



**UNIVERSIDADE
ESTADUAL DO
MARANHÃO**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO

Curso de Engenharia Mecânica

Juan Fernandes Azevedo Cutrim

**Análise de um climatizador de ar evaporativo
direto utilizando o método de arranjos
ortogonais de Taguchi**

São Luís - MA

2017

Juan Fernandes Azevedo Cutrim

**Análise de um climatizador de ar evaporativo direto
utilizando o método de arranjos ortogonais de Taguchi**

Monografia apresentada ao Curso de
Engenharia Mecânica da Universidade
Estadual do Maranhão para o grau de
bacharelado em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Msc. Valdirson Pereira Mendes

São Luís - MA

2017

Juan Fernandes Azevedo Cutrim

Análise de um climatizador de ar evaporativo direto utilizando o método de arranjos ortogonais de Taguchi

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão para o grau de bacharelado em Engenharia Mecânica.

Trabalho aprovado. São Luís - MA, 27 de Junho de 2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Msc. Valdirson Pereira Mendes
(Orientador)
Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Msc. Flávio Nunes Pereira
Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Msc. Paulino Martins
Universidade Estadual do Maranhão

Agradecimentos

Agradeço a Deus acima de tudo por me conceder a sabedoria para aprendizado e desenvolvimento deste trabalho, dando-me forças quando me faltava e colocando em meu caminho pessoas excepcionais que me orientaram e incentivaram a atingir meus objetivos. Ao professor Msc. Valdirson Pereira Mendes por acreditar em meu potencial e me orientar durante o processo de desenvolvimento deste projeto, ofertando-me ferramentas e a instrumentação necessária para desenvolvê-lo.

À minha família pelo suporte e constante incentivo na busca do meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Ao meu bravo amigo Rodrigo Rafael, colega de longas jornadas e que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos e pela maravilhosa convivência no decorrer dos anos.

Aos professores de graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão, pelos ensinamentos passados no decorrer do curso.

Resumo

Uma das maiores preocupações mundiais é a busca por melhores tecnologias aliadas ao bom convívio com o meio ambiente. De forma a contribuir com esse convívio, este trabalho propõe estudar a eficiência de um climatizador evaporativo através da aplicação da melhor configuração de características controláveis, experimentar e comparar diferentes arranjos a fim de encontrar uma configuração otimizada por meio da utilização do método de Taguchi. Foram experimentados três fatores, sendo estes a velocidade do ventilador, a temperatura inicial da água e a presença de isolamento no reservatório. Os resultados, utilizando a metodologia Taguchi demonstraram que a melhor eficiência ocorre quando utilizado o arranjo com baixa rotação do ventilador, água a 16 °C e reservatório sem isolamento, os experimentos demonstraram que a melhor configuração utiliza o ventilador em baixa rotação, temperatura inicial da água 16 °C e reservatório com isolamento em isopor. Como conclusão, foi observado que ruídos provenientes das condições climáticas interferem fortemente na condução dos experimentos. Também pode-se afirmar que embora possua uma boa eficiência, o climatizador evaporativo não é o melhor equipamento de resfriamento para a cidade de São Luís, pois os valores de umidade relativa foram iguais ou superiores a 73,07%, valor este acima do recomendado para conforto térmico.

Palavras-chaves: climatizador, evaporação, eficiência, resfriamento

Abstract

One of the biggest concerns in the world is the search for better technologies combined with a good relationship with the environment. In order to contribute to this conviviality, this work proposes to study the efficiency of an evaporative air conditioner by applying the best configuration of controllable characteristics, experimenting and comparing different arrangements in order to find an optimized configuration using the Taguchi method. Three factors were tested, such as fan velocity, initial water temperature and the presence of insulation in the reservoir. The results, using the Taguchi methodology, showed that the best efficiency occurs when using the arrangement with low fan rotation, water at 16 °C and the reservoir without insulation, the experiments demonstrated that the best configuration uses the fan in Low spin, initial water temperature 16 °C, and styrofoam insulated reservoir. As a conclusion, it was observed that noise from the climatic conditions interfered strongly in the conduction of the experiments. It can also be stated that, despite the good efficiency, the evaporative air conditioning is not the best cooling equipment for the city of São Luís, since the relative humidity values were equal to or greater than 73.07 %, which is above the Recommended for thermal comfort.

Keywords: Air conditioner, evaporation, efficiency, cooling

Lista de ilustrações

Figura 1 – Sistema climatizador evaporativo do tipo RED	17
Figura 2 – Carta psicrométrica representando o resfriamento evaporativo direto real	18
Figura 3 – Diagrama de transferência de calor através da colmeia de celulose . . .	18
Figura 4 – Colmeia de celulose corrugada (Papel Kraft)	22
Figura 5 – Blackboard (microcontrolador)	23
Figura 6 – Sensor de temperatura do tipo sonda DS18B20 a prova d’água	24
Figura 7 – Placa de ensaios (Protoboard)	25
Figura 8 – Psicrômetro Digital modelo 8706	26
Figura 9 – Esquema de ligação de múltiplos sensores DS18B20 (Normal Power Mode)	27
Figura 10 – Esquema de ligação de múltiplos sensores DS18B20 (Parasite Power Mode)	27
Figura 11 – Protótipo climatizador evaporativo	30
Figura 12 – Bancada para experimentações	30
Figura 13 – Temperatura inicial da água versus tempo (Experimento 01)	32
Figura 14 – Eficiência versus tempo (Experimento 01)	32
Figura 15 – Temperatura inicial da água versus tempo (Experimento 02)	33
Figura 16 – Eficiência versus tempo (Experimento 02)	34
Figura 17 – Temperatura inicial da água versus tempo (Experimento 03)	35
Figura 18 – Eficiência versus tempo (Experimento 03)	35
Figura 19 – Temperatura inicial da água versus tempo (Experimento 04)	36
Figura 20 – Eficiência versus tempo (Experimento 04)	37
Figura 21 – Gráfico dos efeitos principais (valores em unidades percentuais para eficiência)	38
Figura 22 – Temperatura inicial da água versus tempo (Experimento Confirmatório)	39
Figura 23 – Eficiência versus tempo (Experimento Confirmatório)	40
Figura 24 – Comparação das eficiências	41
Figura 25 – Comparação das temperaturas da água	42

Lista de tabelas

Tabela 1 – Arranjo ortogonal L4 Taguchi	20
Tabela 2 – Arranjo ortogonal L4 aplicado ao projeto	29
Tabela 3 – Custo para montagem do protótipo	29
Tabela 4 – Médias obtidas experimentalmente	37

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
ISO	<i>Organização Internacional de Normalização</i>
GSG	<i>Gauvanized Sheet Gauge</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
TBS	<i>Temperatura de Bulbo Seco</i>
TBU	<i>Temperatura de Bulbo Úmido</i>
PVC	<i>Policloreto de vinila</i>
REI	<i>Resfriamento evaporativo Indireto</i>
RED	<i>Resfriamento evaporativo Direto</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Justificativa	12
1.2	Objetivo Geral	12
1.3	Objetivos Específicos	12
1.4	Contribuições	13
1.5	Trabalhos Relacionados	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Climatizador evaporativo	15
2.1.1	Performance do climatizador evaporativo	15
2.1.2	Resfriamento evaporativo	16
2.1.3	Psicrometria	17
2.1.4	Carta psicrométrica para resfriamento evaporativo direto	17
2.1.5	Distribuição da temperatura no bloco de resfriamento (colmeia de celulose)	18
2.2	Métodologia de Taguchi	19
2.2.1	Arranjos ortogonais	19
3	MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1	Componentes mecânicos	21
3.1.1	Carenagem	21
3.1.2	Hélice	21
3.1.3	Colmeia de celulose	21
3.2	Material hidráulico	22
3.3	Material elétrico e eletrônico	22
3.3.1	Componentes elétricos	22
3.3.2	Componentes eletrônicos	23
3.4	Diagrama de ligação do circuito	26
3.5	Desenvolvimento da metodologia Taguchi	28
3.6	Custo de montagem do protótipo	29

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1	Procedimentos iniciais	31
4.2	Experimento 01	31
4.3	Experimento 02	33
4.4	Experimento 03	34
4.5	Experimento 04	36
4.6	Análise Taguchi	37
4.7	Otimização do climatizador	38
4.7.1	Experimento confirmatório	39
4.8	Avaliação dos resultados obtidos	40
5	CONCLUSÃO	43
5.1	Sugestão para trabalhos futuros	44
	REFERÊNCIAS	45

1 Introdução

Atualmente, a grande questão mundial é “ Como proporcionar o conforto humano sem prejudicar o meio ambiente? ” Este projeto tem como diretriz uma solução para um dos fatores que proporcionam prejuízo ao meio ambiente. Uma forma de ser sustentável é através da redução ou eliminação de desperdícios, através do reaproveitamento de algo que anteriormente seria descartado.

O resfriamento causado pela evaporação da água já foi observado, segundo Lopes (2006), desde a antiguidade, onde panos úmidos eram utilizados em pátios internos para proporcionar um ambiente mais ameno, nos tempos Egípcios onde escravos abanavam jarros de paredes porosas para resfriar a água em seu interior, neste caso, uma fração da água evapora através das paredes do vaso resfriando assim a água remanescente.

Os sistemas condicionadores de ar utilizam, em sua grande maioria, gases HC (Hidrocarboneto) e HCFCs (Clorofluorcarbonetos) como fluido refrigerante, gases estes nocivos para o meio ambiente (OLIVEIRA, 2011), entretanto, climatizadores de ar evaporativos utilizam apenas o ar ambiente, sendo esta sua grande vantagem.

Além disso, diversos autores afirmam que este sistema possui um baixo consumo de energia elétrica, sendo este último um problema nacional, pois nos últimos anos houve deficiência na geração energia devido à elevada demanda energética no Brasil conforme constatado por Filho (2013) em sua publicação na Revista Interesse Nacional.

Neste projeto utilizou-se um protótipo de um climatizador de ar evaporativo no qual foi utilizada água proveniente do sistema de drenagem de aparelhos de ar condicionado convencionais (neste caso o ar condicionado Split, modelo piso teto), pois esta água encontra-se a uma temperatura mais baixa que a ambiente, vale ressaltar que normalmente esta água é liberada diretamente em uma rede pluviométrica sendo assim desperdiçada. Em sua publicação para a revista Ambiente e Água, Camargo (2004) caracterizou o sistema de climatização evaporativa como ambientalmente amigável, isso deve-se ao fato de que este modelo de climatização opera por meio da indução da transferência de calor e de massa nos quais os fluidos de trabalho são simplesmente o ar e a água.

