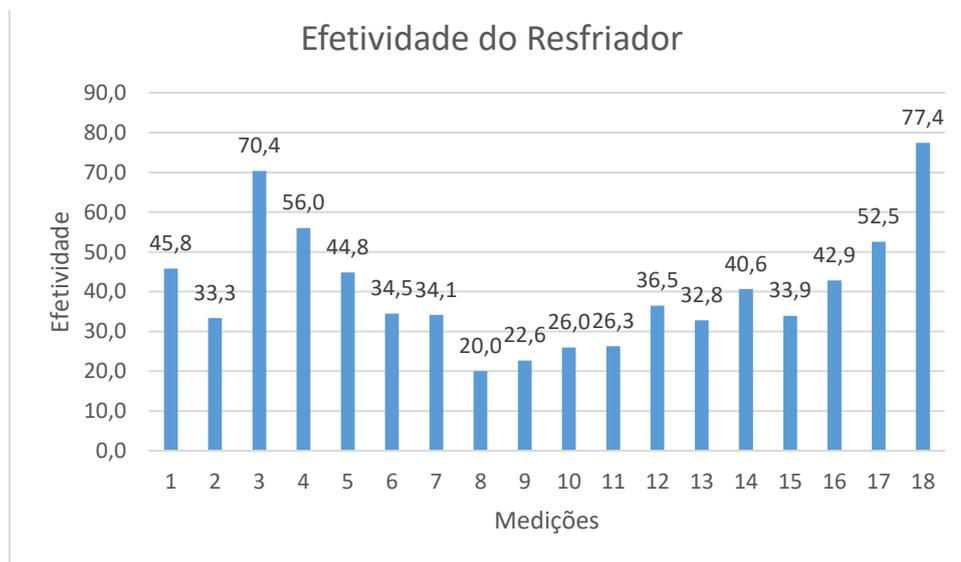


Figura 34: Resultado do cálculo da Efetividade 21/11.

Fonte: Pesquisa Direta (2019).

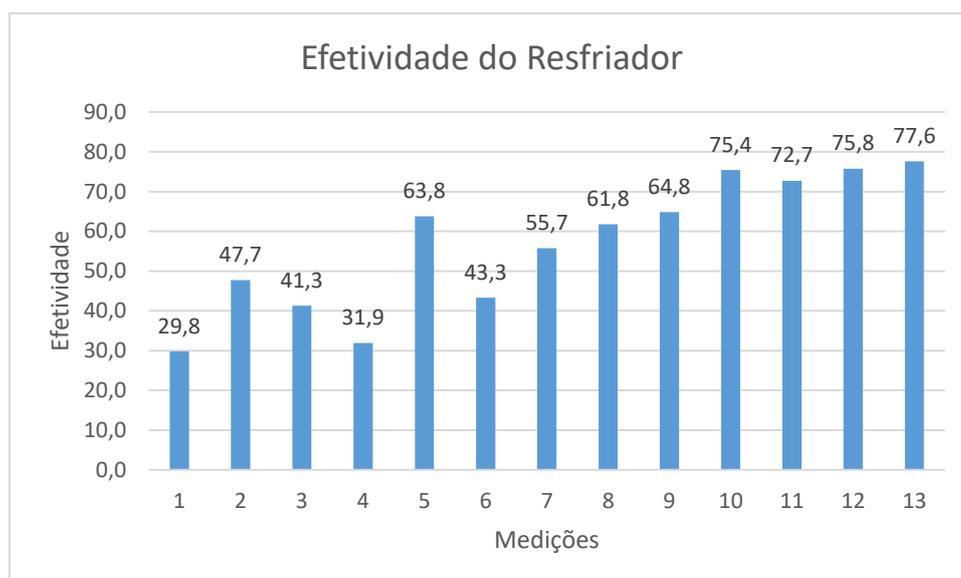


Figura 35: Resultado do cálculo da Efetividade 22/11.

Fonte: Pesquisa direta (2019).

Mediante os resultados dos testes foi encontrada uma média geral da efetividade de 48%, na figura 38 é possível ver a média da efetividade de cada medição.

