



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



THIAGO RODRIGUES AMORIM

**MODELAGEM MATEMÁTICA E ANÁLISE COMPUTACIONAL DE
UM RESFRIADOR EVAPORATIVO DE BAIXO CUSTO**

OURO PRETO - MG
2021

THIAGO RODRIGUES AMORIM
thiago.amorim1@aluno.ufop.edu.br

**MODELAGEM MATEMÁTICA E ANÁLISE COMPUTACIONAL DE
UM RESFRIADOR EVAPORATIVO 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
2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A524m Amorim, Thiago Rodrigues .

Modelagem matemática e análise computacional de um resfriador evaporativo de baixo custo. [manuscrito] / Thiago Rodrigues Amorim. - 2021.

67 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Luís Antônio Bortolaia.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Meios de transferência de calor. 2. Massa - Transferência. 3. Modelos Matemáticos. 4. Programa Computacional. 5. Ar condicionado - Equipamento e acessórios. I. Bortolaia, Luís Antônio. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

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



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Thiago Rodrigues Amorim

Modelagem matemática e análise computacional de um resfriador evaporativo de baixo custo

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

Aprovada em 09 de dezembro de 2021

Membros da banca

DsC. Luís Antônio Bortolaia - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
DsC. Igor César Pereira (Universidade Federal de Ouro Preto)
DsC. José Francisco Vilela Rosa (Universidade Federal de Ouro Preto)

Luís Antônio Bortolaia, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 16/12/2021



Documento assinado eletronicamente por **Luís Antonio Bortolaia, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/12/2021, às 13:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0259703** e o código CRC **4FBD8DCB**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.013308/2021-45

SEI nº 0259703

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: (31)3559-1533 - www.ufop.br

Dedico este trabalho a Deus primeiramente, por abençoar durante toda essa etapa.

Aos meus pais Edmilson Rodrigues e Lucimar Amorim e minha irmã Gabriela Amorim por todo apoio e incentivo durante toda formação.

A todos amigos e companheiros dessa jornada que participaram dessa conquista.

Agradeço também ao meu orientador pela disposição de todo tempo e conhecimentos fundamentais para realização desse trabalho.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente aos meus pais Edmilson Rodrigues e Lucimar Amorim, os quais permitiram a conclusão dessa importante etapa da minha vida, dando todo apoio e suporte em todo momento da caminhada. Agradeço também a minha irmã Gabriela Amorim que foi um dos maiores motivos da escolha de fazer um curso superior e uma das maiores alegrias em minha vida. Agradeço também toda minha família, avós, primos e tias que participaram de alguma forma dessa conquista.

Ao meu orientador Luís Antônio Bortolaia por todos ensinamentos, apoio e paciência durante toda elaboração deste importante trabalho, tal qual toda graduação.

A Escola de Minas, especialmente o corpo docente de Engenharia Mecânica por todo conhecimento dividido e disponibilizado.

Aos inúmeros amigos feitos durante a graduação, em especial aos amigos da Cantina da EM, que dividiram inúmeras conversas e situações durante toda essa jornada.

Aos amigos de Manhuaçu, que participaram ativamente dessa conquista e apoio incondicional durante toda graduação.

Aos grupos CREA JR – MG Núcleo Ouro Preto e Sucatão pelo aprendizado e experiências.

A vida ouro-pretana, rocks e experiências engrandecedoras, principalmente aqueles que dividiram parte de suas formações na mesma casa, André, Guilherme, Gustavo, Maurício e João.

*“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades,
lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram
conquistadas do que parecia impossível”.*

Charles Chaplin

RESUMO

Atualmente os resfriadores evaporativos se apresentam como solução alternativa ao ar condicionado, visto que conseguem trazer conforto térmico, além de apresentarem outras características, como ser uma tecnologia ambientalmente amigável e com menor consumo energético, e é sabido que essa dicotomia meio ambiente x industrialização é prejudicial para ambos. Sendo assim, equipamentos como esse, que conseguem auxiliar na preservação do meio ambiente e apresentar uma boa viabilidade, são cada vez mais impactantes e necessários. Em linhas sucintas o resfriador evaporativo, por meio de mecanismos simultâneos de transferência de calor e massa entre ar e água, consegue reduzir a temperatura de um ambiente. O presente trabalho busca em primeiro plano entender um sistema de resfriamento evaporativo de baixo custo já existente e desenvolver um modelo matemático e um programa computacional que represente o mesmo, tudo isso por meio de estudos bibliográficos e pesquisa experimental. Dessa forma vai ser possível entender um pouco mais sobre a viabilidade e condição de funcionamento desses sistemas, servindo como base para estudos futuros e possíveis otimizações do sistema. O modelo é validado pela confrontação de resultados obtidos por equipamentos de medição no experimento com os dados de saída do programa computacional, e apresentou boa concordância perante as condições estabelecidas, possuindo um erro total médio de 0,8% quanto a temperatura de saída, de 3,3% quanto a umidade relativa e de 7,1% quanto a efetividade.

Palavras-chave: Resfriador de ar evaporativo; transferência de calor; transferência de massa; modelo matemático; programa computacional; condicionamento de ar;

ABSTRACT

These days, evaporative coolers are presented as an alternative solution to Air conditioning, as they manage to bring thermal comfort, and other features, such as being an environmentally friendly lower energy technology, and it is known that this dichotomy environment x industrialization is harmful for both of them. Therefore, this kind of equipment, that may help to preserve the environment and have good viability at the same time, are impactful and necessary. In succinct ways the evaporative cooler, through simultaneous transfer mechanisms of heat and mass between air and water, it can reduce the temperature of a room. The actual work seeks in the first plan understand an already existing low-cost evaporative cooling system and developing a mathematical model and a computer program that may represent the same, all through bibliographic studies and experimental research. This way, it will be possible to understand a bit more about the viability and operations of these systems, serving as a basis for future studies and possible system optimizations. The model is validated by confronting the results obtained by measuring equipment used in the experiment with the output data of the computer program, it features a good agreement with the established conditions, with a total error average of 0.8% for output temperature, 3.3% to relative humidity and 7.1% to effectiveness.

Keywords: *Evaporative air coolers; heat transfer; mass transfer; mathematical model; computer program; air conditioning.*

LISTA DE SIMBOLOS

TBS: temperatura de bulbo seco ($^{\circ}\text{C}$)

TBU: temperatura de bulbo úmido ($^{\circ}\text{C}$)

TPO: temperatura do ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$)

ε : efetividade do resfriador evaporativo (%)

m_a : vazão mássica de ar seco (kg/s)

h_c : coeficiente de transferência de calor por convecção ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

A: área de contato entre o fluido e superfície (m^2)

c_{pu} : calor específico úmido (kJ/kgK)

UR_e: umidade relativa de entrada do ar (%)

UR_s: umidade relativa de saída do ar (%)

w: umidade absoluta do ar (%)

δQ_s : fluxo de calor sensível (W)

h_m : coeficiente de transferência de massa por convecção (m/s)

ρ_a : densidade da água (kg/m³)

h: entalpia (kJ/kg)

k: condutividade do ar (W/mK)

ν : viscosidade cinemática (m²/s)

μ : viscosidade dinâmica (kg/ms)

c_p : calor específico (kJ/kgK)

s: entropia (kJ/kgK)

L_c: comprimento do tijolo (m)

V: vazão (m³/s)

U: velocidade média de escoamento (m/s)

A_i: área do tubo de saída do resfriador (m²)

Nu: Número de Nusselt

Re: Número de Reynolds

P_{atm} : Pressão atmosférica (kPa)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mudança da temperatura Global 1860 – 2019.....	3
Figura 2: Crescimento do consumo de eletricidade total e para condicionadores de ar no setor residencial.....	5
Figura 3: Participação de renováveis na matriz energética no Brasil, Mundo e OCDE	6
Figura 4: Dois corpos em um invólucro isolado atingem o equilíbrio térmico quando são colocados em contato.....	11
Figura 5: Esquema da fisiologia humana e das trocas térmicas	11
Figura 6: Interação térmica entre o conforto humano e o meio ambiente.....	13
Figura 7: Diagrama Conforto Humano.....	14
Figura 8: Carta de Conforto ASHRAE.....	15
Figura 9: Diagrama Psicrométrico com a região delimitante onde é possível atingir a região de conforto térmico pelo RE	15
Figura 10: Funcionamento do Resfriador Evaporativo	16
Figura 11: Mapa climático brasileiro	17
Figura 12: Esquemático do RED	18
Figura 13: Princípio de funcionamento do RED	19
Figura 14: Processo psicrométrico de um resfriador evaporativo direto.....	19
Figura 15: Tipos de Resfriadores Evaporativos Indiretos: (a) tipo placa; (b) tipo bulbo	20
Figura 16: Laboratório de Sistemas Térmicos, Metrologia e Instrumentação	22
Figura 17: Protótipo do sistema de resfriamento evaporativo.....	22
Figura 18: Visão interna do resfriador evaporativo de baixo custo.....	23
Figura 19: Painéis de resfriamentos evaporativos CELdek®.....	24
Figura 20: Argila expandida na forma granular	24
Figura 21: Painéis de argila expandida e painéis de celulose.....	25
Figura 22: Painel com manta de fibra de coco	25

Figura 23: Painel com manta de fibra de Esponja Vegetal.....	26
Figura 24: Etapas de uma modelagem matemática	27
Figura 25: Etapas para o desenvolvimento da Metodologia Científica do projeto de pesquisa	28
Figura 26: Fluxograma de desenvolvimento do trabalho	31
Figura 27: Volume de Controle do RED	32
Figura 28: Resfriador evaporativo tipo spray com circulação constante de água	33
Figura 29: Esquema de um RED	34
Figura 30: Fluxograma da rotina de cálculo	42
Figura 31: Curva característica da regressão linear	46
Figura 32: Gráfico comparativo entre as temperaturas de saída	49
Figura 33: Gráfico comparativo entre umidades relativas de saída.....	51
Figura 34: Gráfico comparativo entre efetividades	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Consequências do aumento de temperatura no ambiente de trabalho.....	4
Tabela 2: Sintomas de cansaço térmico associado à temperatura aparente.....	5
Tabela 3: Variáveis e Indicadores	44
Tabela 4: Dados de entrada para rotina de cálculo.....	45
Tabela 5: Resumo dos Resultados	46
Tabela 6: Temperatura de Saída	47
Tabela 7: Resultados da Umidade Relativa do Ar Resfriado	47
Tabela 8: Resultados da Efetividade	48
Tabela 9: Comparativo entre temperaturas de saída.....	49
Tabela 10: Diferença percentual de temperatura de saída.....	50
Tabela 11: Comparativo entre umidade relativa de saída.....	50
Tabela 12: Diferença percentual de umidade de saída	51
Tabela 13: Comparativo entre efetividade.....	52
Tabela 14: Diferença percentual de efetividade	53
Tabela 15: Erro entre os resultados calculados e experimentais	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	3
1.3	Objetivos.....	7
1.3.1	Geral	7
1.3.2	Específicos.....	7
1.4	Estrutura do Trabalho	7
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	História do processo	9
2.2	Transferência de Calor.....	10
2.3	Conforto Térmico	12
2.4	Resfriador Evaporativo.....	16
2.5	Tipos de Resfriamento Evaporativos.....	18
2.5.1	Resfriamento Evaporativo Direto.....	18
2.5.2	Resfriamento Evaporativo Indireto	20
2.6	Resfriador Evaporativo Alternativo.....	21
2.7	Modelagem Matemática	26
3	METODOLOGIA.....	28
3.1	Tipos de Pesquisa	28
3.2	Materiais e Métodos	31
3.3	Modelagem Matemática	32
3.4	Programa Computacional	42
3.5	Variáveis e Indicadores	43
3.6	Instrumentos de coletas de dados	44
3.7	Tabulação de dados	44
3.8	Considerações finais	44
4	RESULTADOS.....	45
4.1	Considerações iniciais	45
4.2	Resultados.....	45
4.3	Comparação dos resultados	48
5	CONCLUSÃO.....	55

5.1	Conclusão	55
5.2	Recomendações	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA.....		58
ANEXO A.....		62
ANEXO B		65

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

O efeito estufa, um fenômeno natural que está relacionado diretamente à manutenção da vida como conhecemos, o qual vem sendo ampliado e aumentado de uma forma não responsável e prejudicial ao meio ambiente, causando uma aceleração nas mudanças climáticas, e segundo cientistas um dos responsáveis já são conhecidos, são eles os GEE (gases que provocam o efeito estufa). Sabe-se que o aumento da concentração dos mesmos coincide com a queima de combustíveis fósseis, que é algo originário na Revolução Industrial (JACOBI *et al.*, 2011). Logo, fica mais que claro a necessidade de mudar os hábitos e o caminho que o mundo segue, sendo assim o foco dos pesquisadores atualmente é buscar alternativas que aliem sustentabilidade, economia de energia e viabilidade financeira e de recursos.

Ainda quanto a questão ambiental, para Jacobi *et al.* (2011), o efeito das mudanças climáticas atinge todas as esferas de nossa sociedade, e influencia em migrações, debilita o desenvolvimento, traz consequências médicas e pode até exacerbar as desigualdades entre os sexos.

A evolução humana evidencia a necessidade de se adaptar ao clima, e durante esses anos o ser humano sempre buscou alternativas para condicionar o ambiente, desde a conservação de alimentos até o bem estar, ou seja, até o conforto térmico. Para elucidar a questão a “*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*” – ASHRAE (2009) diz que o 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.

De forma sucinta, refrigeração é o processo de retirada de calor de um meio ou corpo, por meio da redução da temperatura atual e manutenção desse estado por meios naturais e/ou mecânicos, sendo que normalmente essa transferência ocorre de um meio ou corpo para outro, seguindo os processos de transferência de calor.