A utilização de condicionadores de ar convencionais promovem um baixo índice

de renovação de ar em função do tamanho do ambiente e da quantidade de pessoas, alguns modelos não possuem sistemas de renovação de ar. No caso dos climatizadores evaporativos quase todo o ar é renovado, o que mantém a taxa de oxigênio no ambiente em níveis estáveis, além disso, a renovação de ar diminui a possibilidade da formação de colônias de fungos ou bactérias no recinto, que por sua vez diminui a probabilidade de contágios e surgimento de problemas respiratórios comuns aos aparelhos convencionais de ar condicionado (OLIVEIRA, 2011).

1.1 Justificativa

O estudo e pesquisas relacionados a climatizadores de ar do tipo evaporativo tem um papel fundamental no desenvolvimento social e tecnológico do mundo, pois trata-se de uma forma de obter o conforto térmico sem a necessidade da utilização de gases nocivos a camada de ozônio ou contaminantes do meio ambiente. Desta forma poderemos atingir o conforto térmico com menores custos de instalação e manutenção.

1.2 Objetivo Geral

Promover uma maior eficiência do climatizador evaporativo aproveitando a água do sistema de drenagem dos condicionadores de ar convencionais do tipo split.

1.3 Objetivos Específicos

Com base no objetivo principal pretende-se atingir os seguintes objetivos:

- Construir protótipo de um climatizador evaporativo.
- Encontrar combinação de fatores que promovam melhor eficiência.
- Traçar curva da temperatura da água do reservatório.
- Medir Eficiência para combinações dos arranjos experimentais.

1.4 Contribuições

As principais contribuições desse trabalho são:

- Estudo de alguns dos parâmetros de desenvolvimento nos quais proporcionam melhorias do produto.
- Análise da interdependência de alguns parâmetros do climatizador.
- Incita pesquisas para desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias voltadas para climatizadores evaporativos.
- Torna este tipo de tecnologia mais conhecida.

1.5 Trabalhos Relacionados

Camargo(2008) apresentou um modelo matemático para resfriadores evaporativos obtidos através da equação de conservação da energia para um determinado volume de controle e analisando a transferência de calor e massa entre o ar úmido e a água. A equação resultante permitia determinar o resfriamento evaporativo direto (DEC – Direct Evaporative Cooling) e comparar com valores experimentais.

Wu e Huang (2008) em sua pesquisa, utilizando colmeia de celulose como trocador de calor, observou que a espessura do trocador de calor e a velocidade do ar frontal são dois fatores principais que influenciam a eficiência do climatizador evaporativo direto. Também encontrou uma correlação da eficiência de resfriamento derivada da análise do balanço energético do ar.

Sanjay e Kumar (2016) realizaram estudos sobre conforto térmico em 32 construções que utilizam ventilação natural coletando um total de 2610 formulários ao longo de 4 anos, abrangendo todas as estações, um amplo grupo de idades, tipos de roupas utilizadas no ambiente e tipo de construção. Seus resultados indicaram que os entrevistados sentiram o conforto térmico em faixas diferentes das condições sugeridas pelos padrões da ASHRAE 55 e da ISO-7730.

Kachhwaha e Prabhakar (2016) apresentaram uma metodologia simples e eficiente para desenvolver um resfriador doméstico, prevendo a performance do meio evaporativo e

determinando características para um melhor resfriamento utilizando como variáveis de entrada para formulação a temperatura de bulbo seco, humidade relativa, velocidade do ar, temperatura da água e vazão e propriedades geométricas do meio evaporativo.

Sodha e Somwanshi (2012) avaliaram a variação da temperatura da água através da do fluxo em um painel evaporativo. Os modelos analíticos e experimentais estiveram bastante coincidentes, além disso eles puderam observar que a água atingiu seu estado de equilíbrio após aproximadamente uma hora.

Em relação a o método Taguchi, Prates (1998) e muitos outros autores consideram este método como sendo uma abordagem que assegura a qualidade através do projeto, no qual se utiliza da identificação e controle de variáveis críticas, também conhecidas como ruídos, nas quais fazem ocorrer desvios na qualidade do produto e/ou processo. Através da utilização no delineamento de experimentos na procura de parâmetros que torne o produto robusto às fontes de variabilidade.

2 Referencial teórico

Neste capítulo será abordado conceitos e pesquisas importantes nos quais direcionaram este projeto para melhor entendimento dos ensaios realizados. O projeto se desenvolve através da montagem do protótipo, realização dos ensaios e discussão dos resultados obtidos.

2.1 Climatizador evaporativo

Através da combinação lógica de um trocador de calor e uma torre de resfriamento tem-se o resfriador evaporativo, este utiliza-se do processo de resfriamento da água característico das torres de resfriamento com o objetivo de arrefecer o fluido de processo no trocador de calor. (DONNI, 2006)

O princípio de funcionamento de resfriadores evaporativos acontece através da conversão do calor sensível para calor latente, onde o ar não-saturado é resfriado quando forçado sua passagem através de uma superfície úmida, utilizando geralmente sopradores ou ventiladores, deste modo, parte do calor sensível é transferido para água e torna-se calor latente evaporando uma parte da água. (WATT, 1963)

Para um climatizador de ar evaporativo é essencial obedecer as faixas adequadas de bulbo seco e umidade relativa do ar, bem como os meses ou estações do ano que se pode certificar sua viabilidade para proporcionar conforto térmico para os ocupantes de determinado espaço, apesar disso, além das condições climáticas favoráveis, deve-se observar que diversos outros aspectos do climatizador podem influenciar para obtenção de maior eficiência, por esta razão, é necessário investigar algumas dessas características a fim de conhecer o melhor arranjo para sua otimização.

2.1.1 Performance do climatizador evaporativo

A ASHRAE Standard (2008) define que a eficiência dos painéis evaporativos de contato ar-água deve ser medida pela eficiência de saturação evaporativa, uma clássica equação que envolve a queda na temperatura de bulbo seco real dividido pela queda de

temperatura possível. A queda de temperatura máxima ocorre quando a temperatura de bulbo seco se iguala a temperatura de bulbo úmido, este ponto equivale a região saturada de vapor de água.(OLIVEIRA, 2011)

$$\varepsilon = \frac{TBS_e - TBS_s}{TBS_e - TBU_s} \quad (2.1)$$

Onde, TBS_e equivale a Temperatura de bulbo seco na entrada, TBS_s é igual a temperatura de bulbo seco na saída e TBU_s é a temperatura de bulbo úmido, cujo valor é equivalente nas proximidades da interface ar-água

2.1.2 Resfriamento evaporativo

Sistemas evaporativos são sistemas simples e apropriados para utilização em inúmeras regiões do planeta, por esta razão o potencial de utilização dessa tecnologia para o conforto térmico é enorme, além da capacidade de serem explorados como conservadores de energia gerenciadores da demanda e redutores da emissão de CFC's e CO₂.(CAMARGO, 2004)

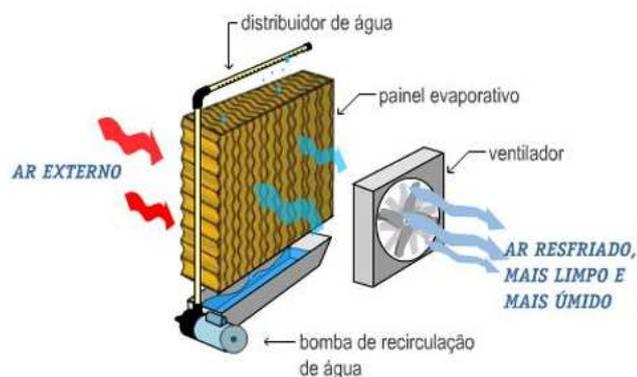
- Resfriamento evaporativo direto (RED)

Os climatizadores de ar ambiental do tipo resfriamento evaporativo direto (RED) são sistemas que promovem o resfriamento do ar a partir do contato direto com a água, seja através da área superficial do líquido, seja por uma superfície sólida umedecida ou pela água pulverizada.

- Resfriamento evaporativo indireto (REI)

Outro sistema de resfriamento evaporativo é conhecido como resfriamento evaporativo indireto (REI), este não faz parte do objeto de estudo deste trabalho, entretanto é importante que analisemos seu funcionamento. Nesta forma de resfriamento a água não entra em contato direto com o ar, ela então circula no interior de dutos ou canais e o ar passa em um fluxo exterior aos tubos.

Figura 1 – Sistema climatizador evaporativo do tipo RED



Fonte – (OLIVEIRA, 2011)

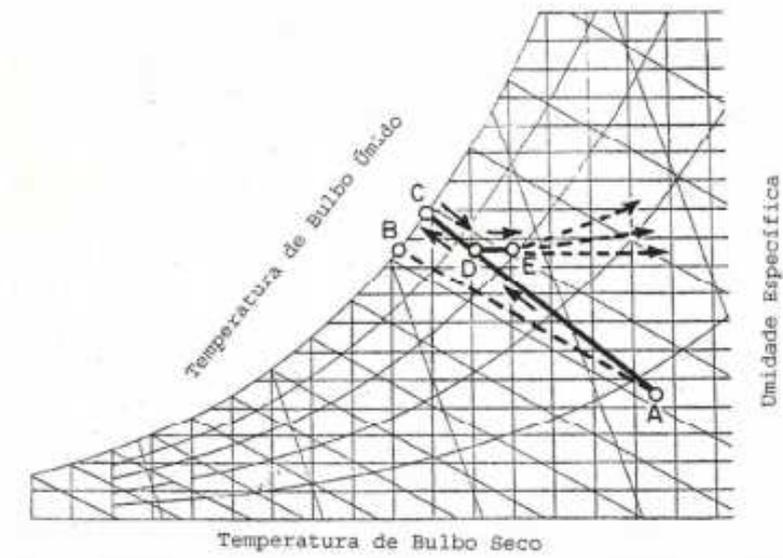
2.1.3 Psicrometria

O ar atmosférico é composto principalmente pela mistura de 4 gases e vapor d'água sendo estes gases N₂ – Nitrogênio (78,09%), O₂ – Oxigênio (20,95%), Ar – Argônio (0,93%) e CO₂ – Dióxido de carbono (0,03%), é razoável assumir que estes gases comportam uma mistura homogênea denominada de ar seco e por sua vez denomina-se a parte correspondente ao vapor d'água de ar úmido, desta forma refere-se a psicrometria como sendo o estudo da mistura de ar seco e vapor d'água. Um estudo importante, pois a parte correspondente ao ar úmido é passível de condensação nas condições de pressão e temperatura encontradas na atmosfera (PENA, 2017).