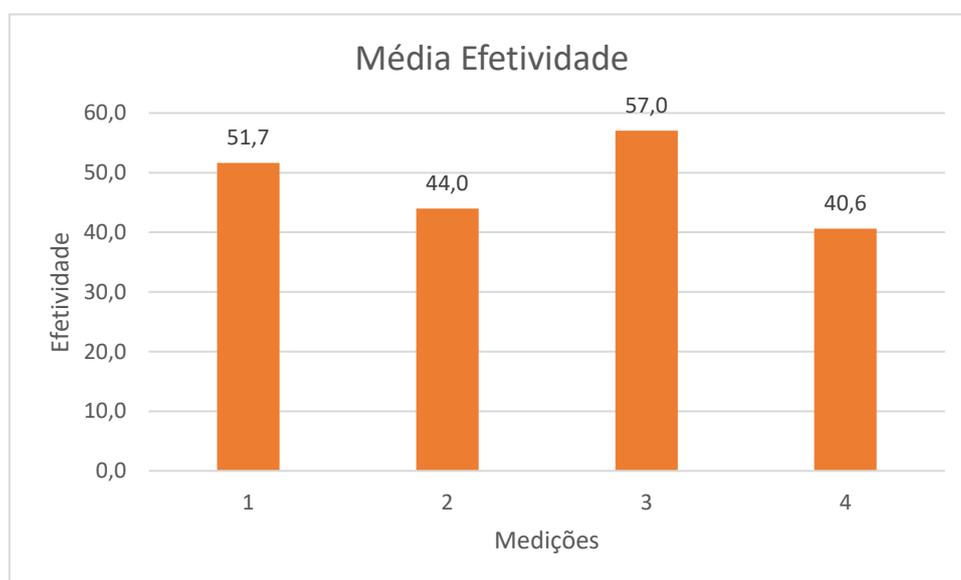


Figura 36: Resultado mostrando a média da efetividade de cada medição realizada.

Fonte: Pesquisa direta (2019).

Após as medições foi possível notar a grande variação na efetividade de climatização do processo de resfriamento direto, a mesma se deve ao fato de que em situações onde a temperatura do ambiente externo não seja alta e a sua umidade esteja alta o equipamento tem dificuldade em retirar o calor e aumentar a umidade.

Por outro lado, em situações em que a temperatura ambiente externa se encontra alta e a sua umidade relativa baixa, o equipamento é eficiente na retirada de calor, diminuição da temperatura, e no aumento da umidade relativa do ar.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho teve como objetivo construir um sistema de resfriamento evaporativo de baixo custo e realizar o estudo experimental do seu desempenho, com relação a diminuição da temperatura e ao aumento da umidade relativa do ar, respectivamente, bem como da sua eficiência.

Os resultados obtidos através da avaliação do funcionamento em condição real de trabalho permitem concluir que:

- O protótipo funciona de acordo com o funcionamento básico de um sistema de resfriamento evaporativo;

- Ocorreu o resfriamento do ar externo soprado pelos coolers;

- A umidade relativa do ar resfriado aumentou como o previsto de acordo com o funcionamento do sistema de resfriamento evaporativo;

- Para as condições da primeira etapa de medições o sistema de resfriamento evaporativo proposto proporcionou uma redução de temperatura da ordem de 6,9% e de aumento da umidade relativa do ar da ordem de 12,6%. Para as condições de medição da segunda etapa foram obtidos para os mesmos parâmetros, 14,2% e 27,6%, respectivamente. Para as condições de medição da terceira etapa foram obtidos para os mesmos parâmetros, 7,06% e 17%, respectivamente. Finalmente, para as condições de medição da segunda etapa foram obtidos para os mesmos parâmetros, 12,1% e 47,53%, respectivamente.

- Levando em consideração os valores médios encontrados das efetividades que para a primeira medição foi de 51,7%, para a segunda 44,0%, para a terceira 57,0% e para a quarta 40,6%, entende-se que seu valor é totalmente dependente da variação climática do dia em que se faz as medições.

Mesmo diante das dificuldades encontradas na realização dos testes devido às condições ambientais serem muitas vezes desfavoráveis à sua realização, refletindo em uma dificuldade de se avaliar o desempenho do equipamento a partir dos resultados obtidos, verificou-se que este equipamento apresentou um bom desempenho, principalmente nos períodos em que o ambiente externo se apresentava em condições de baixa umidade relativa e elevada temperatura.

Observou-se um aumento da UR e redução da TBSs, os quais acredita-se que se o sistema for utilizado em residências proporcionará aos moradores, um maior conforto, sobretudo, pois, algumas pessoas apresentam problemas respiratórios que são agravados com o uso do ar condicionado que apesar de ser muito efetivo na diminuição de temperatura pode reduzir significativamente a umidade relativa do ar.

Alinhado a isso, é possível afirmar que valores expressivos como o de 77,6% de efetividade, provam que o resfriador é útil tanto para resfriar o ar quanto para umidificá-lo.

As contribuições desta pesquisa estão relacionadas ao seu caráter basicamente experimental que resultaram em geração de dados e material para futuras discussões sobre o tema, além de abrir algumas possibilidades para novos estudos.