Segundo Camargo & Ebinuma (2004, p. 69) “atualmente o sistema de refrigeração mais utilizado para esse fim é o sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor”. Todavia esse sistema traz algumas desvantagens quanto a questão ambiental

como a utilização de gases clorofluorcarboneto (CFC) e hidrofluorcarbonetos (HFC), a questão humana é afetada também visto que pode gerar ressecamento de pele e mucosas, além da questão econômica devido ao seu alto consumo de energia.

Logo, pesando em todos os malefícios do sistema convencional de refrigeração fica claro a necessidade de evolução nessa questão, para trazer um fim a essa ideia de dicotomia entre meio ambiente x industrialização, e assim o resfriador evaporativo aparece como uma alternativa, “o condicionamento de ar por resfriamento evaporativo é um método ambientalmente amigável e energeticamente eficiente” (CAMARGO & EBINUMA, 2004, p. 69).

Camargo (2003) determina o resfriamento evaporativo como um processo de resfriamento de corrente de ar por meio da evaporação de água, ou seja, ocorrerá dentro do sistema um fluxo de ar em trânsito causando a evaporação da água e conseqüentemente provocando uma redução na temperatura deste fluxo de ar.

Ainda sobre o resfriador evaporativo o mesmo possui diversos benefícios, visto que é uma opção viável economicamente, devido a fácil manutenção, operação e instalação, é um sistema de fácil integração em sistemas de ar anteriormente instalados, não utiliza GEE como os gases CFC e HFC, sendo assim não agride o meio ambiente e por se tratar de um sistema que opera com a renovação total de ar, anula a recirculação e proliferação de fungos e bactérias (CAMARGO & EBINUMA, 2004).

Quanto a sua aplicação, para Carossi (2006) os sistemas de resfriamento evaporativo vêm se consolidando cada vez mais nos campos da engenharia, são eles: umidificação industrial, resfriamento do ar para turbina a gás, climatização de aviários e estufas, aplicação residencial e conforto térmico, principalmente.

Entretanto, mesmo com todos seus benefícios e atrativos e um claro apelo ambiental, os resfriadores evaporativos esbarram em algumas questões como a umidade e uma espécie de restrição aliada a desinformação devido a sua facilidade na instalação/operação/manutenção, fazendo com que esse número ainda seja pequeno pensando no potencial brasileiro acerca dessa tecnologia.

Logo, já existindo o primeiro passo que é o protótipo de um resfriador evaporativo de baixo custo (no Laboratório de Sistemas Térmicos do curso de Engenharia Mecânica da UFOP), cabe agora buscar entender/desenvolver essa ideia, que converge para atenuação da dicotomia meio ambiente x industrialização e promover uma maior

aplicação do sistema que qualitativamente é uma alternativa ao condicionamento de ar convencional e traz muito mais benefícios. Neste cenário descrito, a problemática a ser estudada neste trabalho é:

Como desenvolver um modelo matemático e um programa computacional referente ao resfriador evaporativo de baixo custo?

1.2 Justificativa

A eficiência do homem e seu conforto está diretamente relacionado ao condicionamento correto do ar (CAMARGO & EBINUMA. 2004), todavia essa preocupação se torna mais urgente a partir do momento que a temperatura global está cada vez subindo e prejudicando a qualidade de vida da população. Segundo Molion (2008) a concentração de CO₂ passou de 280 ppmv, considerando a época pré-industrial, para 380 nos dias de hoje, ou seja, um aumento de 35% da concentração de gás em um espaço de apenas 150 anos. Molion (2008) ainda diz que segundo o Sumário para Formuladores de Políticas, o aumento observado está entre 0,4 e 0,7°C (Figura 1), em outras palavras vive-se um momento de intensificação do efeito estufa, culminando num aumento da temperatura.

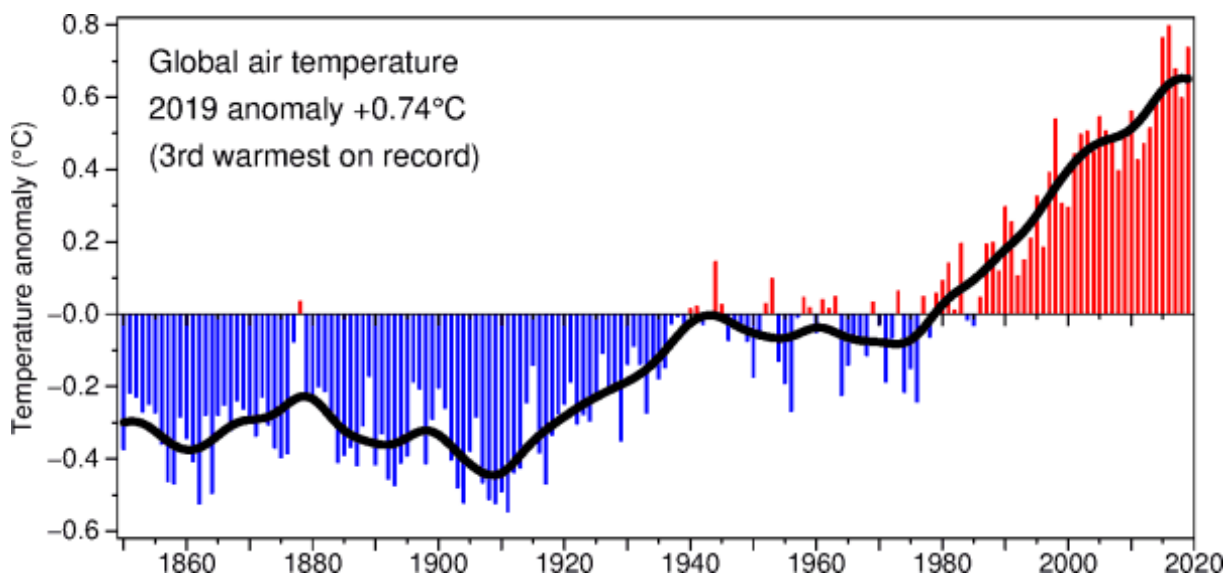


Figura 1: Mudança da temperatura Global 1860 – 2019
Fonte: ClimaticResearch Unit (2020)

Sendo assim, fica perceptível pela figura 1 o aumento da temperatura de forma abrupta, o que pode trazer diversas consequências à forma que é entendível como vida e até mesmo como mundo. De forma a alertar ainda mais sobre esse assunto Molion (2008) ainda afirma que caso a concentração de CO₂ dobre nos próximos anos pode ocorrer um

aumento da temperatura média global, de acordo com alguns modelos climáticos, entre 2 e 4,5°C.

Estudos apontam que para cada grau Celsius de temperatura que ultrapasse 27°C ocorre uma perda de eficiência humana de 1,8%, acarretando num aumento de acidentes de trabalho oriundos da sobrecarga térmica conforme o conforto térmico abaixa, podendo chegar até o dado alarmante de 40% de risco de acidentes em casos de 10°C acima do nível de conforto térmico (SCIGLIANO & HOLLO *apud* GARLET *et al.*, 2016). A Tabela 1 apresenta as consequências do aumento da temperatura às pessoas no ambiente de trabalho.

Tabela 1: Consequências do aumento de temperatura no ambiente de trabalho

Temperatura do ambiente	Consequências
> 27°C	Perda na eficiência humana de 1,8% (a cada 1°C)
10°C acima do nível de conforto térmico	Risco de acidentes de até 40%

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

Na indústria é mais que comum a ocorrência de situações de sensações de calor excessivo, logo a produtividade da equipe, concentração e bem estar serão afetados de forma geral o que pode acarretar em acidentes de trabalho, ou seja, situações fora do conforto térmico podem ocasionar problemas desde a esfera industrial até a esfera humana e ambiental. Em caso de altas temperaturas e umidades relativas pode vir a ocorrer o estresse térmico, cujos sintomas são: sonolência, irritabilidade, cansaço, redução da capacidade de concentração e redução da atenção, em casos extremos de temperatura, câimbra, desidratação, dores de cabeça, insolação, AVC (acidente vascular cerebral) e até morte (RAFAEL, 2019).

Para ilustrar os efeitos de altas temperaturas, Carossi (2006) por meio da Tabela 2 (Pensilvânia University – Excessive Heat and Worker Safety), mostra a fragilização humana com alguns sintomas com base no efeito da temperatura.

Tabela 2: Sintomas de cansaço térmico associado à temperatura aparente

Temperatura Aparente (°C)	Nível de Perigo	Sintomas
27 a 32	Atenção	Possível fadiga em casos de exposição prolongada e atividade física
32 a 41	Muito Cuidado	Possibilidade de câimbras, esgotamento, e insolação para exposições prolongadas e atividades físicas
41 a 54	Perigo	Câimbras, insolação e esgotamentos. Possibilidade de AVC para exposições prolongadas com atividade física
> 54	Extremo Perigo	Insolação e AVC eminente

Fonte: Carossi (2006)

Vale ainda ressaltar que o efeito de altas temperaturas e estresse térmico atravessam também o mundo da pecuária, por exemplo, para melhorar a qualidade da produção de bovinos e suínos é cada vez mais comum estudos de conforto térmico dentro desses nichos e o efeito das altas temperaturas.

O uso de ar condicionado em contrapartida ao uso de resfriador evaporativo gera consequências econômicas. O setor residencial entre os anos de 2005 e 2017 passou de um consumo de 83 TWh para 134 TWh, ou seja, um crescimento percentual de 61%, sendo que se sabe que esse crescimento está fortemente relacionado a elevação de uso de aparelhos de ar condicionado. Conforme a figura 2 é possível perceber que o consumo de energia elétrica por condicionadores de ar apenas no setor residencial atingiu 18,7 TWh, um crescimento de cerca de 237% nos últimos anos (EPE, 2018).

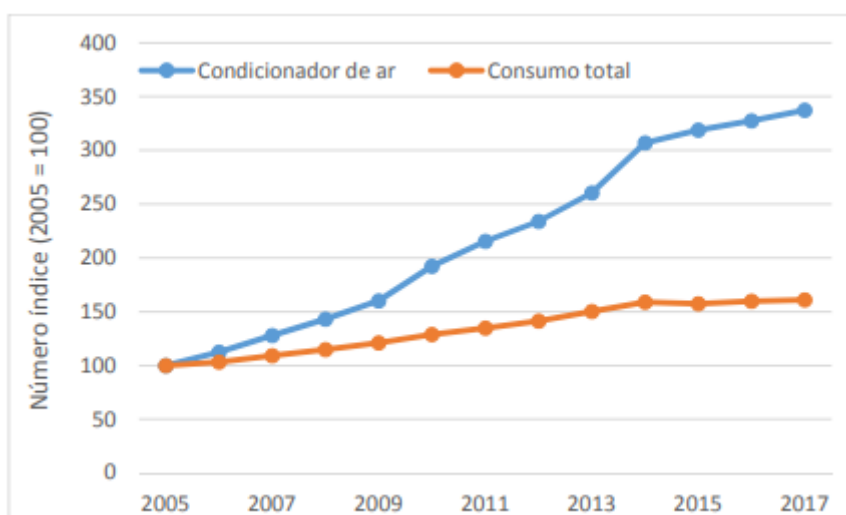


Figura 2: Crescimento do consumo de eletricidade total e para condicionadores de ar no setor residencial

Fonte: EPE (2018).

É importante ressaltar que a procura por fontes renováveis nunca recebeu tanto destaque quanto nos últimos anos, e a academia junto com a indústria vem buscando a ideia de sustentabilidade em todos os seus projetos, de forma a eliminar o conceito meio ambiente contra industrialização, sendo assim quanto menor for o impacto ambiental que a obtenção dessa energia gera, melhor e mais conceituada a mesma vai ser. No Brasil, as fontes renováveis alcançaram uma participação de 46,1% na demanda da matriz energética em 2019, e comparativamente falando, ocorreu um aumento de 0,6 ponto percentual para o ano anterior e em caso de comparação com o mundo, o número se torna ainda mais impressionante, como é possível visualizar na figura 3, visto que o mundo em 2017 atingiu apenas uma demanda de 13,9% (BEN, 2020).

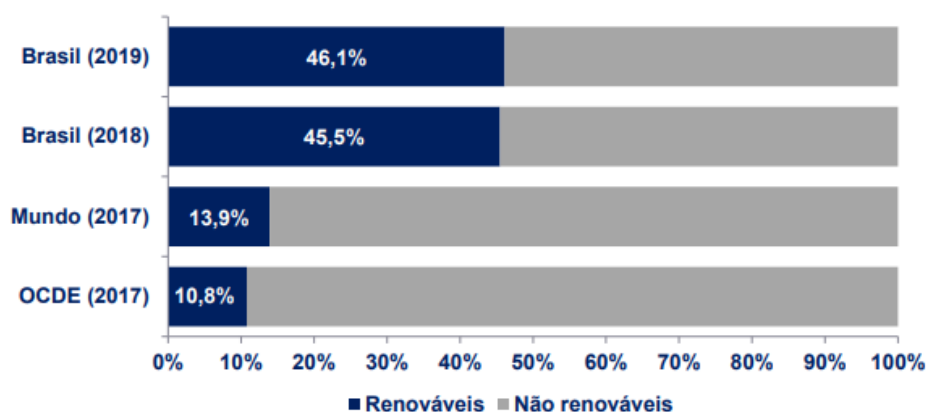


Figura 3: Participação de renováveis na matriz energética no Brasil, Mundo e OCDE
Fonte: BEN 2020

Corroborando, ao discutido anteriormente, Carossi (2006), ainda afirma, que o processo de condicionamento de ar por resfriamento evaporativo é uma alternativa, com menor consumo energético, principalmente, quando comparado ao sistema de condicionamento de ar tradicional, o ar condicionado.

Diversos autores relatam os perigos do condicionamento de ar convencional, visto que esse processo acarreta diversos problemas médicos: ressecamento de pele e mucosas, não renovação do ar – o que aumenta a possibilidade de recirculação e proliferação de fungos e favorece o aparecimento de infecções respiratórias agudas como rinite alérgica, bronquite, asma e síndrome dos edifícios doentes (SED) (CAMARGO & EBINUMA, 2004), (VARELLA *apud* LOTTI *et al.*, 2006), (MASIERO *et al.*, 2020).