2.1.4 Carta psicométrica para resfriamento evaporativo direto

Na Figura 2 pode-se observar o ponto A que representa a condição do ar externo, o ponto B no qual corresponde a temperatura de bulbo úmido do ar externo, a linha AB referente ao processo de saturação adiabática (processo ideal), devido o processo não ser adiabático, pois o ar não é resfriado a uma entalpia e TBU constantes, a linha BC representa o ganho de calor real pelo ar ao resfriar a água até a temperatura C, parte do ar é resfriado e tem sua umidade elevada, porém outra parte se mantém nas condições de A, esta mistura resulta no ponto D e por sua vez são forçados pelo ventilador em dutos, onde absorvem calor, atingindo o estágio E resfriando o ambiente.

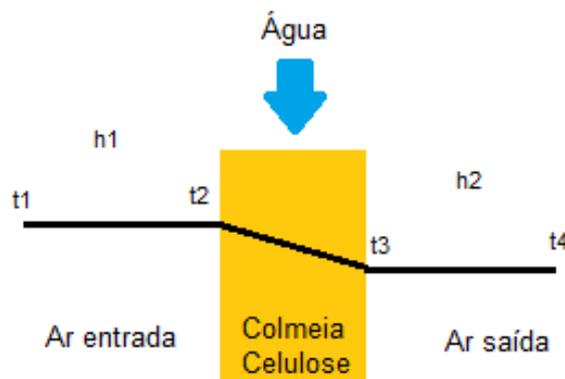
Figura 2 – Carta psicrométrica representando o resfriamento evaporativo direto real



Fonte – (BASTOS, 2011)

2.1.5 Distribuição da temperatura no bloco de resfriamento (colmeia de celulose)

Figura 3 – Diagrama de transferência de calor através da colmeia de celulose



Fonte – Autor

Pode-se assumir que o bloco de resfriamento (colmeia de celulose) funciona como uma parede porosa na qual é cercada por dois fluidos convectivos, sendo neste caso ambos os fluidos ar, cada um em uma temperatura diferente. E a transferência de energia através de calor é induzida como resultado de uma diferença de temperatura entre o sistema e

sua vizinhança ocorrendo no sentido decrescente de temperatura, ou seja, de onde tem maior temperatura para o que tem menor temperatura(Figura 3). (NDUKWU; MANUWA; OLUKUNLE O. J.AND OLUWALANA, 2013)

A taxa de condução térmica por um meio depende da geometria do meio, da sua espessura, de seu material assim como da diferença de temperatura através do meio. Considerando uma condução homogênea através de uma parede de espessura x , a diferença entre as temperaturas das duas faces é dada por $\Delta T = (T_1 - T_2)$. A lei de Fourier para condução térmica é expressa por:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

Onde $\frac{dT}{dx}$ é o gradiente de temperatura que toma um valor negativo quando a temperatura diminui ao longo de x .(CENGEL, 2003)

2.2 Metodologia de Taguchi

O método Taguchi de experimentos possibilita uma melhoria das características de um processo e/ou produto através da identificação e ajustes dos seus fatores controláveis, que por sua vez minimizarão a variação do produto final em comparação ao produto desejado e desta forma combater qualquer mudança que seja incontrolável (ex.: mudanças climáticas, variação de temperaturas, etc)(CORREIA; CARDOZA, 2011)

2.2.1 Arranjos ortogonais

Segundo Prates (1998), Taguchi desenvolveu um tipo de matriz especial na qual pode ser empregada em diversas situações, chamada de arranjo ortogonal. O arranjo ortogonal desenvolvido por Taguchi proporciona combinações específicas nas quais os graus de liberdade dos erros possam ser substituídos por grau de liberdade para fatores. O valor real deste arranjo permite avaliar uma variedade de fatores utilizando a menor quantidade de testes, desta forma ganha-se tempo na análise do projeto e economiza-se tempo e recursos financeiros com testes desnecessários.

Levando em consideração o objeto de pesquisa, deve-se elaborar um planejamento detalhado onde deve incluir a identificação dos principais fatores controláveis para que se

possa observar a possível influência e interação para cada um deles. Em seguida é feita a escolha da matriz ortogonal que melhor se adequa ao caso em estudo. Pimenta (2012) fez a escolha do arranjo ortogonal baseado na quantidade de fatores a ser estudado. Utilizando o mesmo método de avaliação, neste projeto será utilizado o arranjo ortogonal L4.

Tabela 1 – Arranjo ortogonal L4 Taguchi

Experimento	Fator A	Fator B	Fator C
01	Nível 1	Nível 1	Nível 1
02	Nível 1	Nível 2	Nível 2
03	Nível 2	Nível 1	Nível 2
04	Nível 2	Nível 2	Nível 1

A baixa rotação do motor ventilador proporciona uma velocidade média do ar de 4 m/s, por sua vez, a alta rotação do motor ventilador proporciona uma velocidade média de 6 m/s.

3 Materiais e métodos

Neste capítulo será apresentado os materiais utilizados para montagem do protótipo e execução dos ensaios, uma breve apresentação da sua função e motivo de sua utilização no projeto.

3.1 Componententes mecânicos

3.1.1 Carenagem

O climatizador teve sua estrutura feita em chapa zincada (galvanizada) bitola GSG nº22 cuja dimensão da chapa é de 2000x1200x0,80mm, essa chapa é responsável pela construção do volume de controle a ser estudado, além de proporcionar suporte para montagem dos equipamentos.

3.1.2 Hélice

O protótipo utilizado para realização dos experimentos foi composto de uma hélice 30cm de diâmetro e 6 pás, esta hélice é responsável pela criação da diferença de pressão na qual força a passagem do ar pela colmeia de celulose.

3.1.3 Colmeia de celulose

A colmeia de celulose rígida corrugada (papel Kraft), nas dimensões de 30x30x15cm, é um tipo de painel evaporativo de paredes porosas que tem por objetivo promover uma elevação da área de contato entre ar e água desta forma o ar umidece ao mesmo tempo que é resfriado ao passar pelo painel (SILVA, 2002), este blocos, ou "Pads", possuem uma inclinação a fim de evitar o carregamento de gotas d'água para dentro do ambiente.

Figura 4 – Colmeia de celulose corrugada (Papel Kraft)



Fonte – Mercado Livre em: 02/06/2017¹

3.2 Material hidráulico

Materiais hidráulicos utilizados:

- Mangueira transparente de diâmetro 1/2 polegada, pois esta proporciona melhor acoplamento a bomba d'água;
- Tubo e conexões em PVC, material de melhor custo benefício e praticidade para montagem;
- Silicone, tem por função vedar os vazamentos de água pela carenagem.

3.3 Material elétrico e eletrônico

3.3.1 Componentes elétricos

Os componentes elétricos utilizados:

- Ventilador monofásico com três velocidades 147W de potência;
- Bomba d'água com vazão máxima de 1000ml/h,
- Chave seletora com 4 posições, porém apenas três posições foram utilizadas, estas foram: desligar ventilador, baixa rotação e alta rotação;

¹ Disponível em: <http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-747242371-colmeia-evaporativa-para-climatizador-90-alt-x-30-larg-x-15-j-M>

- Cabo flexível 1,5mm²;
- Plug para tomada 2P+T (2 pinos e aterramento).

3.3.2 Componentes eletrônicos

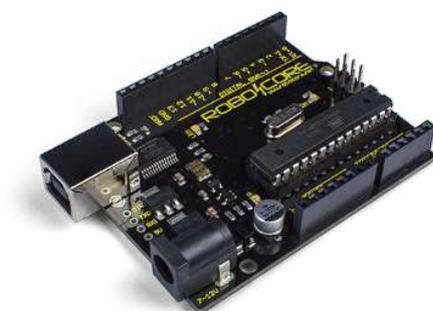
- Microcontroladores

A placa Arduino é composta por um microcontrolador Atmel, circuitos de entrada e saída e pode ser facilmente conectada à um computador e programada via IDE e utiliza a linguagem de programação C/C++ sem a necessidade de equipamentos extras além do cabo USB (THOMSEN, 2014).

A BlackBoard assim como nas placas Arduino possui 14 pinos digitais, 6 pinos analógicos e os pinos de alimentação. A placa pode ser alimentada a partir da porta USB de um notebook sendo responsável também por fazer a comunicação dos dados recebidos pelos sensores e o software Arduino ou através de uma fonte geradora de 5V. As informações são processadas e então enviada para os atuadores, os quais executam as funções desejadas (MCROBERTS, 2011).

Esta é uma ferramenta muito potente para diversas situações graças ao baixo custo, utilizar uma linguagem de programação simples e além disso, é possível encontrar uma ampla biblioteca de códigos pela internet.

Figura 5 – Blackboard (microcontrolador)



- Sensor de temperatura

Atualmente encontram-se diversos tipos de sensores para uma infinidade de aplicações, um exemplo disso é o sensor de temperatura, estes sensores podem ser encontrados no mercado de acordo com a aplicação, precisão, marcas e modelos. Neste projeto em específico, foi utilizado o sensor de temperatura modelo DS18B20. O sensor DS12B20 é um sensor de temperatura do tipo sonda. Uma grande vantagem deste modelo é que ele pode realizar medições em ambientes úmidos ou molhados, além disso possui a facilidade da utilização de interface em apenas um fio, trata-se também de um sensor bastante preciso, com uma exatidão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ e uma faixa de medição que varia de -55°C a 125°C . Este sensor ainda possui um ID único de 64 bits gravado em cada sensor, isso facilita muito para o usuário identificar as leituras individuais de cada sensor quando ligados mais de um sensor em um único pino, além disso possui uma rápida resposta, sendo seu tempo de consulta inferior a 750ms.