Como recomendações para futuros trabalhos, sugere-se:

- Projetar e construir um sistema de aquecimento e desumidificação do ar ambiente e incorporá-lo ao sistema de resfriamento evaporativo. Dessa forma tem-se a possibilidade de controlar em laboratório as condições do ar de entrada dos experimentos;

- Desenvolver um modelo matemático e após programa computacional, realizar os cálculos da condição do ar na saída sistema de resfriamento evaporativo de baixo custo.

- Projetar e construir um sistema de reabastecimento de água automático;

- Pesquisar coolers mais silenciosos para se obter um conforto acústico melhor;

- Realizar o cálculo médio de consumo de energia elétrica e comparar com sistemas de resfriamento convencionais;

- Realizar o cálculo da carga térmica em um ambiente específico.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHRAE, ASHRAE **Handbook: Fundamentals**. I-P. ed. [S.I.]: [s.n.], 2009.
- BEN. **Relatório Síntese**. Empresa de Pesquisa energética, 2017.
- BHATIA, A. **Principles of Evaporative Cooling System**. [S.I.]. 2012.
- CAMARGO, J.R.; EBINUMA, C.D. **Resfriamento evaporativo: poupando a energia e o meio ambiente**. Jornada de Iniciação Científica e de Pós-graduação, UNESP/FEG, 2001.
- CAMARGO, J. R. D. **Sistemas de resfriamento evaporativo e evaporativo-adsortivo aplicado ao condicionamento de ar**. Guaratinguetá. 2003.
- CAMARGO, J. R. **Resfriamento evaporativo: Climatização ecológica**. Rio de Janeiro: Editora Moderna, 2009.
- CAROSI, G. A. B. **Resfriamento Evaporativo: estudo do potencial de sua aplicação no Brasil**. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. 2006.
- CASTRO, W. P.; PIMENTA, J. M. D. **Modelagem de simulação de painéis evaporativos diretos**. Proceedings of the 10^o Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering – ENCIT 2004 – ABCM, Rio de Janeiro, Brazil, 2004.
- EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Nota Técnica Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética**, 2018.
- FANGER, P. O. **Thermal Comfort**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1970.
- FILIPPINI, R. **Operations management research: some reflections on evolution, models and empirical studies in OM**. International Journal of Operations and Production Management. v.17, n.7, p. 655-70, 1997.
- FROTA e SCHIFFER, **Manual de conforto térmico**, Livraria Nobel S.A.; 1987.
- GASPAR. A. **Física**. São Paulo, v.2, Ática, 2002.
- GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4^a edição. São Paulo: Editora Atlas, 2002.
- GONÇALVES, W.B. **Estudo de índices de conforto térmico avaliados com base em população universitária na região metropolitana de Belo Horizonte**. Dissertação

(Mestrado). Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.

HERNANDEZ, O.S.; BORGES, G.A.; ALEGRIAS, J.G.P; PIMENTA, J.M.D.

Resfriamento evaporativo, Estudio de aplicacion. MERCOFRIO – Congresso de Ar condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul. Curitiba-PR, 2008.

INCROPERA, F.P., BERGMAN, T.L., DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 6ª ed., Editora LTC, Rio de Janeiro-RJ, 2008.

ISSAO, A. **Avaliação do uso de resfriamento evaporativo indireto em sistemas de climatização de edificações comerciais,** 2011.

LUNA, Sergio Vasconcelos de. **Planejamento de pesquisa: uma introdução.** São Paulo: EDUC, 1997.

MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI.** Brasília: [s.n.], v. Série Biodiversidade, vol. 6, 2005.

MARTINS, J.; BICUDO, M. **A pesquisa qualitativa em psicologia.** São Paulo: Centauro, (2005).

PATIL, C. R.; HIRDE, K. G.; BADNERA. The Concept of Indirect Evaporative cooling. **International Journal of Engineering Science and Innovative Technology**, v. 2, n. 5, September 2013.

SILVA, J. G.; SOUZA, G. J.; DA ROCHA, S. P. **Desenho técnico para refrigeração e climatização.** 1º Edição. ed. São José, 2014.

SILVA, J. D. S. E. **Secagem e armazenamento de produtos agrícolas.** Viçosa: Aprenda Fácil, 2000.

SZOKOLAY, S. V.; AULICIEMS, A. Thermal Confort. In: **Passive and Low Energy Architecture International, Design Tools and Techniques.** Brisbane: [s.n.], 1997.

WU, J. M.; HUANG, X.; ZHANG, H. **Theoretical analysis on heat and mass transfer in a direct evaporative cooler.** University of Shangay for Science and Thecnology. Shangay. 2008.

Certifico que a aluna **Aline de Paula Rafael**, autora do trabalho de conclusão de curso intitulado “**Estudo experimental do desempenho de um sistema alternativo de resfriamento de ar de baixo custo**”, efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.



DSc. Luís Antônio Bortolaia

Orientador

Ouro Preto, 17 de dezembro de 2019