Vale ressaltar que o sistema de resfriamento evaporativo ainda pode ser usado de forma acoplada, ou seja, é um sistema que pode substituir completamente o sistema existente ou pode funcionar como um pré-resfriador no sistema existente.

Sendo assim fica perceptível que o sistema de resfriamento evaporativo é algo totalmente alinhado com as linhas de pesquisas e exigências atuais, ou seja, é um processo com alto ganho de conforto térmico com poucas consequências ambientais, além de ser economicamente viável. A sua aplicação passa desde um pré-resfriador acoplado no sistema convencional até um sistema capaz de aliviar o estresse térmico em animais.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Desenvolver um modelo matemático e programa computacional que represente as condições de funcionamento e de contorno de um resfriador evaporativo de baixo custo, anteriormente proposto e construído, conforme os princípios do resfriamento evaporativo.

1.3.2 Específicos

- Realizar uma pesquisa bibliográfica sobre resfriadores evaporativos com foco no resfriador evaporativo direto (RED), o processo de resfriamento evaporativo e conforto térmico;
- Elaborar uma modelagem matemática quanto ao processo de resfriamento evaporativo;
- Desenvolver um programa computacional que siga o modelo matemático proposto anteriormente;
- Validar a saída de dados do programa em comparação com a saída de dados do resfriador evaporativo de baixo custo;
- Propor novas recomendações para trabalhos futuros em busca de expandir a ideia do resfriador evaporativo.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho em questão foi subdividido em 5 capítulos, no qual o capítulo 1 apresenta a formulação do problema, justificativa da realização do estudo e os objetivos gerais e

específicos. O capítulo 2 trata-se de uma revisão bibliográfica quanto a resfriador evaporativo, conforto térmico e resfriador evaporativo direto. O capítulo 3 expõe a metodologia aplicada durante todo o trabalho e a modelagem matemática. O capítulo 4 possui os resultados obtidos do estudo e as respectivas discussões quanto aos mesmos. Por fim o capítulo 5 conclui o trabalho, apresentando todas as conclusões obtidas e possíveis recomendações futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No capítulo em questão é desenvolvida a base teórica de todo o estudo, seguido de sua pesquisa bibliográfica. Sendo assim é possível entender conceitos sobre transferência de calor, resfriamento evaporativo, psicrometria e conforto térmico.

2.1 História do processo

Sabe-se que uma das maiores necessidades da evolução humana para o ser consciente foi a questão do condicionamento do ar, desde o conforto térmico até a conservação de alimentos. Segundo Camargo (2009) a civilização utilizava de gelo natural recolhido durante o inverno para posterior utilização, esse gelo era armazenado em locais isolados com palha e esterco.

É sabido da existência de pinturas e afrescos, datados de aproximadamente 2500 A.C, que mostram escravos utilizando jarras de água para efetuar o resfriamento dos cômodos das então realezas (CAMARGO, 2009).

Outros exemplos clássicos são a pintura de parede de Herculano, de cerca de 70 D.C, que retrata uma garrafa de água com couro para resfriar a mesma e o fato da corte de Francisco I buscar em Portugal vasilhas de barro para deixar a água mais fresca e saudável (WATT, 2012).

As primeiras construções que aproveitaram mecanismos antigos de resfriamento evaporativo tiveram origem no Egito, com sistemas de distribuição de água para locais situados em climas mais quentes e secos, esses mecanismos se baseavam em uso de potes porosos com água em seu interior, lagoas, piscinas e rampas que originavam filmes de água integradas com as paredes densas e protegidas, para trazer uma temperatura mais agradável ao ambiente. Na extinta Pérsia existia o sistema denominado “*windcatcher*”, um tipo de arquitetura que por meio do efeito Coanda, criava ventilação natural em edifícios, basicamente reservatórios de água eram construídos juntos aos canais onde era possível a passagem de ar de forma a resfriar esse fluxo do ar, conseqüentemente gerando um resfriamento no interior da construção (OLIVEIRA, 2011), (CAMARGO. 2009), CAROSI (2006).

Segundo Watt (2012), nossos pioneiros utilizavam de caixas cobertas de tecido ou outros objetos capazes de resfriar para preservar alimentos em caixas, por exemplo era comum as panelas ou calhas irem em cima do pano para manter esses úmidos por meio

da ação capilar, e assim esse pano úmido manter resfriada a caixa com os alimentos. Ainda existia uma forma primitiva de se manter o conforto térmico, as cortinas das janelas de frente para o vento eram umedecidas com água para conseguir um ambiente mais fresco para se dormir.

A título de registro, Fonseca (2012), Camargo (2009) e Watt (2012) citam o sistema de resfriamento evaporativo de Leonardo da Vinci (1452-1519) como o primeiro a ser construído. Era um sistema combinado por uma roda d'água oca, com uma passagem de ar que tinha como objetivo guiar o ar resfriado para o local, e em termos de funcionamento era bem simples, sendo que conforme a roda se movimentava, o ar era resfriado pela passagem da água e evaporação da mesma.

Por fim, o restante de inovação nesse âmbito se deve aos estudos de Robert Boyle (1657-1691), que desenvolveu a Lei de Boyle, o estudo da ciência mecânica dos fluídos por Bernoulli, Euler, Pitot, Chezy e outros, o estudo da natureza da evaporação e sua importância no ciclo global por John Dalton (1766-1844), a caracterização quantitativa em escoamentos por meios porosos de Darcy (1856) e o desenvolvimento das cartas psicrométricas já no século 20 por William Carrier (1876-1950) (CAMARGO, 2009).

2.2 Transferência de Calor

Para Incropera et al (2000, p.2), “transferência de calor (ou calor) é energia térmica em trânsito em razão de uma diferença de temperaturas no espaço”.

A base de toda a transferência de calor é a Lei Zero da Termodinâmica, ou seja, quando existem corpos com temperaturas diferentes, estes tendem a transferir energia térmica entre si (calor) de forma a chegar em um equilíbrio térmico (NAG, 2002).

Para Çengel & Ghajar (2012), a exigência básica para ocorrer a transferência de calor entre corpos é a diferença de temperatura, ou seja, a diferença de temperatura pode ser tratada como a força motriz do fenômeno, visto que em corpos na mesma temperatura é impossível a transferência líquida de calor, como é possível observar na figura 4.

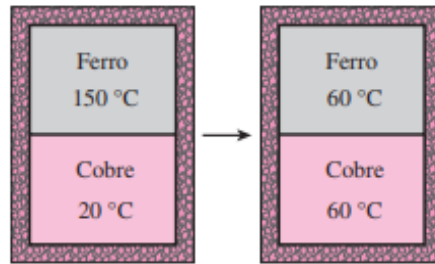


Figura 4: Dois corpos em um invólucro isolado atingem o equilíbrio térmico quando são colocados em contato
 Fonte: Boles & Çengel (2013, p. 17)

Quanto aos modos de transferência, são basicamente três: condução, convecção e radiação, como retrata a figura 5.

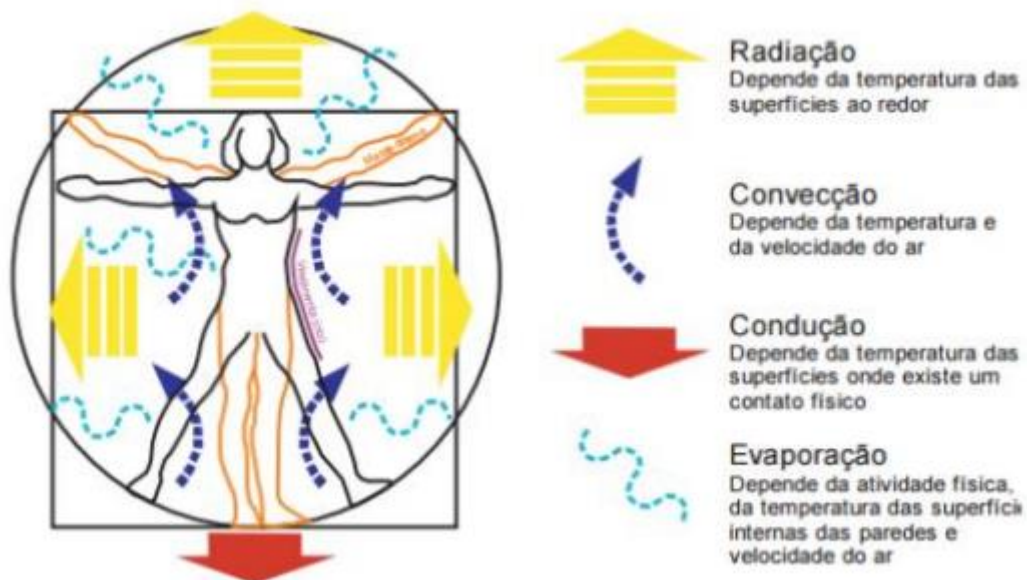


Figura 5: Esquema da fisiologia humana e das trocas térmicas
 Fonte: Rafael (2019)

Condução é a transferência de energia relacionada com atividades atômicas e moleculares, ou seja, é uma troca de calor das partículas mais energéticas para as partículas menos energéticas devido a suas interações, podendo ocorrer em sólidos, gases ou líquidos (BERGMAN & LAVINE, 2019).

Convecção é um modo de transferência que combina dois efeitos, o de condução e de movimento de um fluido, basicamente é a transferência de energia entre uma superfície e um fluido em movimento (BERGMAN & LAVINE, 2019).

Radiação é conceitualmente a energia emitida pela matéria em uma temperatura diferente do zero absoluto. Diferentemente da convecção e condução, esse modo de transferência de calor não necessita da presença de um meio interveniente (BERGMAN & LAVINE, 2019).

Já a evaporação pode ser caracterizada como uma mudança de estados, nesse caso a mudança do fluido líquido para gasoso, devido a energia envolvida no processo, todavia é um processo relacionado a transferência de massa (BERGMAN & LAVINE, 2019).

2.3 Conforto Térmico

Para Camargo (2009, p. 43) “conforto térmico é definido como sendo aquela condição que expressa satisfação com o ambiente térmico”. Camargo (2009), ainda traz a informação que o homem possui um sistema regulador de temperatura, o qual consegue manter a temperatura corporal por volta de 37°C, logo essa é a temperatura considerada como confortável, sem promover nenhum desconforto térmico. Todavia para atingir a condição de conforto, Camargo (2009) afirma que existem duas condições máximas, são elas:

- Combinação da temperatura da pele e do corpo, de forma a proporcionar uma sensação térmica neutra;
- Equilíbrio energético no corpo, ou seja, uma igualdade entre calor produzido e calor perdido.

Segundo Carossi (2006), todo o embasamento dessa teoria está no balanço térmico verificado entre o homem e o ambiente ao seu redor. A figura 6 mostra a interação entre o conforto humano e o meio ambiente.

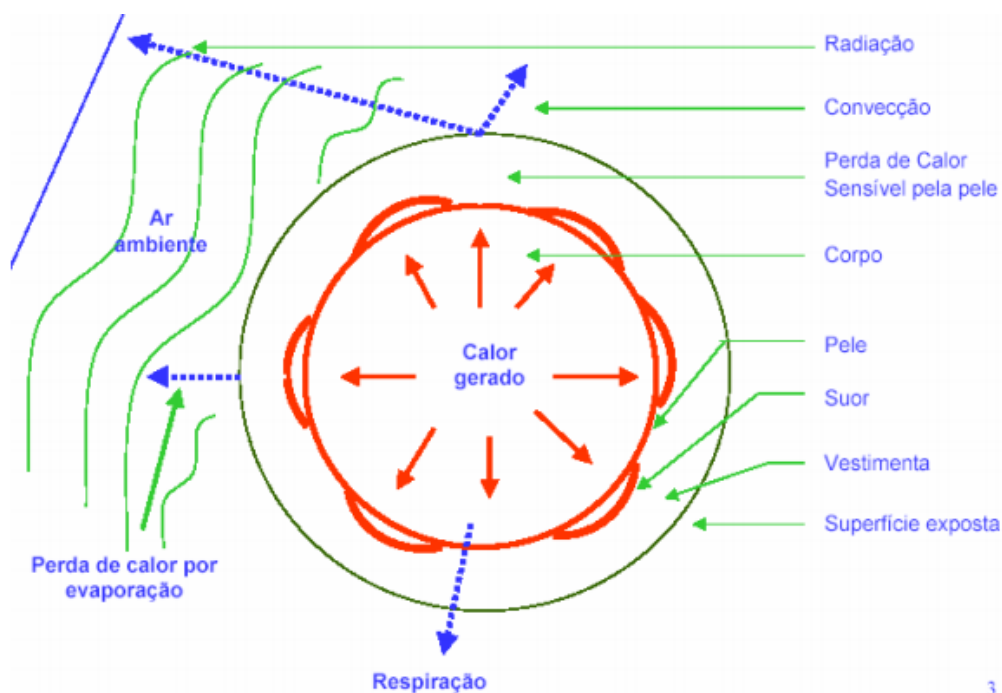


Figura 6: Interação térmica entre o conforto humano e o meio ambiente
 Fonte: Carossi (2006)

O homem é um ser vivo homeotérmico, ou seja, o próprio organismo busca essa autorregulação da temperatura. A efeito de comparação, para Frota & Schiffer (2001), organismos homeotérmicos são semelhantes a uma máquina térmica, tendo suas energias conseguidas por fenômenos térmicos.

Em ambientes mais frios, o organismo procura reduzir as trocas térmicas entre o indivíduo e o ambiente, por meio da vasoconstrição, arrepio e tiritar, ou seja, aumentando a resistência térmica da pele. Já em situações mais quentes, por meio da vasodilatação e exsudação, ocorre a redução das combustões internas (FROTA & SCHIFFER, 2001).

Sendo assim o conforto térmico é muito maleável, podendo ser analisado sob dois aspectos: o referencial pessoal e o referencial ambiental.