Figura 6 – Sensor de temperatura do tipo sonda DS18B20 a prova d’água



Fonte – Blog Filipe-Flop em 20/04/2017³

- Protoboard

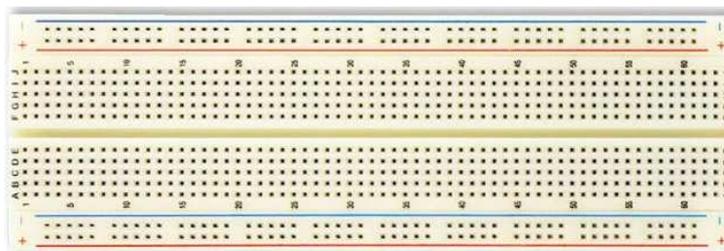
A placa de ensaios, também conhecida por matriz de contato ou protoboard, é uma placa com orifícios e conexões condutoras utilizada para montagem de circuitos elétricos experimentais. A grande vantagem da utilização desta placa é a facilidade na montagem de circuitos e componentes sem a necessidade de soldagem. Na superfície

² Disponível em: <https://www.robocore.net/loja/produtos/arduino-blackboard.html>

³ Disponível em: <http://blog.filipeflop.com/sensores/sensor-de-temperatura-ds18b20-arduino.html>

da matriz de contatos existem diversos furos para a inserção dos componentes eletrônicos. A Protoboard pode ser utilizada juntamente com a placa BlackBoard para monitoramento dos dados obtidos pelos sensores de temperatura, os quais foram conectados diretamente com a protoboard e alimentados pela placa Arduino.

Figura 7 – Placa de ensaios (Protoboard)



Fonte – Eletrônica Didática em 20/04/2017⁴

- Anemômetro

Anemômetros são aparelhos responsáveis pela medição da velocidade do vento, normalmente possuem três ou mais pás girando em torno de um eixo, desta forma, quanto mais rápido estas pás se deslocam, maior é a velocidade de deslocamento do ar (RAMOS; SEIDLER, 2011). Este deslocamento é calculado com um auxílio de um dispositivo de contagem, geralmente a velocidade do vento é dada em m/s, mas também pode se encontrar utilizando km/h.

- Psicrômetro

O psicrômetro é um instrumento utilizado para analisar o estado higrométrico da atmosfera, ou seja, medir a quantidade de vapor de água presente no ar atmosférico.

⁴ Disponível em: <http://www.eletronicadidatica.com.br/protoboard.html>

Figura 8 – Psicrômetro Digital modelo 8706



Fonte – Autor

3.4 Diagrama de ligação do circuito

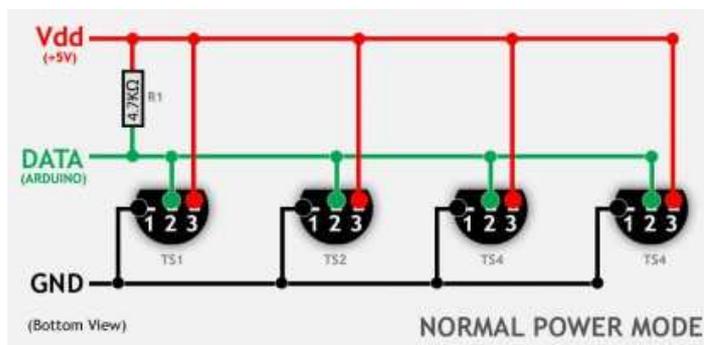
Como mencionado anteriormente, uma grande vantagem da utilização do sensor de temperatura DS18B20 é a possibilidade da conexão de múltiplos sensores em apenas um fio para os dados, isso é possível quando utiliza-se a biblioteca OneWire para a IDE do arduino. Quando se faz isto é possível identificar cada sensor pelo seu ID, o qual é único para cada sensor.

A comunicação em apenas um fio permite conectar os sensores de duas formas:

- A forma normal de alimentação (Normal Power Modes) utiliza-se de 3 fios, sendo o terminal V_{dd} conectado no pino de alimentação positiva +5V da placa arduino, o terminal GND do sensor conectado ao pino GND do Arduino e finalmente o terminal de dados ($DATA$) conectado a qualquer pino digital da placa Arduino, outro fator importante que deve ser mencionado é a necessidade da utilização de um resistor *Pull up* ($4,7k\Omega$) entre o Terminal V_{dd} e $DATA$ (O motivo da utilização desta resistência não é objeto deste trabalho).

⁵ Disponível em: <https://www.tweaking4all.com/hardware/arduino/arduino-ds18b20-temperature-sensor/>

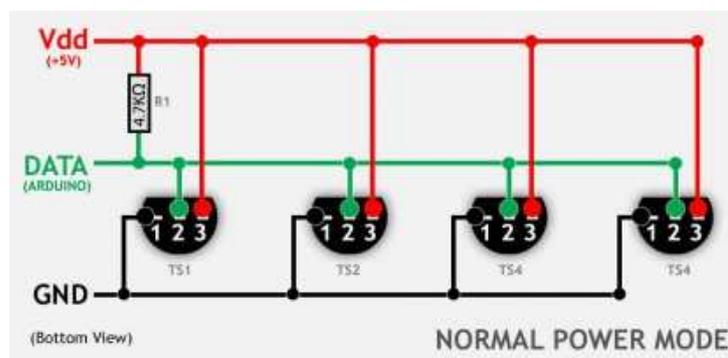
Figura 9 – Esquema de ligação de múltiplos sensores DS18B20 (Normal Power Mode)



Fonte – Tweaking4all em 26/05/2017⁵

- A forma parasita de alimentação (Parasite Power Mode) utiliza apenas 2 fios, sendo conectado tanto o terminal *GND* quanto o terminal *V_{dd}* do sensor no pino *GND* do Arduino e o terminal *DATA* conecta-se em qualquer pino digital da placa Arduino utilizando-se ainda a mesma resistência *Pull up* (4,7kΩ) entre os terminais *V_{dd}* e *DATA*.

Figura 10 – Esquema de ligação de múltiplos sensores DS18B20 (Parasite Power Mode)



Fonte – Arduino Br em 26/05/2017⁶

Embora a forma parasita de alimentação utiliza-se apenas de 2 fios, não se deve utilizar uma grande quantidade de sensores. Neste projeto foi utilizado a forma normal de alimentação, pois a quantidade de fios não foi um impeditivo para a realização deste projeto e além disso, as distâncias entre o Arduino e o local de medição não eram tão grandes.

⁶ Disponível em: <http://www.arduino.br/arduino/arduino-sensor/como-medir-temperatura-com-um-ds18b20/>

3.5 Desenvolvimento da metodologia Taguchi

A escolha dos fatores que serão investigados no projeto de um produto está relacionada as características de desempenho ou da resposta de interesse. Se durante os estágios iniciais estas características não foram alcançadas, elas podem ser aprimoradas. Na metodologia Taguchi espera-se relacionar fatores que se supõe influenciar nas características a serem aprimoradas. (SANCHES et al., 2001)

Neste projeto foram escolhidos três fatores principais que se supõe estar relacionado ao aprimoramento das características do climatizador evaporativo. Os fatores escolhidos foram: a velocidade do ventilador, temperatura inicial da água e a presença do isolamento no reservatório.

Assim como os fatores, é importante atribuir também os níveis que serão estudados. Taguchi recomenda utilizar dois níveis para cada fator, desta forma, minimiza-se a dimensão inicial dos experimentos. Assim, os níveis escolhidos para cada fator foram:

- Velocidade do ventilador: os níveis escolhidos foram baixa rotação ou alta rotação, a baixa rotação consiste em provocar um deslocamento de ar com velocidade média de 4 m/s, e a alta rotação promove um deslocamento médio de 6 m/s;
- Temperatura inicial da água: para este fator, os níveis escolhidos foram utilizar a água a 16 °C. Esta temperatura foi escolhida por ter sido a temperatura média encontrada quando se mede a temperatura da água proveniente do sistema de drenagem do ar condicionado convencional, em contrapartida, o segundo nível utiliza água proveniente da rede em temperatura ambiente (aproximadamente 28°C).
- Isolamento do reservatório: neste fator estima-se avaliar a importância do isolamento térmico no reservatório, por esta razão os níveis avaliados foram: utilizando isolamento em isopor 10mm ou sem isolamento.

Utilizando os fatores escolhidos e seus respectivos níveis é possível preencher os arranjos ortogonais de Taguchi referente a tabela ortogonal padrão *L4* de forma a realizar os experimentos de maneira eficiente reduzindo o quantitativo de experimentos. Esta matriz especial estuda até três fatores com dois níveis cada.

Tabela 2 – Arranjo ortogonal L4 aplicado ao projeto

Nº Experimento	Velocidade do Ventilador	Temperatura inicial da água	Isolamento do reservatório
01	Baixa	16°C	Isopor 10mm
02	Baixa	Temp. Ambiente	Sem isolamento
03	Alta	16°C	Sem Isolamento
04	Alta	Temp. Ambiente	Isopor 10mm

Fonte – Autor

Para cada configuração do experimento foram realizados 3 ensaios de modo que os resultados obtidos são equivalentes a média dos valores obtidos.

3.6 Custo de montagem do protótipo

Para montagem do protótipo foram utilizados os seguintes materiais:

Tabela 3 – Custo para montagem do protótipo

Quantidade	Descrição	Valor Unit.	Valor total
01 m	Cano PVC 20mm	R\$ 0,50	R\$ 0,50
01 un	Chapa zincada	R\$ 70,50	R\$ 70,50
01 un	Motor Ventilador 147W	R\$ 35,00	R\$ 35,00
01 un	Chave Seletora 4 posições	R\$ 5,00	R\$ 5,00
01 un	Placa de isopor 10mm	R\$ 2,00	R\$ 2,00
01 un	Bomba d'água	R\$ 69,75	R\$ 69,75
01 m	Mangueira 1/2"	R\$ 1,20	R\$ 1,20
01 un	Colmeia de celulose 30 x 30 x 15cm	R\$ 30,00	R\$ 30,00
01 un	Hélice 30cm	R\$ 15,00	R\$ 15,00
01 un	Cap PVC soldável	R\$ 0,20	R\$ 0,20
01 un	Joelho L/R PVC	R\$ 0,30	R\$ 0,30
01 un	Luva de redução	R\$ 0,20	R\$ 0,20
04 un	Abraçadeira de nylon	R\$ 0,15	R\$ 0,60
01 un	Plug macho para tomada (2P+T)	R\$ 2,50	R\$ 2,50
01 m	Cabo pp 3x1,5mm	R\$ 3,10	R\$ 3,10

Fonte – Autor

O custo total do protótipo foi de R\$ 235,85 (duzentos e trinta e cinco reais e oitenta e cinco centavos). Pode-se observar na Figura 11 a montagem final do protótipo.