Para o ponto de vista pessoal a determinação do estado térmico considera uma situação pessoal, fazendo com que a pessoa esteja confortável conforme a sua sensação térmica. Todavia, do ponto de vista ambiental, essa determinação é feita de forma a deixar confortável o maior número de pessoas dentro do ambiente.

Logo, para Camargo (2009) e Carossi (2006), a padronização do conforto térmico é algo extremamente delicado, pois irá depender de condições climáticas (temperatura, umidade e movimentação do ar), fatores mentais e corporais de cada um e a referida situação que o corpo está exposto (repouso, atividade física, trabalhando e outros).

Todavia, em linhas gerais, levando em conta os 3 principais parâmetros: temperatura, umidade e movimentação do ar e os conceitos ambientais e pessoais é possível chegar ao diagrama representado na figura 7, que representa o conforto humano.



Figura 7: Diagrama Conforto Humano
Fonte: INMET (2006)

Com isso o objetivo de todas as aplicações que buscam o conforto térmico, que é o caso do resfriador evaporativo, é atingir a região central da Figura 7, onde é possível garantir o conforto dos envolvidos no projeto.

Outra forma de interpretar a questão de conforto térmico, é a análise das zonas térmicas, por intermédio dos diagramas e cartas psicrométricos. Para isso, segundo Camargo (2003), se faz imprescindível entender a temperatura efetiva (TE), a mesma correlaciona, umidade, movimentação do ar e temperatura, exprimindo uma temperatura, na qual a maior parte das pessoas se sente bem, diversos testes foram realizados analisando a TE e seus parâmetros e elaboraram então a dita Carta de Conforto ASHRAE, que pode ser observada na figura 8.

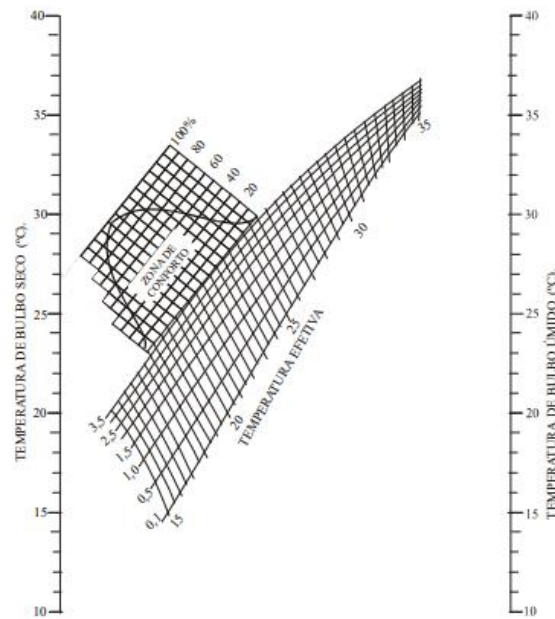


Figura 8: Carta de Conforto ASHRAE
Fonte: Camargo (2003)

De forma a facilitar a interpretação da Zona de Conforto da ASHRAE, que pode ser observada na parte superior da figura 7, optou-se por implementar a mesma no diagrama psicrométrico, sendo assim Camargo (2003), apresenta uma zona na qual se torna possível alcançar a região de conforto térmico, seja por meio do resfriamento evaporativo direto ou indireto. O diagrama em questão pode ser visualizado na figura 9.

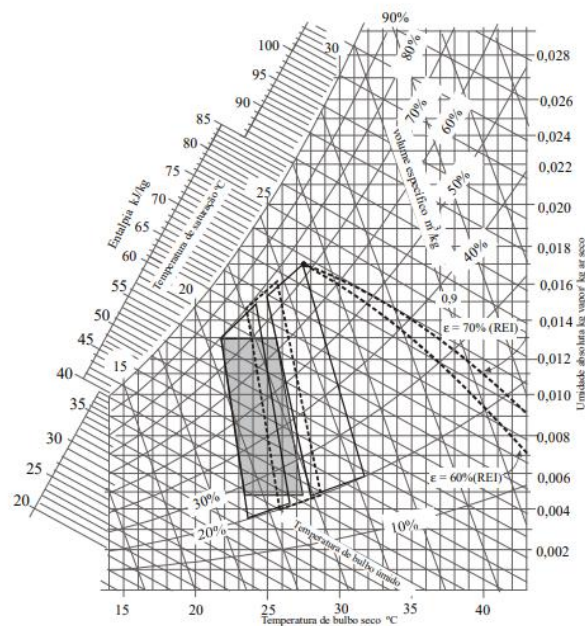


Figura 9: Diagrama Psicrométrico com a região delimitante onde é possível atingir a região de conforto térmico pelo RE
Fonte: Camargo (2003)

2.4 Resfriador Evaporativo

Camargo (2009) cita que o resfriamento evaporativo utiliza água e ar como os fluidos de trabalho, de forma que a evaporação da água pela passagem de um fluxo de ar gera uma redução da temperatura do ar, ou em outras palavras, é um fenômeno semelhante ao da pele humana depois de um banho com água fria em um dia quente. É possível acompanhar o princípio de funcionamento do sistema na figura 10.

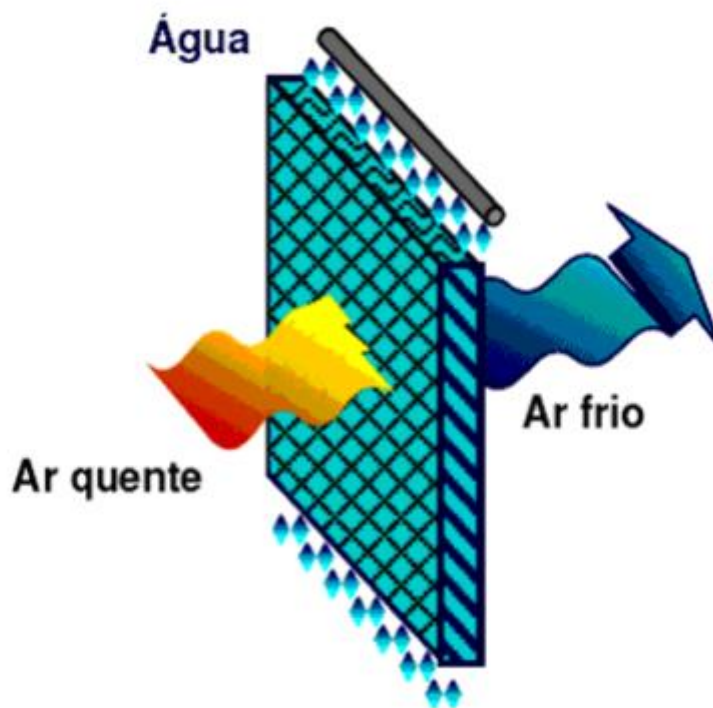


Figura 10: Funcionamento do Resfriador Evaporativo
Fonte: Abreu e Abreu *apud* Rosa (2009)

Para Santos *et al.* (2008), o resfriamento evaporativo irá ocorrer devido à combinação de processos simultâneos de transferência de calor e massa adjunto de uma corrente de ar que será então resfriada e uma superfície úmida que faz com que os fluidos de trabalho (ar e água) sejam usados no sistema.

O resfriador evaporativo é um sistema mais eficaz quanto maior a necessidade de resfriamento, sendo também mais efetivo em regiões mais secas, logo que nesses lugares o aumento da umidade é benéfico. Quanto a aplicação, o Brasil possui um grande potencial para receber esse sistema, principalmente nas regiões Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e parte da Norte, devido às altas temperaturas dessas regiões e uma umidade não tão alta, como é possível observar na figura 11 (CAROSSI, 2006).



Figura 11: Mapa climático brasileiro

Fonte: IBGE *apud* Carossi (2006)

Todavia, suas utilizações não estão restritas somente a essas condições, visto que é largamente usado em lavadores de ar, torres de resfriamento, condensadores evaporativos, em ambientes que a manutenção da umidade relativa é requisito para a execução dos projetos, espaços públicos, subestações de energia, hortifrutigranjeiros, indústrias de manufaturas e em outros casos. Vale ressaltar que é uma ferramenta que vem ganhando muito mercado nos últimos anos, devido principalmente ao apelo ambiental e baixo custo (CAMARGO & EBINUMA, 2004).

Quando comparado diretamente com o ar condicionado o resfriador evaporativo, segundo Carossi (2006) possui quatro vantagens principais. São elas:

- Baixo custo de manutenção e instalação;

- Melhor qualidade do ar;
- Não poluente;
- Menor consumo de energia elétrica.

Ademais é um processo de refrigeração que não necessita do uso de CFC (CloroFluorCarbono) ou HFC (HidroFluoroCarboneto), sendo assim não agride o meio ambiente, além de renovar o ar do ambiente, causando uma filtragem do ar (CAMARGO, 2009), (CAROSSI, 2006), (PIMENTA & CASTRO, 2004).

2.5 Tipos de Resfriamento Evaporativos

Sabe-se que os resfriadores evaporativos podem ser divididos basicamente em duas frentes, o sistema de Resfriamento Evaporativo Direto (RED) e Resfriamento Evaporativo Indireto (REI).

2.5.1 Resfriamento Evaporativo Direto

Segundo Castro & Pimenta (2009) os resfriadores evaporativos diretos conseguem resfriar um gás por meio de contato direto com uma superfície líquida, ou uma superfície sólida molhada ou até mesmo por sprays. É possível observar o esquemático de um resfriador evaporativo na figura 12.

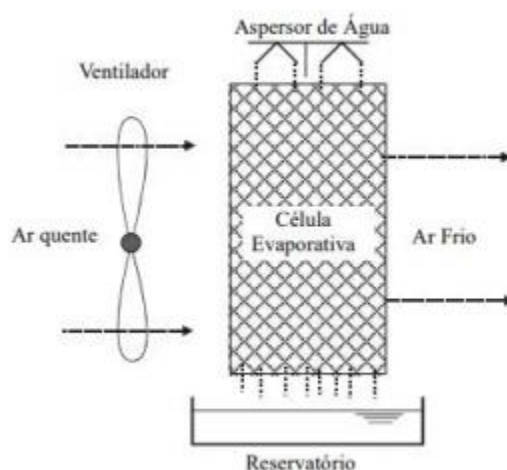


Figura 12: Esquemático do RED
Fonte: Camargo (2009)

Sendo assim, nesse sistema a água é então vaporizada dentro da corrente de ar, conseqüentemente o calor e a massa são transferidos do ar para água, fazendo com que ocorra uma redução da temperatura de bulbo seco e um aumento na umidade. Todavia no

caso do RED, não existe transferência de calor, ou seja, é uma situação adiabática, sem redução da entalpia, o que verdadeiramente ocorre é a perda de uma certa quantidade de calor sensível e um ganho de uma certa quantidade, de mesmo valor, de calor latente devido a evaporação da água, tudo isso faz com que não ocorra o resfriamento real (CAMARGO, 2009). Na figura 13 é possível observar o princípio de funcionamento do RED.



Figura 13: Princípio de funcionamento do RED
Fonte: Maurya, et al apud Masiero *et al.* (2020)

Quanto ao processo psicrométrico que ocorre, a figura 14 mostra o mesmo.

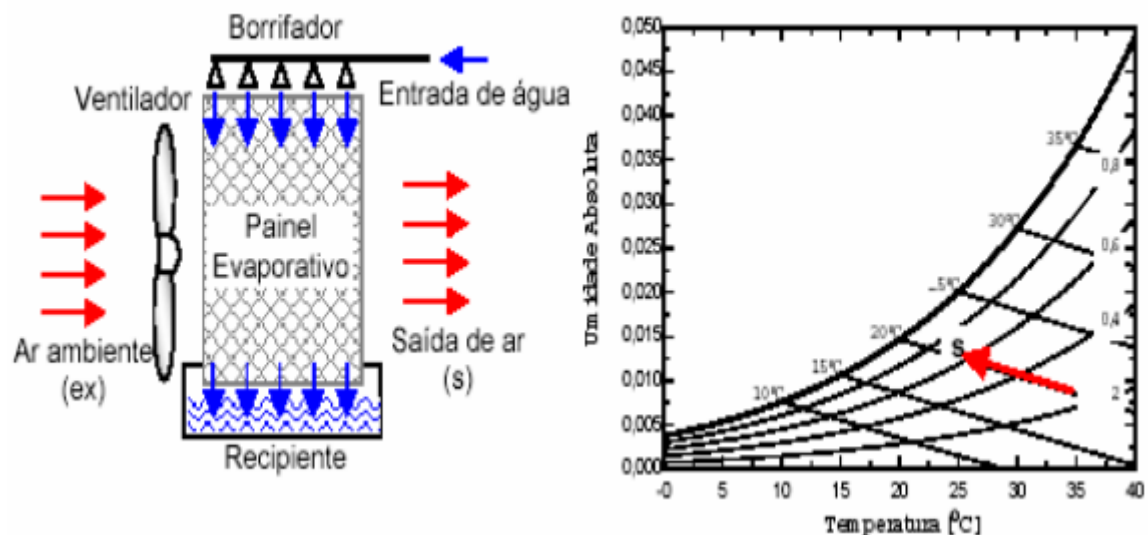


Figura 14: Processo psicrométrico de um resfriador evaporativo direto
Fonte: Carossi (2006)

Segundo Carossi (2006), por meio da carta psicrométrica é possível observar que a diferença entre uma linha de temperatura de bulbo úmido constante e uma linha de

entalpia constante é mínima, permitindo então assumir que a temperatura do bulbo úmido não irá se alterar no processo de resfriamento evaporativo.

Para futuros cálculos, a queda de temperatura do bulbo seco nos RED, podem ser obtidas por meio do cálculo da efetividade do sistema. Porém, para Bastos (2011) esse processo possui limitações, primeiramente a quantidade de calor sensível retirado não pode ser maior em nenhuma hipótese que o calor latente necessário para saturação da água com o vapor. Vale lembrar que por usar o ar externo durante a climatização, o resfriador evaporativo direto está muito dependente das condições externas, o que em alguns casos pode se tornar um fator limitante a aplicação.

2.5.2 Resfriamento Evaporativo Indireto

Para Camargo (2003), a introdução dos equipamentos de resfriamento evaporativo indireto foi um avanço na tecnologia dos RE, logo que nesse caso o ar relativamente seco é mantido separado do ar do lado molhado que está em contato com o líquido evaporado.

Nessa situação o ar que irá então condicionar o ambiente, também chamado de ar primário, transfere calor para um líquido ou corrente de ar secundário, estes já tendo sido resfriados evaporativamente. Com isso a entalpia do ar seco é reduzida, devido à redução adiabática de temperatura de um refrigerador evaporativo direto. Existem dois tipos de REI, tipo placa e tipo tubo, como pode ser observado na figura 15 (CAMARGO, 2009), (CAROSSO, 2006).

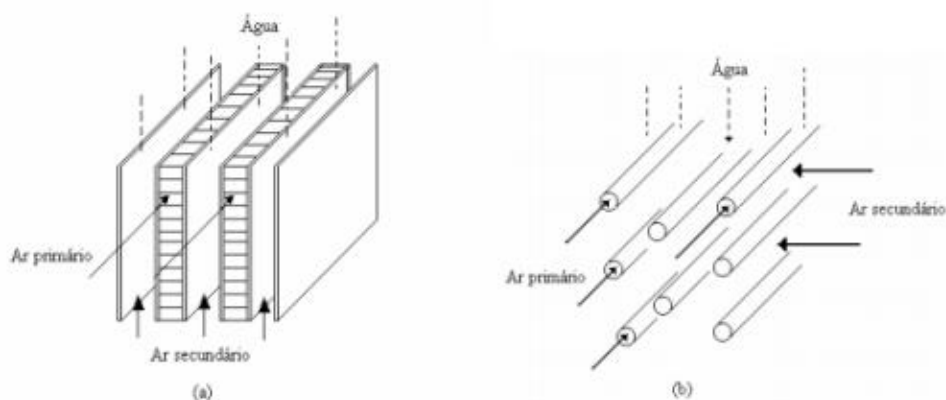


Figura 15: Tipos de Resfriadores Evaporativos Indiretos:
 (a) tipo placa; (b) tipo bulbo
 Fonte: Carossi (2006)

Camargo (2009) elenca alguns motivos para o aumento da capacidade de refrigeração do REI, são eles: existência de grandes gradientes de temperatura através da parede (criados devido ao ar com baixa temperatura de ponto de orvalho), aumento do coeficiente de transferência de calor no lado molhado e por último graças a altas relações de superfície de troca de calor por volume.

Esta configuração não aumenta a umidade do ar, pois não existe contato direto entre o ar primário e a superfície úmida, sendo uma grande vantagem quanto ao RED (SANTOS *et al.*, 2008).

Outras vantagens desse processo é que não requer grandes volumes de ar para chegar ao conforto térmico e possibilita a adição de um RED como processo seguinte.

2.6 Resfriador Evaporativo Alternativo

Hoje a busca pela eficiência energética, tecnologias limpas, processos ambientalmente amigáveis, mitigação de danos, processos de menor custo, reaproveitamento de tecnologias e recursos são nortes e pautas que dominam toda a cadeia de pensamento dos pesquisadores, empresas e academia. Sendo assim, com os resfriadores evaporativos não seria diferente, para vencer os “preconceitos” para com essa tecnologia e tentar popularizar mais esse processo, entendidos dos assuntos, buscaram então meios de criarem resfriadores evaporativos alternativos e/ou de baixo custo.

O primeiro a ser citado é o sistema alternativo de resfriamento de baixo custo analisado por Aline de Paula Rafael (2019), realizado na Universidade Federal de Ouro Preto UFOP, onde buscou-se usar materiais de baixo valor agregado ou reutilizar objetos que já estavam disponíveis dentro do Laboratório de Sistemas Térmicos da UFOP, figura 16.



Figura 16: Laboratório de Sistemas Térmicos, Metrologia e Instrumentação
Fonte: Rafael (2019)

Segundo Rafael (2019) foram usados os seguintes materiais:

- 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.

Nas figuras 17 e 18 é possível observar como ficou o protótipo do sistema de resfriamento evaporativo:



Figura 17: Protótipo do sistema de resfriamento evaporativo
Fonte: Rafael (2019)



Figura 18: Visão interna do resfriador evaporativo de baixo custo

Fonte: Rafael (2019)

O princípio de funcionamento do mesmo é básico, seguindo o regime de um resfriador evaporativo direto. A água que fica retida em alguns buracos vedados do tijolo, faz com que os mesmos fiquem umedecidos, visto que o tijolo é um material poroso e permeável, sendo capaz de absorver a umidade, logo o tijolo atua como uma célula evaporativa, como foi representada anteriormente na figura 10. O ar então é soprado pelos coolers e faz a passagem pelos buracos não vedados, onde tem-se a transferência de calor e massa entre as paredes úmidas do tijolo e o ar, resfriando o ar que sai pelo furo lateral na caixa do isopor e conseqüentemente resfriando e umidificando o ambiente (RAFAEL, 2019).

Quanto a sua efetividade, Rafael (2019) chegou à conclusão que foi possível obter valores expressivos de efetividade do sistema, mostrando que o resfriador atende o que foi proposto, o resfriamento e aumento da umidade do ar.

Alinhado às ideias de resfriadores alternativos, Rosa (2009) executou uma avaliação quanto aos painéis porosos constituídos de argila expandida em sistemas de resfriamento adiabático evaporativo.

Normalmente o RED usa célula evaporativa pré-fabricada de material celulósico altamente higroscópico, tratado quimicamente ou material composto de fibra de vidro resistente à água e antichamas (ROSA, 2009). Em seguida, na figura 19 é possível visualizar os painéis de resfriamento evaporativo pré-fabricados da empresa Munters.



Figura 19: Painéis de resfriamentos evaporativos CELdek®
Fonte: Rosa (2009)

Todavia esses painéis de celulose, segundo Rosa (2009) apresentam alguns problemas, como vulnerabilidade a ataque de roedores, baixa durabilidade para as condições no Brasil e seu alto custo, gerando uma grande dificuldade de aquisição, visto que são produtos importados.

Contudo, diversos estudos concluíram que o uso de argila expandida (cinasita), figura 20, é uma ótima alternativa quanto a matéria prima dos painéis evaporativos, logo que apresenta leveza, resistência, inércia química, estabilidade dimensional, incombustibilidade e excelentes propriedades de isolamento térmico e acústico.



Figura 20: Argila expandida na forma granular
Fonte Rosa (2009)

Para efeitos de comparação segue a figura 21 com painéis com argila expandida e painéis de celulose.



Figura 21: Painéis de argila expandida e painéis de celulose
Fonte: Rosa (2009)

Quanto aos resultados, os painéis evaporativos com argila expandida com a granulometria 1 e espessuras de 6,0, 8,5 e 10,0 cm, tiveram eficiência bem compatíveis e semelhantes à eficiência quando se utiliza painéis de celulose (ROSA, 2009).

Ainda sobre painéis evaporativos alternativos, Oliveira (2011), traz outra discussão, porém utilizando de painéis à base de fibra de Coco, figura 22 e fibra de Esponja Vegetal, figura 23.



Figura 22: Painel com manta de fibra de coco
Fonte: Oliveira (2011)



Figura 23: Painel com manta de fibra de Esponja Vegetal
Fonte: Oliveira (2011)

As fibras vegetais têm como principais características a baixa densidade, baixo consumo de energia, baixa abrasividade, baixo custo, biodegradabilidade, altas propriedades de resistência mecânica específica e excelente propriedade termoacústica.

Quanto à eficiência, Oliveira (2011) revela que a Fibra de coco obteve 79,51% e a fibra de Esponja Vegetal obteve 77,2%, sendo assim bem próximos aos níveis de eficiência já observados em painéis evaporativos comerciais. Outro ponto importante para salientar é que o custo de produção industrial desses modelos alternativos é altamente lucrativo e as empresas devem começar a investir de forma mais massiva nessas tecnologias.

Sendo assim, fica perceptível, como o resfriamento evaporativo pode ser considerado como uma tecnologia sustentável e em evolução, logo que a academia já procura trazer novos tipos de painéis evaporativos, esses que aliem maior durabilidade, menor consumo de energia e custo de fabricação.

2.7 Modelagem Matemática

O presente trabalho, demandou a elaboração de um modelo matemático que representasse os fenômenos envolvidos no resfriador evaporativo, para isso, tornou-se necessário a modelagem matemática de uma equação que conseguisse reger a situação.

Costa (2009), afirma que a modelagem sempre esteve presente na vida do homem, e isso acontece desde tempos antigos, por exemplo, Eratóstenes (276-196 a.C) criou um

modelo para calcular a circunferência da Terra e Galileu Galilei (1564-1642), criou modelos tanto para a queda de corpos, quanto para movimento parabólico dos projéteis.

A concepção da modelagem matemática segue algumas etapas. Inicialmente é necessário formular o problema, em seguida elaborar um modelo matemático que represente a situação descrita, resolver então o modelo e analisar se o mesmo é ou não válido. Essas etapas são observadas na figura 24.

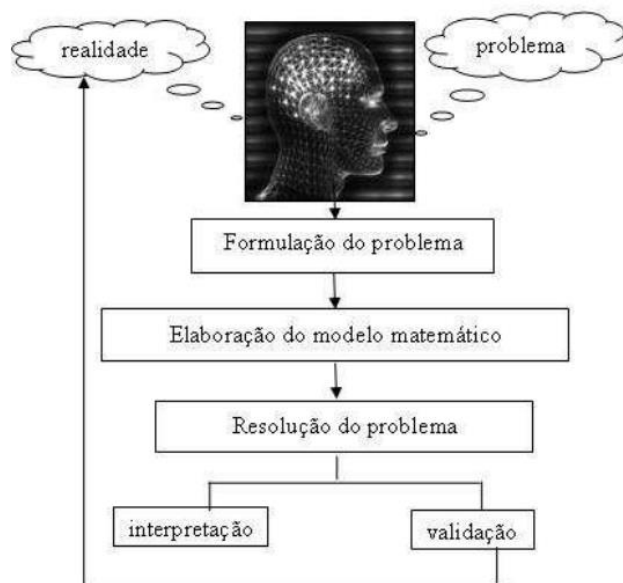


Figura 24: Etapas de uma modelagem matemática
Fonte: Costa (2009)

3 METODOLOGIA

O capítulo em questão tem como finalidade repassar as características dos procedimentos utilizados durante a pesquisa e a modelagem matemática referente ao fenômeno estudado.

Segundo Praça (2015) o item de metodologia é onde os pesquisadores tem como dever descrever os procedimentos técnicos que foram usados durante todo o trabalho, elucidar a coleta de dados, definir como foi feita a tabulação de dados e análise de uma forma mais generalizada dos resultados obtidos, tal qual observa-se na figura 25.



Figura 25: Etapas para o desenvolvimento da Metodologia Científica do projeto de pesquisa
Fonte: Praça (2015)

3.1 Tipos de Pesquisa

Em primeiro plano deve-se estabelecer o que é pesquisa, para isso Gil (2002) a define como um “procedimento racional e sistemático que tem como objetivo proporcionar respostas aos problemas que são propostos”. Vale ainda ressaltar que a pesquisa está totalmente relacionada a necessidade, seja ela quando não existe informação suficiente para resolução do problema ou quando a informação disponível não está ordenada de forma adequada à resolução do problema.

De Luna (2000), informa que a palavra metodologia vem passando por algumas mudanças durante o tempo, em relação ao sentido e status, atualmente metodologia, tem um poder muito mais relativo e pouco engessado, busca-se cada vez mais substituir a verdade para assim aumentar o poder explicativo das teorias.

Todavia, não se deve subestimar a pesquisa, visto que a mesma se desenvolve ao longo de um processo, com diferentes fases, utilização de métodos, técnicas, e outros procedimentos científicos (GIL, 2002).

Em suma, Silva & Menezes (2001) finaliza que “pesquisa é um conjunto de ações propostas para encontrar a solução para um problema, que têm por base procedimentos racionais e sistemáticos”.

Sabe-se que existem diferentes formas de classificar uma pesquisa, porém Silva & Menezes (2001) classificam as pesquisas do ponto de vista da forma da abordagem do problema como: quantitativa e qualitativa.

A pesquisa quantitativa é quando as opiniões e informações podem de alguma forma serem traduzidas em números, ou seja, possibilitando uma classificação e organização dos dados. É necessário salientar que este tipo requer uso de técnicas e recursos estatísticos (percentagem, média, mediana, moda, entre outros).

Por outro lado, a pesquisa qualitativa, considera uma espécie de vínculo indissociável entre subjetividade do sujeito e o mundo em questão, o que não permite a tradução da relação em números. Quanto a interpretação de fenômenos e significados a mesma é feita de forma mais básica e elementar, não exigindo o uso de técnicas e métodos estatísticos.

Agora com base em seus objetivos, Gil (2008), Gil (2002) e Silva & Menezes (2001), classificam como: pesquisa exploratória, pesquisa descritiva e pesquisa explicativa.

A pesquisa exploratória tem como principal foco trazer uma familiaridade com o problema, fazendo com que o mesmo seja mais explícito ou até mesmo construindo hipóteses, de forma mais sucinta se baseia no aprimoramento de ideias ou descobertas de intuições. Mesmo possuindo um planejamento em tese flexível, geralmente assume formas de estudo de caso ou de pesquisa bibliográfica, envolvendo levantamento bibliográfico, entrevistas com os envolvidos e análise de exemplos.

Sobre a pesquisa descritiva a mesma assume uma forma mais direta, que busca descrever um fenômeno, população ou estabelecer uma relação entre as variáveis. A principal característica intrínseca a esse método é a utilização de técnicas padronizadas de coleta de dados. Juntamente a pesquisa exploratória são os principais expoentes para pesquisadores sociais preocupados com a ação prática.