Figura 11 – Protótipo climatizador evaporativo



Fonte – Autor

A Figura 12 demonstra a montagem da bancada em que foram realizados os ensaios.

Figura 12 – Bancada para experimentações



Fonte – Autor

4 Resultados e discussões

É importante ressaltar que os experimentos com o protótipo foram realizados no mês de maio, na oficina mecânica Nutenge da Universidade Estadual do Maranhão, na cidade de São Luís-MA. Neste período a umidade relativa do ar encontrava-se elevada, sendo assim os dados obtidos correspondem exclusivamente para tal período.

4.1 Procedimentos iniciais

Antes de realizar os ensaios é necessário adotar os seguintes procedimentos:

- Encher o reservatório com 2,5L de água;
- Saturar o painel evaporativo uniformemente;
- Verificar funcionamento dos sensores de temperatura;
- Verificar o funcionamento da bomba d'água.

4.2 Experimento 01

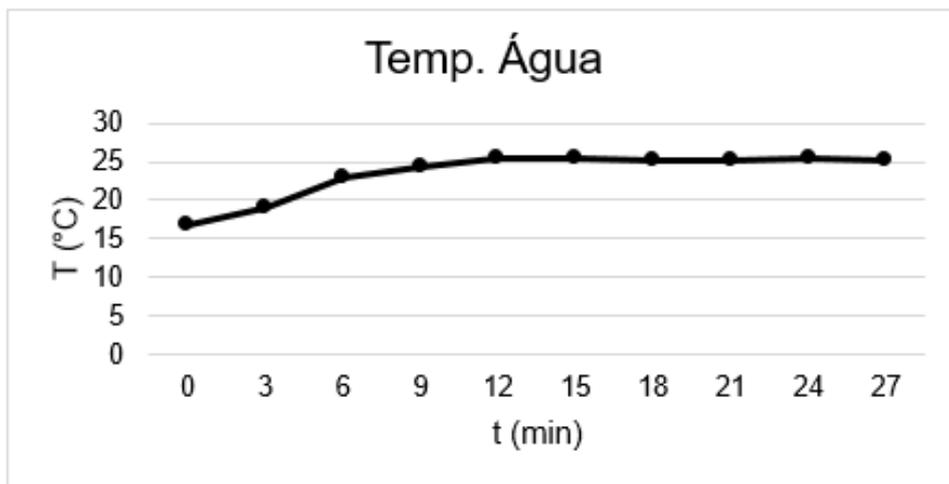
Para o arranjo do climatizador evaporativo utilizando o motor ventilador em baixa rotação, temperatura inicial da água na saturação do painel evaporativo igual a 16 °C e reservatório isolado com isopor de 10mm espessura. Neste teste houve uma dificuldade de se fazer as medições dos dados devido a temperatura da água se elevar rapidamente, em poucos minutos ela já atingiu seu equilíbrio térmico.

Pode-se observar na Figura 13 que o comportamento da temperatura da água neste experimento ocorreu de forma gradativa até atingir o equilíbrio térmico. Isto deve-se pela presença do isolamento no reservatório.

Pode-se ainda analisar a eficiência do climatizador aplicando a Equação 2.1 para os valores de entrada e saída em função do tempo do experimento.

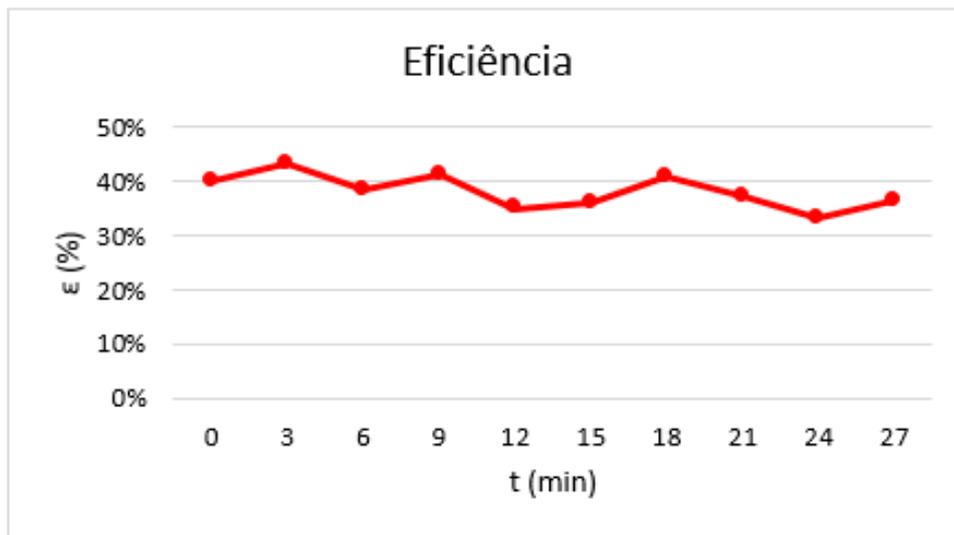
Na Figura 14 observa-se que a eficiência do climatizador manteve valores relativamente constante durante o experimento. A eficiência média deste ensaio foi de 38,20% e o valor

Figura 13 – Temperatura inicial da água versus tempo (Experimento 01)



Fonte – Autor

Figura 14 – Eficiência versus tempo (Experimento 01)



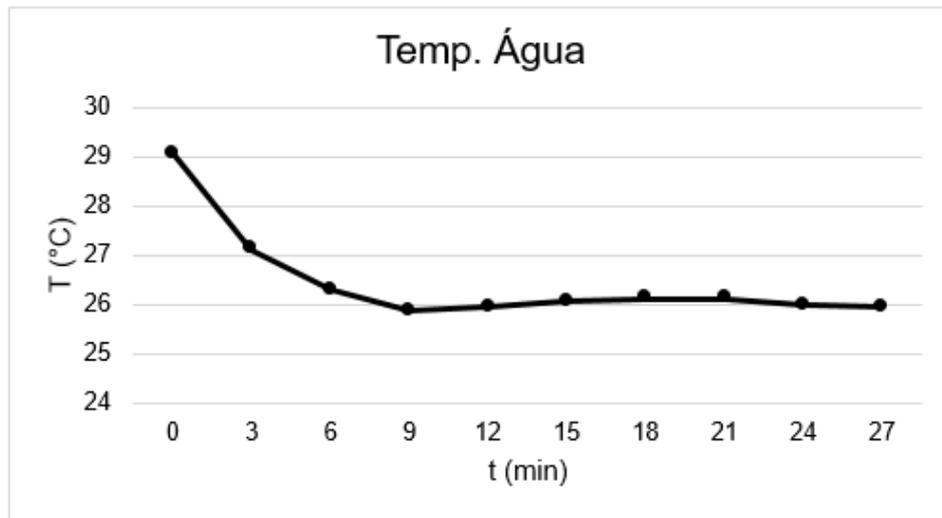
Fonte – Autor

de máxima eficiência foi de 43,28%, também foi observado que a umidade relativa do ar manteve-se em uma média de 73,07%.

4.3 Experimento 02

Para o arranjo do climatizador evaporativo onde foi utilizado ventilador em baixa rotação, temperatura inicial da água de saturação do painel evaporativo igual a temperatura ambiente e reservatório sem isolamento térmico.

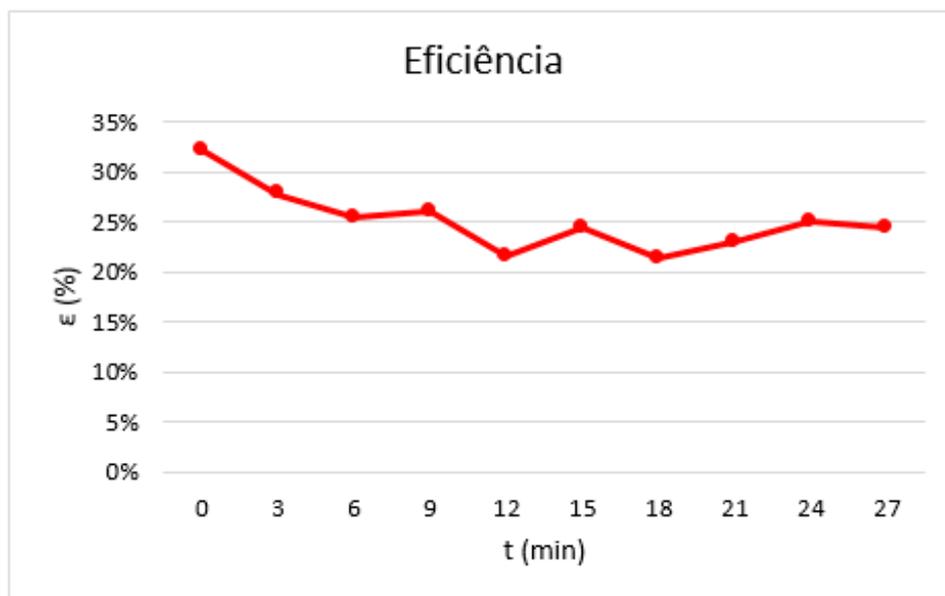
Figura 15 – Temperatura inicial da água versus tempo (Experimento 02)



Fonte – Autor

Diferentemente do Experimento 01, neste caso observa-se nitidamente o processo da climatização evaporativa citados por diversos autores como Watt (1963) e Lopes (2006), onde a água absorveu parte do calor sensível do ar não saturado e transformou-se em calor latente, evaporando assim parte da água, com isso a água remanescente ficou resfriada.