Quanto a pesquisa explicativa, essa tem como principal finalidade a identificação dos fatores que determinam/influenciam a ocorrência do fenômeno estudado. Normalmente é classificada como a pesquisa que mais aprofunda o conhecimento da realidade, logo que busca de forma incessante elucidar o “porquê”, razão das situações, vale ressaltar que é o tipo de pesquisa que se torna a base de sustentação do conhecimento científico, por meio dos seus resultados, pontuações, otimizações e descobertas.

Quanto aos procedimentos técnicos, também chamado de modalidade de pesquisa, Da Fonseca (2002), enumera alguns tipos: pesquisa bibliográfica, documental, experimental, estudo de caso, pesquisa ação e pesquisa participante.

Pesquisa bibliográfica é aquela elaborada com base em diferentes materiais já publicados e consolidados, sejam livros, artigos, periódicos, material disponível de forma online, normalmente todo trabalho científico tem por início essa pesquisa.

Já a pesquisa documental diferentemente da pesquisa bibliográfica é realizada através de fontes mais diversas e diversificadas, sem necessariamente um tratamento de forma mais analítico.

A pesquisa experimental, se baseia primeiramente na determinação de um objeto de estudo, em seguida são escolhidas variáveis que influenciam o processo, por fim é possível obter as formas de controle e de observação, devido ao reflexo dos efeitos que as variáveis geraram no objeto definido anteriormente.

Por outro lado, o estudo de caso ocorre quando o estudo é mais profundo e exaustivo de um ou poucos objetos, caracterizando e permitindo de uma forma bem detalhada e aprofundado um conhecimento.

Por sua vez a pesquisa ação, é realizada com uma estreita associação a uma resolução de problema coletivo ou ação, nesse caso os pesquisadores e participantes representativos estão envolvidos na situação, seja de forma cooperativa ou participativa.

Por último, a pesquisa participante se desenvolve com a interação dos pesquisados, para com os membros envolvidos no processo.

Tendo como base estas informações, o presente trabalho apresenta uma abordagem quantitativa, logo que baseia-se em ferramentas numéricas e modelamento matemático do RED. Quanto ao objetivo a pesquisa é de caráter explicativo, visto que o principal objetivo do estudo é identificar os fatores envolvidos nos fenômenos de refrigeração evaporativa ocorrida em um sistema alternativo de resfriamento de ar de baixo custo proposto anteriormente, de forma a elaborar um modelo matemático para o protótipo. Quanto aos procedimentos técnicos o presente trabalho utiliza pesquisa bibliográfica e estudo de caso e experimental.

3.2 Materiais e Métodos

A execução do trabalho em questão, levou em consideração um experimento já existente no Laboratório de Sistemas Térmicos da UFOP, de nome Estudo Experimental do Desempenho de um Sistema Alternativo de Resfriamento de Ar de Baixo Custo, da Aline de Paula Rafael (2019).

As etapas de desenvolvimento do trabalho podem ser observadas no fluxograma da figura 26.

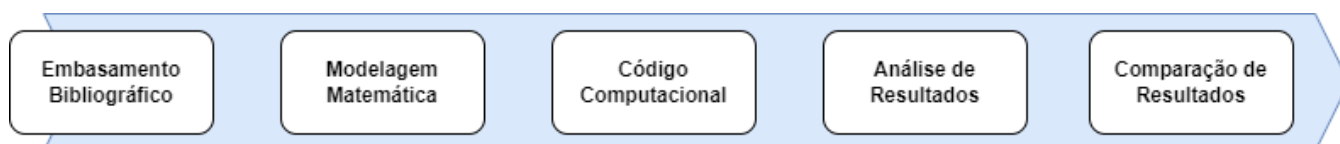


Figura 26: Fluxograma de desenvolvimento do trabalho
Fonte: Pesquisa Direta (2021)

A primeira etapa consiste em um embasamento teórico, por meio de pesquisa bibliográfica, com o intuito de entender todo o processo de resfriamento evaporativo e questões auxiliares que porventura podem influenciar seu funcionamento. Vale ressaltar que o foco se deu quanto ao Resfriamento Evaporativo Direto em aplicações de baixo custo.

Para a modelagem matemática utiliza-se o equacionamento dos principais parâmetros definidos por diversos autores que regem o fenômeno do RED, a principal variável a ser encontrada é a temperatura de bulbo seco na saída do resfriador evaporativo.

A elaboração do código computacional, baseou-se na implementação da modelagem feita anteriormente, de forma a executar diferentes amostras e obter os parâmetros de saída: temperatura de saída, umidade relativa de saída do ar.

A análise de resultados consiste na análise de todas as saídas obtidas do código computacional proposto anteriormente e a verificação dos resultados obtidos, se podem ou não ser considerados significativos.

Por último, a quarta etapa, de comparação de resultados, se resume em uma confrontação de dados obtidos experimentalmente com os obtidos pela equação proposta, de forma a entender se a modelagem será ou não fiel e representativa do protótipo elaborado.

3.3 Modelagem Matemática

O modelo matemático terá como base o volume de controle do RED, e o objetivo é encontrar a temperatura de bulbo seco (TBS) na saída do RED. É possível observar esse modelo na figura 27.

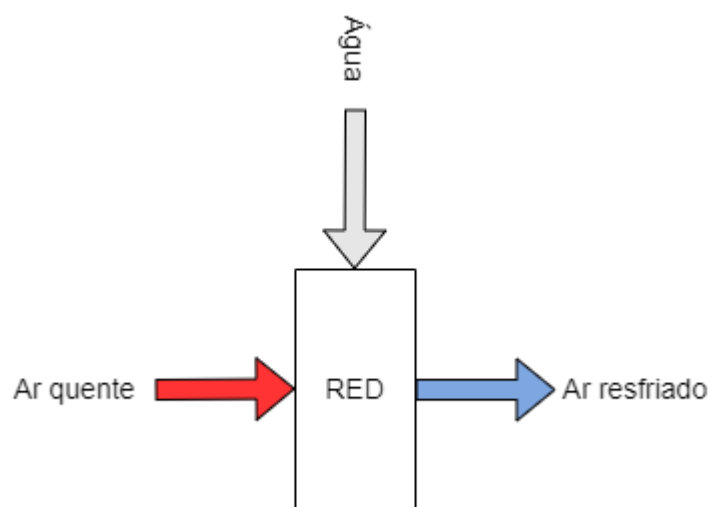


Figura 27: Volume de Controle do RED
Fonte: Pesquisa Direta (2021)

Todavia, para a execução da análise de transferência de calor e massa no RED são necessárias algumas considerações. Para isso Carossi (2006) diz o seguinte:

- O ar seco e o vapor de água têm comportamento de um gás ideal;
- O ar é uma mistura de dois gases, ar seco e o vapor d'água;

- O processo é adiabático, portanto, são desprezadas as perdas de calor para o ambiente;
- Trabalha-se em regime permanente;
- Não são consideradas as variações de energia cinética e energia potencial.

Segundo Camargo (2009), a efetividade ou eficiência de saturação (ε) pode ser estabelecida 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.” Quando chega a uma situação como essa a temperatura de bulbo úmido do ar (TBU) na entrada seria igual TBS na saída. Com isso a eficiência segue a seguinte relação:

$$\varepsilon_d = \frac{TBS_1 - TBS_2}{TBS_1 - TBU_1} \quad (1)$$

De forma a elucidar a questão, de acordo com Camargo (2003), a figura 28 mostra o que ocorre durante o processo de um resfriador com 100% de efetividade.

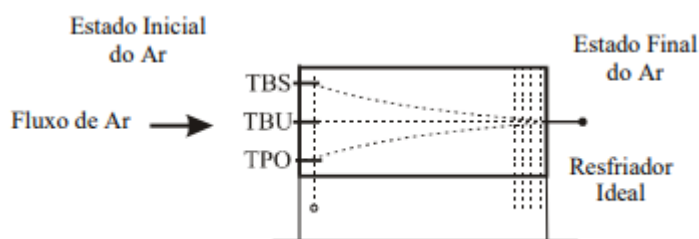


Figura 28: Resfriador evaporativo tipo spray com circulação constante de água
Fonte: Camargo (2003)

Sendo assim, quando a eficiência atinge seu valor máximo, a temperatura de ponto de orvalho (TPO) e temperatura de bulbo seco tenderiam a ser equivalentes a temperatura de bulbo úmido.

Portanto, a temperatura de bulbo seco na saída do RED pode ser definida por:

$$TBS_2 = TBS_1 - \varepsilon_d(TBS_1 - TBU_1) \quad (2)$$

Entretanto, a situação descrita no trabalho é uma situação experimental de caráter protótipo, sendo assim a eficiência do resfriador não é conhecida e muito menos tabelada ou confirmada.

Para isso autores como Carossi (2006), Camargo (2009), Camargo *et al.* (2003), Rosa (2009) e Deshmukh et al (2015) afirmam que a eficiência pode ser dada também por:

$$\varepsilon_d = 1 - \exp\left(-\frac{h_c * A}{\dot{m}_a * c_{pu}}\right) \quad (3)$$

Onde \dot{m}_a = vazão mássica de ar seco (kg/s), h_c = coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m²K), A = área de contato entre o fluido e superfície (m²) e c_{pu} = calor específico úmido (J/kg°C).

Todavia para obtenção da equação 3, se faz necessário algumas situações e cálculos iniciais. Para isso Camargo (2009), diz que o ar úmido é caracterizado como uma mistura entre o vapor d'água e ar seco, em seguida utiliza do balanço de energia para poder definir a mesma. É possível observar o esquemático na figura 29.

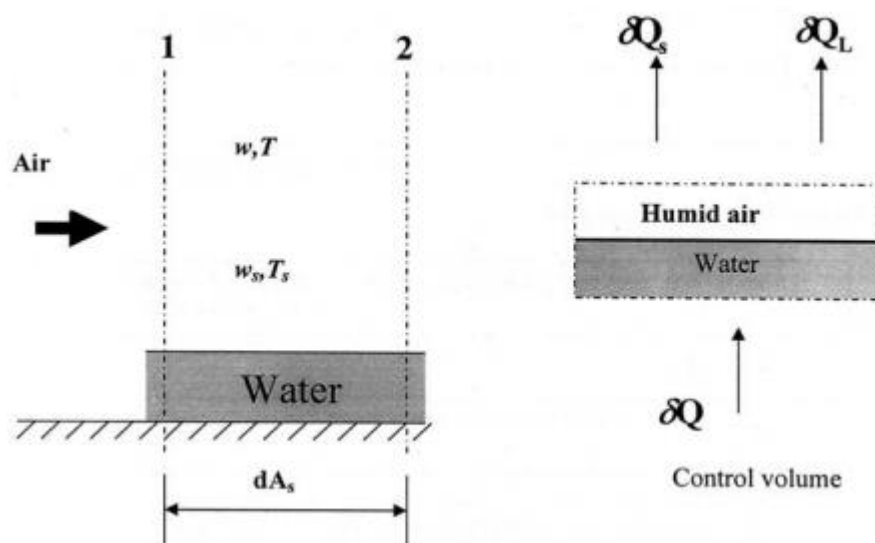


Figura 29: Esquema de um RED
Fonte: Kachhwaha & Prabhakar (2010)

Para compreensão do balanço, é necessário considerar a situação de uma superfície molhada na qual está escoando um ar úmido. Como dito anteriormente, o fenômeno estudado, possui tanto a transferência de calor, que se dá quando a temperatura da corrente de ar (T) for diferente superfície (T_s), quanto pela transferência de massa, essa consequente da diferença entre a umidade de corrente de ar (w) com a umidade absoluta do ar junto a superfície (w_s) (CAMARGO, 2009).

Após a definição dessas condições, Carossi (2006), relembra que o fluxo de calor sensível (δQ_s), ou seja, a taxa diferencial de calor sensível, é definida pela lei do resfriamento de Newton:

$$\delta Q_s = h_c * dA * (t_s - t) \quad (4)$$

Sendo, h_c = coeficiente de transferência de calor por convecção, A = área da superfície de transmissão, t_s = temperatura na superfície e t = temperatura da corrente do ar.

Continuando o equacionamento, agora se torna necessário definir a taxa de transferência de vapor d'água, que ocorre entre o ar junto a superfície e a corrente de ar, para isso, Camargo *et al.* (2003), afirma:

$$dm_v = h_m * \rho_a * dA * (w_s - w) \quad (5)$$

Vale ressaltar que h_m é o coeficiente de transferência de massa por convecção, já ρ_a é a densidade da água.

Tendo definido, o fluxo de calor e taxa de transferência de vapor d'água, é possível determinar o fluxo de calor latente (δQ_L), por meio da lei de conservação de energia (CAMARGO, 2009):

$$\delta Q_L = \delta Q - \delta Q_s = h_{Lvs} * dm_v \quad (6)$$

Onde δQ é o fluxo de calor total, enquanto h_{Lvs} é a entalpia específica de vaporização de água na temperatura da superfície.

Assim, por meio da combinação das equações (4), (5) e (6), é possível obter a expressão para o fluxo de calor diferencial total, segundo Camargo (2009):

$$\delta Q = [h_c * (t_s - t) + \rho_a * h_{Lvs} * h_m * (w_s - w)] dA \quad (7)$$

Logo essa equação, permite observar que a transferência de calor total advém da relação entre 2 parcelas, uma relacionada a diferença de temperatura e outra relacionada a diferença de umidades absolutas, todavia o equacionamento ainda continua distante dos dados disponíveis para cálculo, o que torna necessário mais algumas transformações e associações (CAMARGO, 2009).

Continuando o desenvolvimento da expressão, Moreira *apud* Camargo *et al* (2003) assegura que a soma das entalpias individuais resulta na entalpia específica da mistura:

$$h_s - h = (h_{as} - h_a) + [(w_s * h_{vs}) - (w * h_v)] \quad (8)$$

Na qual, h_{as} = entalpia do ar na saída, h_a = entalpia do ar, h_{vs} = entalpia do vapor à temperatura da superfície e h_v = entalpia do vapor.

Prosseguindo a análise do RED, admite-se uma situação de que ar e vapor são gases perfeitos, logo (Camargo, 2009):

$$h_s - h = c_{pu} * (t_s - t) + h_{vs} * (w_s - w) \quad (9)$$

Carossi (2006), ainda lembra que o calor específico úmido (c_{pu}) é a combinação entre o calor específico do ar seco (c_a) e o calor específico do vapor d'água (c_{pv}):

$$c_{pu} = c_{pa} + w c_{pv} \quad (10)$$

Logo:

$$t_s - t = \frac{(h_s - h) + h_{vs} * (w_s - w)}{c_{pu}} \quad (11)$$

É importante ressaltar a relação de Lewis (R_{Le}):

$$R_{Le} = \frac{h_c}{h_m * C_p * \rho} \quad (12)$$

Com isso, Camargo *et al.* (2003) combina as equações (11) e (7), utilizando também a R_{Le} chegando a:

$$\delta Q = \frac{h_c * dA}{c_{pu}} * \left\{ (h_s - h) + \frac{(w_s - w)}{R_{Le}} * [(h_{Lvs} - R_{Le} * h_{vs})] \right\} \quad (13)$$

Para prosseguir com a modelagem matemática, Camargo (2009), elenca algumas condições indispensáveis, durante a dedução a densidade do ar úmido é aproximada da densidade do ar seco, a relação de Lewis torna-se unitária, o que significa $(h_{Lvs} - h_{vs}) \approx h_{Lvs}$, outro adendo feito é que o termo $(w_s - w) * h_{Lvs}$, quando comparado a diferenças

entre as entalpias específicas ($h_s - h$) pode ser considerado desprezível. Sendo assim o termo de fluxo total de calor se dá por:

$$\delta Q = \frac{h_c * dA}{c_{pu}} * (h_s - h) \quad (14)$$

Sendo o fluxo de calor sensível trocado pelo ar (Camargo, 2009):

$$\delta Q_s = m_a * c_{pu} * dt \quad (15)$$

Utilizando as equações (15) e (4), tem-se:

$$h_c * dA * (t_s - t) = m_a * c_{pu} * dt \quad (16)$$

Basta agora integrar a expressão:

$$\int_0^A \frac{h_c}{m_a * c_{pu}} dA = \int_{t_2}^{t_1} \frac{dt}{(t_s - t)} \quad (17)$$

Cuja solução, para Camargo (2009) é a seguinte:

$$1 - \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_s} = \exp\left(-\frac{h_c * A}{m_a * c_{pu}}\right) \quad (18)$$

Logo, quando se usa a equação (1) é possível encontrar a equação (3), descrita anteriormente.

Camargo *et al.* (2003) observou então que o aumento da efetividade está relacionado com a combinação de uma grande área de troca de calor com alto coeficiente de troca de calor e baixa vazão de massa, além do fato que para a eficiência se manter constante, são necessárias vazões de massa constante, logo que seja diretamente ou indiretamente, essa variável irá influenciar no valor de eficiência.

Por fim, para saber a temperatura de bulbo seco na saída do RED, basta combinar as equações (2) e (3):

$$TBS_2 = TBS_1 - \left[1 - \exp\left(-\frac{h_c * A}{m_a * c_{pu}}\right)\right](TBS_1 - TBU_1) \quad (19)$$

Todavia, a equação (19), ainda não está totalmente definida e conhecida para sua manipulação de forma direta, visto que o experimento é um protótipo e demanda da continuação de cálculos, para definir em primeiro plano o coeficiente de transferência de calor por convecção (h_c).

Assim, dando início ao equacionamento, serão usados termos e definições tanto de transferência de calor, tal qual transferência de massa. Segundo Çengel (2009), durante os estudos de convecção se normaliza a prática da utilização de números adimensionais, que combinam diversas variáveis de forma a reduzir o número total de variáveis, e o coeficiente de transferência de calor por convecção não foge dessa prática, podendo ser definido pelo Número de Nusselt:

$$N_u = \frac{h_c * L_c}{k} \quad (20)$$

Onde, L_c pode ser definido como comprimento característico e k a condutibilidade térmica do fluido envolvido.

Todavia, como relembra Camargo (2009) a situação atual é uma convecção forçada, ou seja, existe um dispositivo externo forçando/favorecendo essa troca de calor por convecção, no caso do estudo são os ventiladores embutidos no protótipo, e quando ocorre essa situação, o número de Nusselt passa ser função de outros parâmetros também adimensionais, que são: número de Reynolds (Re) e número de Prandtl (Pr):

$$N_u = f(Re, Pr) \quad (21)$$

Assumindo a relação da equação (21), diversos cientistas e estudiosos do assunto puderam partir para métodos empíricos, em busca de deixar a relação mais fiel possível diante diferentes cenários, fluídos, entre outras particularidades.

Assim, Incropera *et al.* (2014) observando que o número de Nusselt possui uma dependência ao número de Reynolds em forma de uma lei de potência, apresenta a seguinte expressão:

$$N_u = C * Re_L^m * Pr^n \quad (22)$$

Como estamos tratando de uma correlação empírica, os expoentes m e n , tal qual o coeficiente C variam com tipo de escoamento e geometria da superfície em questão.

Tomando a equação (22) como base para definição dos estudos, os autores Huan *et al.* (2000), Oliveira (2011), Camargo *et al.* (2003), Carossi (2006) e Castro & Pimenta (2004), afirmam que o número de Nusselt para o painel de celulose, por meio de correlações pode ser definido como:

$$Nu = 0,10 * \left(\frac{L_c}{L}\right)^{0,12} * R_e^{0,8} * P_r^{1/3} \quad (23)$$

Todavia, como dito anteriormente a equação (23) serviu como base para um painel de célula evaporativa de celulose, ou seja, o painel comercial padrão para essas aplicações. Já a situação a ser analisada nesse trabalho de conclusão de curso é um sistema alternativo, onde será assumida a transferência de calor para uma placa plana.

Tendo definido o modelo como uma transferência de calor em placa plana, é necessário agora entender o escoamento externo, se o mesmo é laminar ou turbulento, e essa definição passa pelo número de Reynolds, segundo Incropera *et al.* (2014), Çengel (2009) e ASHRAE (2009) tem-se:

Para Escoamento Laminar:

$$R_e < 5 * 10^5 \quad (24)$$

$$Nu = 0,664 * R_{e_x}^{1/2} * P_r^{1/3}$$

Para Escoamento Turbulento:

$$R_e > 5 * 10^5 \quad (25)$$

$$Nu = 0,0296 * R_{e_x}^{4/5} * P_r^{1/3}$$

Basta agora definir o número de Reynolds e o número de Prandtl para seguimento da modelagem, para isso Incropera *et al.* (2014) diz:

$$R_e = \frac{U * L_c}{\nu} \quad (26)$$

$$P_r = \frac{\nu}{\alpha} \quad (27)$$

Onde, U = velocidade de escoamento do ar na superfície molhada, ν = viscosidade cinemática e α = difusividade térmica.

Vale ainda ressaltar que:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (28)$$

$$\alpha = \frac{k}{1000 * (\rho * c_p)} \quad (29)$$

Na qual, μ é a viscosidade dinâmica.

Por meio de cálculos, verificou-se que o escoamento envolvido no resfriador é menor que 5×10^5 o que caracteriza um escoamento de caráter laminar.

Sendo assim, assumindo um escoamento externo em placa plana, pode-se utilizar da equação (24) para cálculo do número de Nusselt e conseqüentemente o coeficiente de transferência de calor.

Dando seqüência ao trabalho, tendo definido h_c , basta calcular a efetividade do resfriador por meio da equação (3) e posteriormente da temperatura de saída pela equação (2), informando a área de troca de calor e vazão mássica do sistema, o programa pode ser consultado no anexo A do presente trabalho.

Todavia, por meio de cálculos executando a equação (24), percebeu-se que a mesma não pode ser considerada como característica do fenômeno estudado, o que demandou a elaboração de uma nova modelagem matemática.

Para execução da nova modelagem, percebeu-se que o Número de Nusselt e conseqüentemente o coeficiente de transferência de calor, eram muito diferentes quando comparados à situação real que ocorria dentro do resfriador evaporativo, sendo assim, optou-se por retornar à equação base de Nusselt, a equação (22).

Segundo Oliveira (2011) o coeficiente n , relacionado a Prandtl pode ser considerado como n igual a $1/3$, logo basta encontrar C e m .

$$N_u = C * R_{eL}^m * P_r^{1/3} \quad (30)$$

Sendo assim, restaram apenas definir C e m para elaboração do novo equacionamento, para isso, foi utilizada a regressão linear pelo software Microsoft Excel confrontando os dados experimentais.

De forma a garantir uma melhor definição dos coeficientes, tal qual, uma melhor equação da reta, optou-se por seguir Oliveira (2011) e fazer a transformação da equação 24 em formato de log, logo:

$$\log\left(\frac{N_u}{P_r^{1/3}}\right) = \log C + m * \log R_{eL}^m. \quad (31)$$

Foram utilizadas 57 observações experimentais de forma a deixar a massa de dados a mais genérica e característica para definição dos coeficientes. Logo, agora é possível definir os coeficientes m e n respectivamente:

$$m = 0,841 \quad (32)$$

$$C = \text{antilog}(-0,928) \quad (33)$$

$$C = 0,118$$

Com isso, é possível estabelecer a equação característica de Nusselt do resfriador evaporativo de baixo custo, que irá ser executada durante a rotina de cálculo do presente trabalho:

$$N_u = 0,118 * R_{eL}^{0,841} * P_r^{1/3} \quad (34)$$

Tendo definido a equação de Nusselt, se torna possível então calcular o coeficiente de transferência de calor por convecção, por meio da equação (35), que é uma manipulação da equação (20):

$$h_c = \frac{N_u * k}{L_c} \quad (35)$$

Por fim, tendo todas as variáveis e parâmetros definidos e obtidos, é possível então calcular a temperatura de bulbo seco na saída do resfriador evaporativo, por meio da utilização da equação (19), definida anteriormente:

$$TBS_2 = TBS_1 - \left[1 - \exp\left(-\frac{h_c * A}{m_a * c_{pu}}\right)\right](TBS_1 - TBU_1) \quad (36)$$

3.4 Programa Computacional

Tendo definido o equacionamento que rege o experimento estudado, optou-se pela elaboração de linhas de código, de forma a facilitar a execução dos cálculos e deixar os mesmos mais confiáveis, sendo que a figura 30 mostra o fluxograma de cálculo do programa proposto. Vale ressaltar que os programas estão dispostos ao final do trabalho, nos anexos A e B.

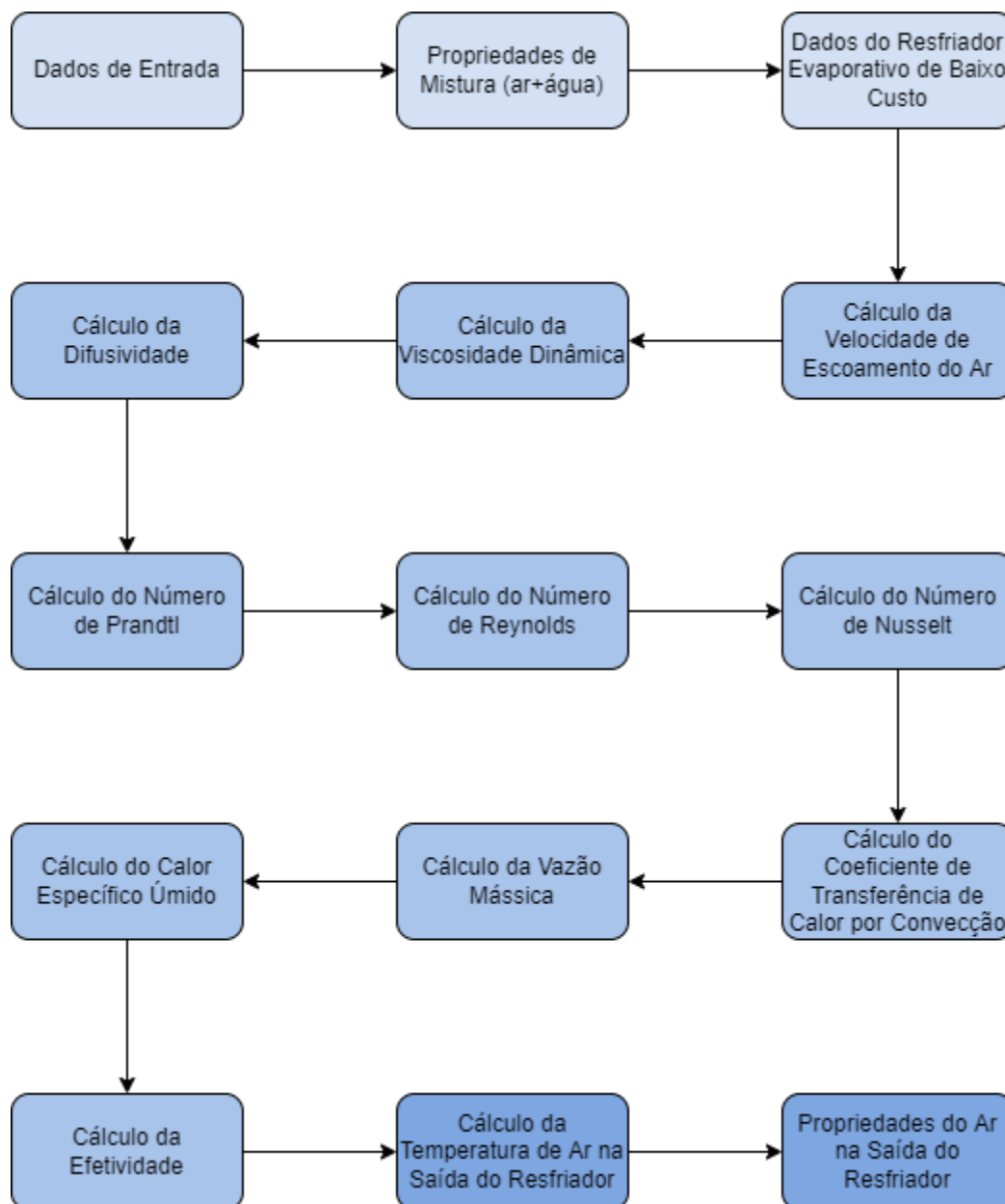


Figura 30: Fluxograma da rotina de cálculo
Fonte: Pesquisa Direta (2021)

Logo, em um primeiro momento, é necessário fornecer alguns dados de entrada da amostra (temperatura de entrada, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e

velocidade de escoamento) para o programa, com esses dados será possível obter as propriedades da mistura de ar mais água, assumida como fluido de trabalho, tal qual fornecer os dados do resfriador de baixo custo (dimensões).