Figura 16 – Eficiência versus tempo (Experimento 02)



Fonte – Autor

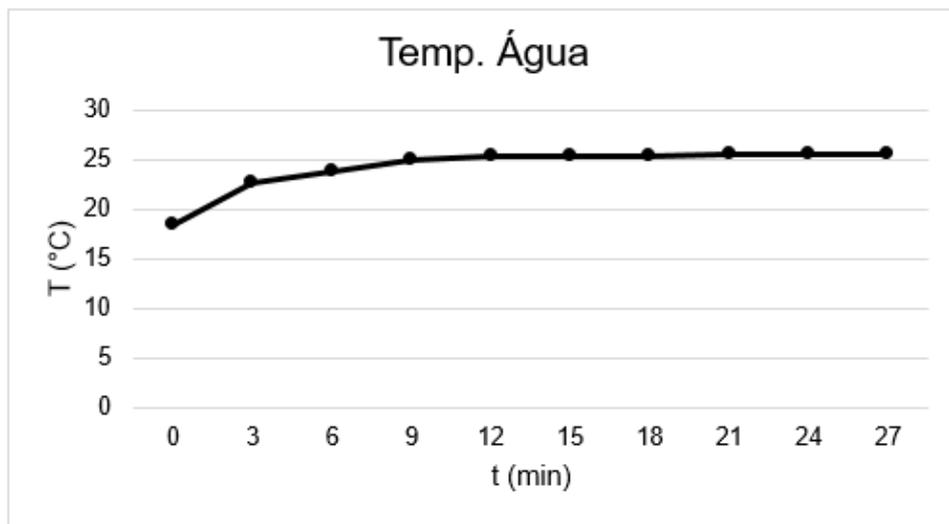
Neste experimento, pode-se observar na Figura 16 que o climatizador perdeu eficiência até o momento em que a temperatura da água se tornou constante, isto ocorreu após a água atingir seu equilíbrio térmico. A quantidade de calor recebida pela água em função do ar não saturado se tornou constante, da mesma forma que a proporção do calor sensível se transformou em calor latente. Pode-se assim dizer que o resultado disto equivale ao regime permanente do climatizador. Durante todo o processo pode-se observar que a eficiência máxima deste experimento atingiu o valor de 32,14% e a eficiência média foi de 25,11%. Também é importante mencionar que a umidade relativa do ar teve sua média em 74,15%.

4.4 Experimento 03

Sendo o arranjo do climatizador evaporativo no qual foi utilizado o ventilador em alta rotação, temperatura inicial da água de saturação do painel evaporativo igual a 16 °C e reservatório sem isolamento térmico.

Assim como no Experimento 01, houve um pouco de dificuldade na medição da temperatura da água, entretanto esta dificuldade não invalida os resultados obtidos. Pode-se observar na Figura 17 que devido a falta do isolamento no reservatório a água atingiu

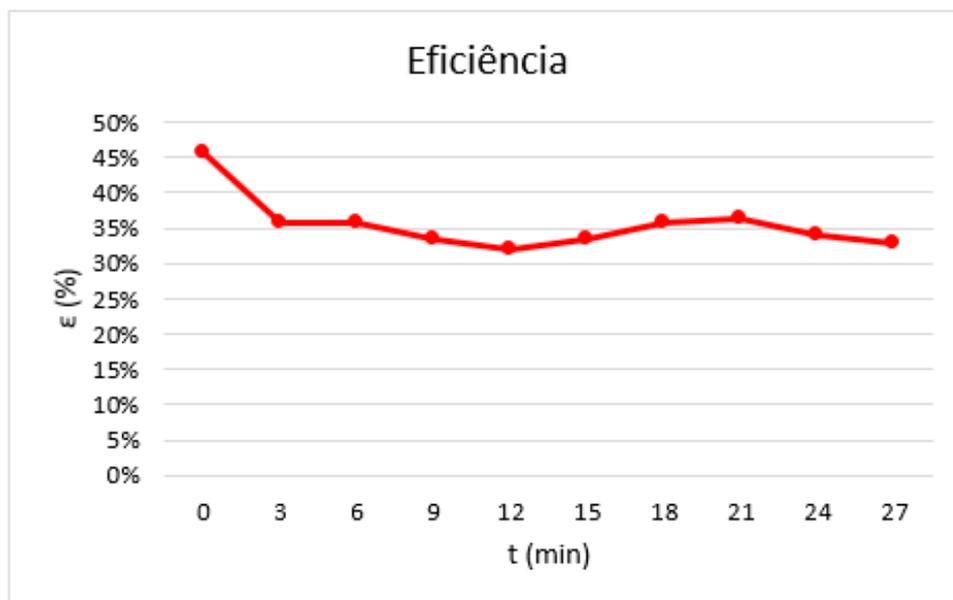
Figura 17 – Temperatura inicial da água versus tempo (Experimento 03)



Fonte – Autor

seu equilíbrio térmico por volta dos 9 minutos enquanto que quando utilizado isolamento este equilíbrio somente aconteceu por volta dos 12 minutos.

Figura 18 – Eficiência versus tempo (Experimento 03)



Fonte – Autor

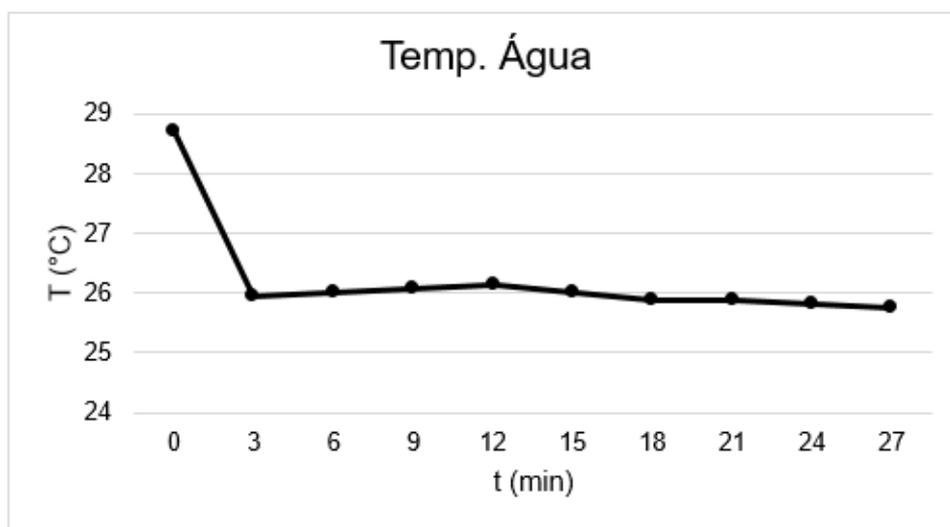
O experimento 03 teve sua eficiência máxima nos valores iniciais do estudo sendo este

valor 45,76%, entretanto sua eficiência teve uma redução após os 3 primeiros minutos, a explicação disso deve-se a ausência do isolamento térmico que contribuiu para que a água ganhasse calor pelas paredes do climatizador e assim atingisse o equilíbrio térmico mais rapidamente. Este experimento gerou uma eficiência média de 35,50% e umidade relativa média de 75,82%.

4.5 Experimento 04

Para o quarto e último experimento foi utilizada a seguinte configuração para o climatizador: ventilador em alta rotação, temperatura inicial da água de saturação do painel evaporativo igual a temperatura ambiente e reservatório com isolamento térmico em isopor 10mm.

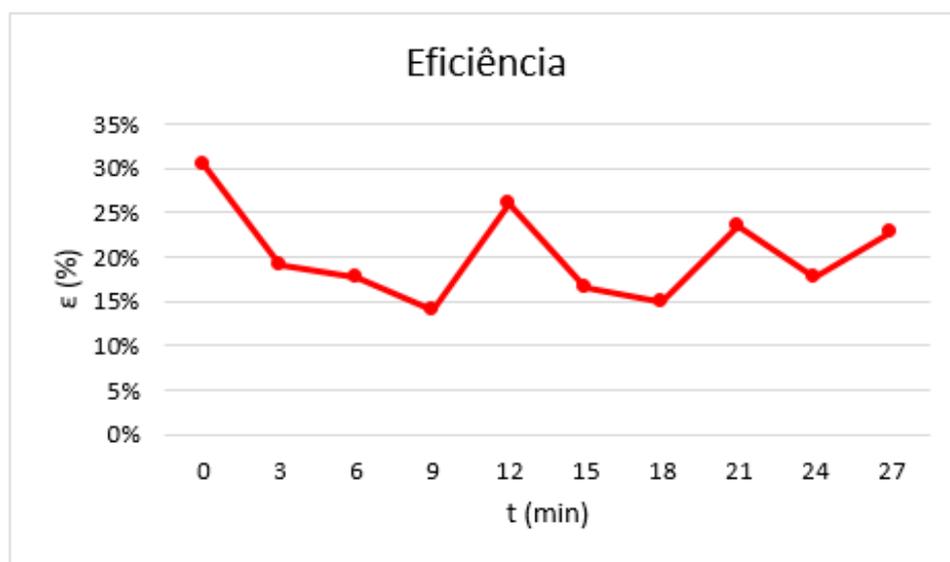
Figura 19 – Temperatura inicial da água versus tempo (Experimento 04)



Fonte – Autor

Essa experimentação mostrou uma queda drástica na temperatura da água nos primeiros minutos, isto ocorreu devido a presença do isolamento térmico no reservatório, desta forma o calor externo não foi transferido para a água através das paredes do reservatório e a alta velocidade do ventilador forçou uma rápida passagem do ar pela colmeia, assim sendo a água atingiu seu equilíbrio térmico rapidamente.

Figura 20 – Eficiência versus tempo (Experimento 04)



Fonte – Autor

No experimento 04 foram obtidos os menores valores de eficiência, onde seu valor máximo atingiu apenas 30,43%, a eficiência média obtida entre os valores ensaiados neste experimento foi 20,28% e o valor de umidade relativa estabeleceu sua média em 74,84%.

4.6 Análise Taguchi

A Tabela 4 mostra os resultados médios de eficiência obtidos para cada experimento de cada arranjo, obtendo assim um valor médio para as médias obtidas. Sendo \bar{M}_1 o valor médio entre os valores obtidos no primeiro experimento de cada arranjo, \bar{M}_2 o valor médio entre os valores obtidos no segundo experimento de cada arranjo, \bar{M}_3 o valor médio entre os valores obtidos no terceiro experimento de cada arranjo e \bar{M} a média dos valores médios obtidos na experimentação.

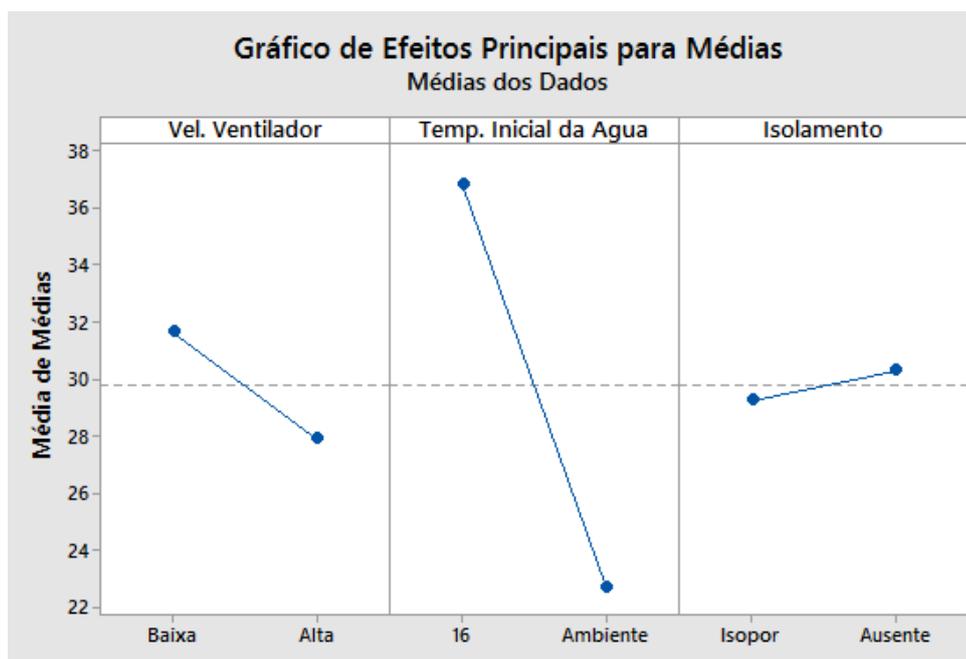
Tabela 4 – Médias obtidas experimentalmente

Nº	Vel. do Ventilador	Temp. da água	Isol. do reservatório	\bar{M}_1	\bar{M}_2	\bar{M}_3	\bar{M}
01	Baixa	16°C	Isopor 10mm	39,20%	37,51%	37,89%	38,20%
02	Baixa	Temp. Ambiente	Sem isolamento	24,31%	26,34%	24,68%	25,11%
03	Alta	16°C	Sem Isolamento	37,38%	33,72%	35,40%	35,50%
04	Alta	Temp. Ambiente	Isopor 10mm	19,48%	21,17%	20,19%	20,28%

Fonte – Autor

Chama-se ruído as causas que afetam a variabilidade da função do produto. Os ruídos externos estão relacionados tanto com as condições de uso do produto quanto com o ambiente (ALMEIDA; TOLEDO, 1969), estes ruídos podem beneficiar ou prejudicar o projeto. Os fatores de ruídos estudados nos experimentos possuem a característica de "quanto maior melhor", ou seja, quanto maior for a razão S/R maior será a eficiência do climatizador.

Figura 21 – Gráfico dos efeitos principais (valores em unidades percentuais para eficiência)



Fonte – Autor⁷

No gráfico demonstrado na Figura 21 observa-se que todos os fatores estudados contribuem para a variação na eficiência do climatizador, contudo, existem alguns fatores que contribuem mais que outros, na Figura 21 pode-se observar que a temperatura da água é o fator que mais influencia na eficiência do climatizador, seguido da velocidade do ventilador e finalmente o isolamento térmico.

4.7 Otimização do climatizador

De acordo com os fatores estudados e a sua contribuição para a eficiência do protótipo afirma-se que a melhor configuração para o climatizador ocorre quando utilizado uma

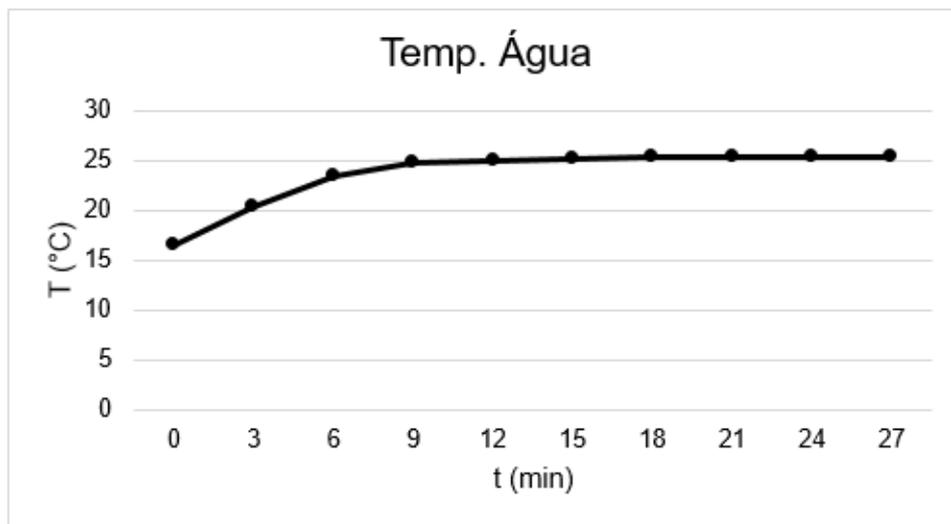
⁷ Gráfico Gerado no *software* Minitab

baixa rotação do ventilador, água com temperatura inicial de 16 °C e sem isolamento. Assim, novos experimentos foram realizados para certificação das novas condições.

4.7.1 Experimento confirmatório

O experimento confirmatório tem o objetivo confirmar que as condições definidas através da otimização do processo utilizando o arranjo ortogonal proporcionam os melhores resultados.

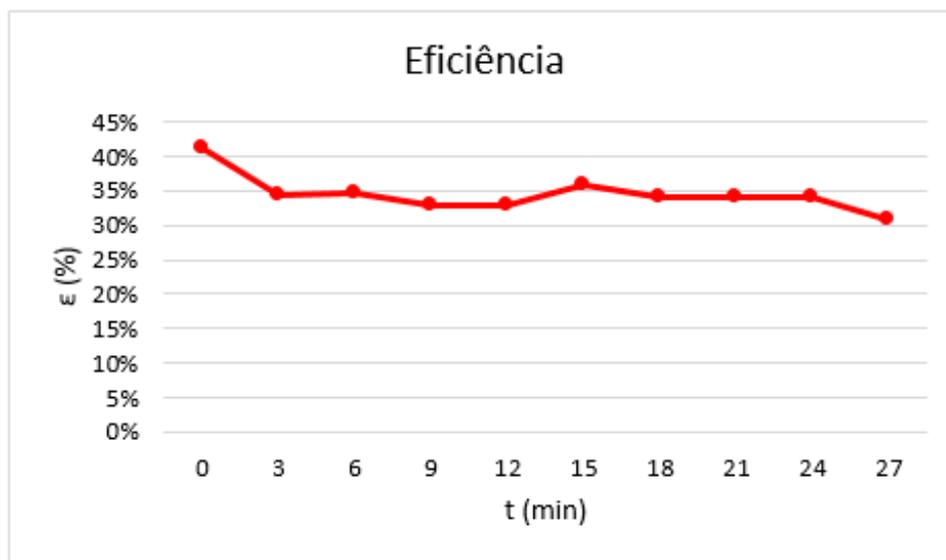
Figura 22 – Temperatura inicial da água versus tempo (Experimento Confirmatório)



Fonte – Autor

A análise do gráfico temperatura inicial da água versus tempo demonstrado na Figura 22 mostrou que a temperatura da água subiu gradativamente atingindo seu equilíbrio térmico após 9 minutos de experimentação.

Figura 23 – Eficiência versus tempo (Experimento Confirmatório)



Fonte – Autor

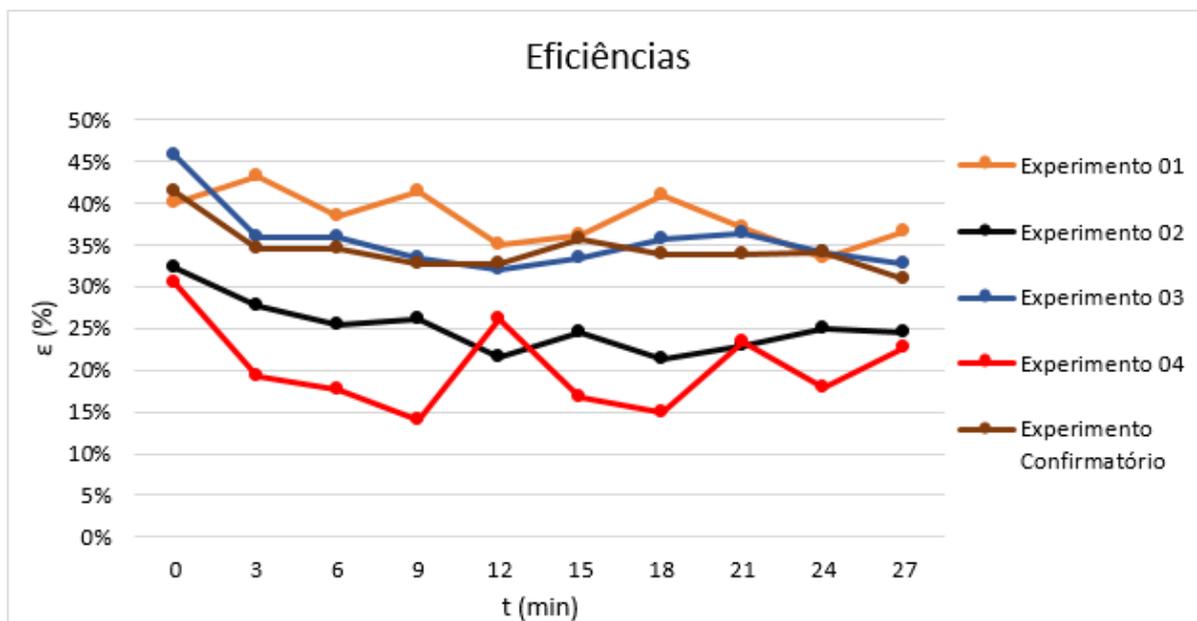
Quando analisado o gráfico de eficiência versus tempo, na Figura 23, observa-se que inicialmente o climatizador atingiu seu maior valor (41,27%), teve sua média em 34,41% e sua umidade relativa média em 74,49%.

4.8 Avaliação dos resultados obtidos

Os dados de eficiência obtidos pelo experimento confirmatório demonstraram-se inferiores aos valores obtidos no experimento 01. Esta variação pode ter sido causada pelas variações no tempo atmosférico da região, fatores estes não controláveis, tais como a umidade relativa do ar ambiente e a temperatura do ar ambiente, variações estas que estão ligada com a estação do ano, dia e hora da realização dos experimentos, etc.

Na Figura 25 pode-se observar que em todos os experimentos realizados a água atingiu seu equilíbrio térmico em aproximadamente 25 °C. Os experimentos que utilizaram a água em condição ambiente proporcionaram uma perda de calor que provocou um decaimento em sua temperatura, em contrapartida os experimentos utilizando água a 16 °C absorveram calor provocando um aumento até atingir o equilíbrio térmico em 25 °C.

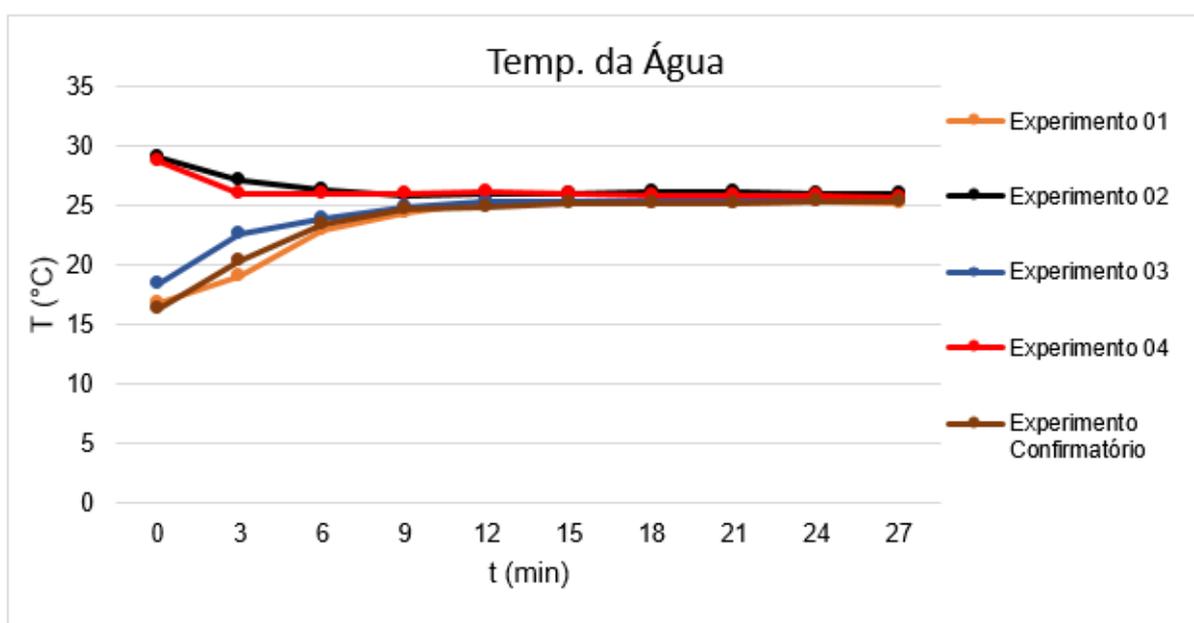
Figura 24 – Comparação das eficiências



Fonte – Autor

Para obtenção de resultados mais conclusivos é necessário um maior controle dos fatores de ruído e condições climáticas controláveis, entretanto, embora o experimento confirmatório não tenha obtido os melhores valores de eficiência, podemos ainda observar que o comportamento dos valores de eficiência se mantiveram estáveis durante o processo de avaliação.

Figura 25 – Comparação das temperaturas da água



Fonte – Autor

5 Conclusão

Neste trabalho foi desenvolvido um estudo da eficiência de um protótipo de climatizador de ar do tipo evaporativo com resfriamento direto. Quatro experimentos distintos foram executados para otimização dos atributos do climatizador, aplicando para isso o método das matrizes ortogonais de Taguchi.

A metodologia Taguchi determinou que o arranjo que proporcionou melhor média de eficiência continha uma configuração de baixa velocidade no ventilador, uma temperatura inicial da água de 16 °C e não possuía isolamento em seu reservatório, entretanto os experimentos demonstraram que a melhor eficiência ocorreu quando os fatores foram baixa velocidade do ventilador, temperatura inicial da água 16 °C e reservatório isolado com isopor 10mm

Devido a utilização de apenas um psicrômetro houve algumas diferenças no tempo de aquisição dos dados, diferenças estas que poderiam ser solucionadas através da utilização de sensores de umidade relativa do ar e temperatura de bulbo úmido, desta forma, a plataforma Arduino pode ser melhor aproveitada e a aquisição de dados ocorreria de forma simultânea.

Embora a eficiência do protótipo do climatizador de ar com evaporação direta tenha sido satisfatório, a aplicação deste modelo de resfriamento se demonstrou inaplicável para a região de São Luís, pois segundo a ABNT os parâmetros de umidade relativa do ar para conforto térmico durante o verão devem variar entre 35% à 65% e durante o inverno delimita-se entre 30% à 60% entretanto o equipamento utilizado, em todos os experimentos realizados, apresentou índices de umidade relativa iguais ou superior a 73,07%, condições estas que estão fora dos limites de conforto térmico.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

Para um melhor entendimento, aperfeiçoamento e conhecimento do sistema de climatização evaporativa é necessário que mais estudos sejam desenvolvidos nesta área, por esta razão, algumas sugestões para desenvolvimentos de trabalhos acadêmicos futuros são:

- Avaliação e aplicação direta da água de drenagem de aparelhos de ar condicionado no bloco resfriante (colmeia) sem a utilização de reservatórios e bomba d'água.
- Análise da influência da variação do fluxo de água no climatizador evaporativo
- Avaliação da influência do ventilador no ganho de calor sensível do ar de saída
- Avaliação da influência do calor liberado pela bomba no ganho de calor sensível da água
- Utilização da água de drenagem dos condicionadores de ar convencionais para melhoria do rendimento aplicando-a para resfriamento da unidade condensadora.

Referências

- ABNT. *ABNT NBR 16401-2:Instalações de ar condicionado -Sistema centrais e unitários, parte 2: parâmetros de conforto térmico*. 2008. 7 p. Citado na página 43.
- ALMEIDA, H. S. de; TOLEDO, J. C. de. Método taguchi: qualidade voltada para o projeto do produto e do processo. *Revista de Administração*, p. 61–68, 1969. Citado na página 38.
- BASTOS, A. I. U. Avaliação do uso de resfriamento evaporativo indireto em sistemas de climatização de edificações comerciais. 2011. Citado na página 18.
- CAMARGO, J. R. Resfriamento evaporativo: Pougando a energia e o meio ambiente. *Ciências Exatas*, p. 69–75, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 16.
- CAMARGO, J. R. Evaporative cooling: water for thermal confort. *Ambiente e Água*, p. 51–61, 2008. Citado na página 13.
- CENGEL, Y. A. *Heat transfer a practical Approach*. Second. [S.l.]: McGraw-Hill, 2003. Citado na página 19.
- CORREIA, E. A. S.; CARDOZA, J. A. S. Planejamento de experimentos no processo produtivo utilizando o método taguchi. *Gestão da Produção, Operações e Sistemas*, p. 55–66, 2011. Citado na página 19.
- DONNI, R. G. Estudo comparativo entre trocadores de calor convencionais e trocadores evaporativos. *Feira e Congresso da Indústria de Climatização e Refrigeração*, 2006. Citado na página 15.
- FILHO, A. V. Energia elétrica no brasil: Contexto atual e perspectivas. <http://interessenacional.com/index.php/edicoes-revista/energia-eletrica-no-brasil-contexto-atual-e-perspectivas/>, 2013. Citado na página 11.
- KACHHWAHA, S. S.; PRABHAKAR, S. Heat and mass transfer study in a direct evaporative cooler. *Journal of Scientific Industrial Research*, p. 705–710, 2016. Citado na página 13.
- KUMAR, S.; MATHUR, J.; MATHUR, S.; SINGH, M. K.; LOFTNESS, V. An adaptive approach to dene thermal comfort zones on psychrometric chart for naturally ventilated buildings in composite climate of india. *Building and Environment*, p. 135–153, 2016. Citado na página 13.
- LOPES, A. O. R.; GABARRA, G. R. C.; LIMA, B. W. F. Ar condicionado versus climatizadores por evaporação. *Ciência do Ambiente*, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 33.
- MCROBERTS, M. Arduino básico. *São Paulo: Novatec*, 2011. Citado na página 23.
- NDUKWU, M. C.; MANUWA, S.; OLUKUNLE O. J.AND OLUWALANA, I. Mathematical model for direct evaporative space cooling systems. *Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH)*, p. 403 — 409, november 2013. Citado na página 19.

- OLIVEIRA, R. S. d. *Análise experimental e numérica da eficiência de resfriamento de painéis de fibras vegetais utilizados em sistemas de resfriamento evaporativo*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 11, 12, 16 e 17.
- PENA, R. F. A. *A composição do ar*. 2017. Disponível em: <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/a-composicao-ar.htm>>. Citado na página 17.
- PIMENTA, C. D.; SILVA, M. B.; RIBEIRO, R. B.; CLARO, F. A. E. Método taguchi aplicado na identificação dos fatores causadores da descarbonetação do arame de aço sae 51b35 durante tratamento térmico de esferoidização. *GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas*, p. 97–108, 2012. Citado na página 20.
- PRATES, G. A. *Ecodesign utilizando QFD, Métodos Taguchi e DFE*. 186 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 19.
- RAMOS, F. G.; SEIDLER, N. Estudo da energia eólica para aproveitamento em pequenos empreendimentos. *Revista Eletrônica de Extensão da URI*, v7, n. 13, p. 108–127, 2011. Citado na página 25.
- SANCHES, R. A. et al. Otimização dos parametros de regulagem das maquinas circulares de malharia, utilizando a metodologia taguchi. Campinas, SP, 2001. Citado na página 28.
- SILVA, C. E. da. *Comparação de painéis evaporativos de argila expandida e celulose para sistema de resfriamento adiabático do ar em galpões avícolas com pressão negativa em modo túnel*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Viçosa, 2002. Citado na página 21.
- SODHA, M.; SOMWANSHI, A. Variation of water temperature along direction of flow: Effect on performance of an evaporative cooler. *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, 2012. Citado na página 14.
- THOMSEN, A. *O que é Arduino*. <http://blog.filipeflop.com/arduino/o-que-e-arduino.html>: [s.n.], 2014. Citado na página 23.
- WATT, J. Evaporative air conditioning. *The Industrial Press*, p. 300, 1963. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 33.
- WU, J. M.; HUANG, H. Z. X. Theoretical analysis on heat and mass transfer in a direct evaporative cooler. *Applied Thermal Engineering*, p. 980–984, 2008. Citado na página 13.