Agora o segundo momento se caracteriza pelo cálculo para obtenção das variáveis da equação (19). Sendo assim, inicialmente, foram calculados a velocidade de escoamento do ar, viscosidade dinâmica, difusividade, número de Prandtl, número de Nusselt, número de Reynolds, coeficiente de transferência de calor por convecção, vazão mássica, calor específico úmido e efetividade.

Por fim, tendo todas as variáveis obtidas, é possível calcular a temperatura de bulbo seco na saída do resfriador evaporativo de baixo custo, tal qual as propriedades do ar resfriado.

3.5 Variáveis e Indicadores

Em termos gerais a variável pode ser explicada como uma classificação ou medida, um conceito operacional que apresenta ou contém valores, entre outros significados. Para transformar um referido valor em variável é necessário adicionar o mesmo em um conceito operacional, sendo esse conceito operacional um objeto, processo, agente e etc. (MARCONI & LAKATOS, 2003).

Já os indicadores podem ser definidos de forma mais breve como instrumentos que irão permitir mensurar e avaliar as modificações na característica de um sistema, podendo ser de diferentes tipos, todavia esses devem ser significativos, válidos e coerentes com análise e situação (DEPONTI *et al.*, 2002).

Na Tabela 3 é possível observar algumas variáveis e indicadores de suma importância dentro deste referido trabalho.

Tabela 3: Variáveis e Indicadores

Variáveis	Indicadores
Modelagem Matemática Resfriador Evaporativo de baixo Custo	Temperatura de Bulbo Seco na saída
	Umidade Relativa de Ar na saída
	Efetividade/Eficácia

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

3.6 Instrumentos de coletas de dados

A coleta de dados se baseia no recolhimento inicial dos dados obtidos no trabalho Estudo Experimental do Desempenho de um Sistema Alternativo de Resfriamento de Ar de Baixo Custo, da Aline de Paula Rafael (2019). A mesma utilizou de um Termo Anemômetro Digital de Fio Quente (Itan-800) para o monitoramento da temperatura e umidade relativa do ar, na entrada e na saída, e da velocidade do ar na saída do resfriador. O monitoramento ocorreu no inverno e primavera no horário entre 12h e 17h, tendo um intervalo médio de 5 minutos entre as medições. Logo, foi possível uma amostragem significativa de como as variáveis mencionados anteriormente se comportam.

3.7 Tabulação de dados

O presente trabalho utilizou o *software* Microsoft Excel, para elaboração de tabelas, gráficos, diferentes cálculos e comparação entre a situação real obtida pelo protótipo e a calculada por meio do equacionamento.

O equacionamento matemático foi implementado em um código computacional desenvolvido no *software Engineering Equation Solver* (EES).

3.8 Considerações finais

Neste capítulo foram discutidas as classificações dos tipos de pesquisa e definido em quais tipos o presente trabalho se encaixa. Além disso, elencou-se as ferramentas e metodologias necessárias para conclusão do estudo, tal qual as variáveis e indicadores relacionados, assim como o modelo matemático a ser utilizado e a forma da coleta de dados e sua tabulação.

4 RESULTADOS

O referido capítulo irá informar em primeiro momento dados básicos para realização da modelagem matemática, explicitada no capítulo anterior, seguidamente da explanação das considerações iniciais, são discutidos os resultados encontrados com a execução da modelagem matemática e por fim, a comparação entre o equacionamento com a situação real do resfriador evaporativo, de forma a confirmar a aplicabilidade dos cálculos e a descrição do fenômeno.

4.1 Considerações iniciais

Primeiramente, para execução dos cálculos quanto a modelagem matemática é necessário fornecer alguns dados, caracterizados como dados de entrada, quanto a esses dados serão calculadas algumas propriedades psicrométricas. Esses dados podem ser observados na tabela 4.

Tabela 4: Dados de entrada para rotina de cálculo

Dados de Entrada para o programa	
Temperatura de Entrada	Tent
Umidade relativa do ar	URe
Pressão atmosférica	p_atm
Velocidade média na saída do tubo	Ut

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

Vale ainda ressaltar, como dito anteriormente, que o experimento trata de um escoamento externo laminar em uma placa plana.

4.2 Resultados

Como dito anteriormente, durante a modelagem matemática, se tornou necessário executar uma regressão linear, com 57 observações experimentais, de forma a calcular tanto o coeficiente C, quanto o expoente m. É possível observar os resultados dessa regressão na tabela 5.

Tabela 5: Resumo dos Resultados

RESUMO DOS
RESULTADOS

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,532569013
R-Quadrado	0,283629754
R-quadrado ajustado	0,27060484
Erro padrão	0,182841736
Observações	57

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	0,727993682	0,727993682	21,77594133	2,00524E-05
Resíduo	55	1,838710524	0,0334311		
Total	56	2,566704206			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Interseção	0,927734694	0,834624942	1,111558795	0,27116336	2,600360454	0,744891066	2,600360454	0,744891066
log (Re)	0,840722019	0,180162315	4,6664699	2,00524E-05	0,479668672	1,201775365	0,479668672	1,201775365

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

Dando continuidade à interpretação da regressão linear, a figura 31 mostra a curva característica da regressão linear, valendo ressaltar que a mesma foi plotada em escala logarítmica.

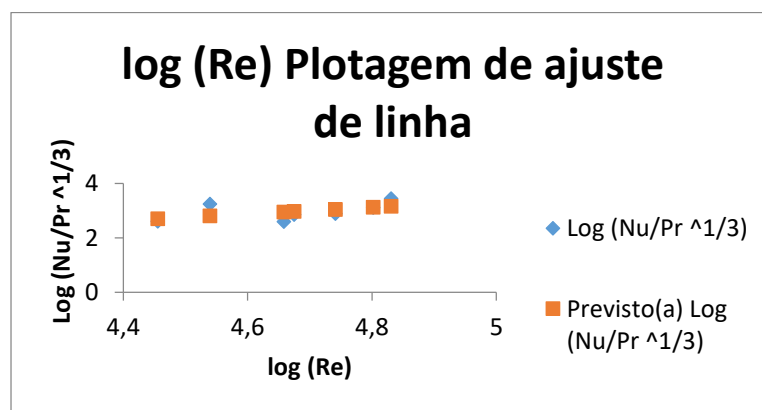


Figura 31: Curva característica da regressão linear

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

De forma a iniciar a discussão quanto aos resultados obtidos por meio das rotinas de cálculo, o programa pode ser observado no Anexo B do trabalho, é possível trazer resultados quanto aos principais indicadores. A tabela 6 apresenta as temperaturas de saída obtidas.

Tabela 6: Temperatura de Saída

Programa Equação Corrigida								
Dados de Entrada				Resultados				
Tent	URe	P	Ut	Nu	Re	Pr	hc	Tsai
24,4	73,9	89,099	2,76	1077	57406	0,748	144,7	22,78
24,1	73	89,099	2,65	1043	55255	0,7475	140	22,42
24	71,8	89,099	2,73	1067	56987	0,7471	143,4	22,64
24,1	71,8	89,099	2,58	1020	53816	0,7472	136,9	22,34
24,2	73	89,099	2,67	1049	55632	0,7476	140,8	22,52
22,1	52,1	89,099	2,26	925,1	48092	0,7415	123,4	19,03
21,8	53,5	89,099	2,2	905,8	46893	0,7416	120,7	18,85
21,2	54,8	89,099	2,19	905,2	46856	0,7417	120,4	18,38
20,3	57	89,099	2,15	895,5	46260	0,7417	118,8	17,69
24,1	78,5	89,099	2,39	955	49747	0,7489	128,3	22,77
28,1	61,9	89,099	1,48	625,2	30091	0,7478	84,96	25,38
27,1	69,9	89,099	1,48	628,1	30218	0,7493	85,11	24,95

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

Sendo assim, observando a tabela 6, fica perceptível a diminuição da temperatura, quando comparados os valores das temperaturas de entrada e de saída, mostrando que a modelagem segue a ideia de condicionamento de ar.

Dando continuidade à apresentação dos resultados, agora são exibidas, por intermédio da tabela 7, a umidade do ar resfriado.

Tabela 7: Resultados da Umidade Relativa do Ar Resfriado

Programa Equação Corrigida								
Dados de Entrada				Resultados				
Tent	URe	P	Ut	Nu	Re	Pr	hc	URs
24,4	73,9	89,099	2,76	1077	57406	0,748	144,7	84,72
24,1	73	89,099	2,65	1043	55255	0,7475	140	84,22
24	71,8	89,099	2,73	1067	56987	0,7471	143,4	83,42
24,1	71,8	89,099	2,58	1020	53816	0,7472	136,9	83,5
24,2	73	89,099	2,67	1049	55632	0,7476	140,8	84,2
22,1	52,1	89,099	2,26	925,1	48092	0,7415	123,4	70,76
21,8	53,5	89,099	2,2	905,8	46893	0,7416	120,7	71,81
21,2	54,8	89,099	2,19	905,2	46856	0,7417	120,4	72,73
20,3	57	89,099	2,15	895,5	46260	0,7417	118,8	74,28
24,1	78,5	89,099	2,39	955	49747	0,7489	128,3	87,72
28,1	61,9	89,099	1,48	625,2	30091	0,7478	84,96	79,17
27,1	69,9	89,099	1,48	628,1	30218	0,7493	85,11	83,16

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

Com isso, analisando de forma conjunta as tabelas 6 e 7, fica explícito o fato de que o equacionamento proposto segue a tese do resfriamento evaporativo direto, ou seja,

ocorre uma diminuição na temperatura do fluido, no caso ar, e um aumento da umidade relativa desse mesmo fluido.

Por fim, a tabela 8 indica a efetividade obtida pela modelagem matemática.

Tabela 8: Resultados da Efetividade

Programa Equação Corrigida								
Dados de Entrada				Resultados				
Tent	UR _e	P	U _t	Nu	Re	Pr	h _c	E
24,4	73,9	89,099	2,76	1077	57406	0,748	144,7	45,57
24,1	73	89,099	2,65	1043	55255	0,7475	140	45,78
24	71,8	89,099	2,73	1067	56987	0,7471	143,4	45,64
24,1	71,8	89,099	2,58	1020	53816	0,7472	136,9	45,93
24,2	73	89,099	2,67	1049	55632	0,7476	140,8	45,74
22,1	52,1	89,099	2,26	925,1	48092	0,7415	123,4	46,69
21,8	53,5	89,099	2,2	905,8	46893	0,7416	120,7	46,82
21,2	54,8	89,099	2,19	905,2	46856	0,7417	120,4	46,93
20,3	57	89,099	2,15	895,5	46260	0,7417	118,8	46,89
24,1	78,5	89,099	2,39	955	49747	0,7489	128,3	46,3
28,1	61,9	89,099	1,48	625,2	30091	0,7478	84,96	49,03
27,1	69,9	89,099	1,48	628,1	30218	0,7493	85,11	48,97

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

Vale ressaltar que os ensaios foram feitos no próprio Laboratório de Sistemas Térmicos da UFOP, ou seja, esperava-se uma menor efetividade como a tabela 8 apresenta, quando comparada aos resfriadores comerciais, visto que Ouro Preto é um local que possui uma alta umidade relativa do ar, o que é um limitante para a tecnologia proposta, ainda mais, quando levado em conta o fato da análise estar centrada em um resfriador evaporativo de baixo custo.

4.3 Comparação dos resultados

Como dito inicialmente, é necessário fazer a validação do modelo proposto com as amostras recolhidas no Estudo Experimental do Desempenho de um Sistema Alternativo de Resfriamento de Ar de Baixo Custo (Rafael, 2019). Para isso comparou-se algumas amostras com as mesmas condições de entrada, para a modelagem inicial e o caso real.

Em primeiro plano, será feita uma comparação entre a temperatura de saída do modelo e a temperatura de saída do experimento, o que pode ser discutido por meio da tabela 9 e figura 32.

Tabela 9: Comparativo entre temperaturas de saída

Programa Equação Corrigida									
Dados de Entrada				Resultados					
Tent	URe	P	Ut	Nu	Re	Pr	hc	Tsai (Ex)	Tsai (Pro)
24,4	73,9	89,099	2,76	1077	57406	0,748	144,7	22,6	22,78
24,1	73	89,099	2,65	1043	55255	0,7475	140	22,7	22,42
24	71,8	89,099	2,73	1067	56987	0,7471	143,4	22,3	22,64
24,1	71,8	89,099	2,58	1020	53816	0,7472	136,9	22,5	22,34
24,2	73	89,099	2,67	1049	55632	0,7476	140,8	22,6	22,52
22,1	52,1	89,099	2,26	925,1	48092	0,7415	123,4	19,1	19,03
21,8	53,5	89,099	2,2	905,8	46893	0,7416	120,7	18,9	18,85
21,2	54,8	89,099	2,19	905,2	46856	0,7417	120,4	18,3	18,38
20,3	57	89,099	2,15	895,5	46260	0,7417	118,8	17,3	17,69
24,1	78,5	89,099	2,39	955	49747	0,7489	128,3	22,8	22,77
28,1	61,9	89,099	1,48	625,2	30091	0,7478	84,96	25	25,38
27,1	69,9	89,099	1,48	628,1	30218	0,7493	85,11	25	24,95

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

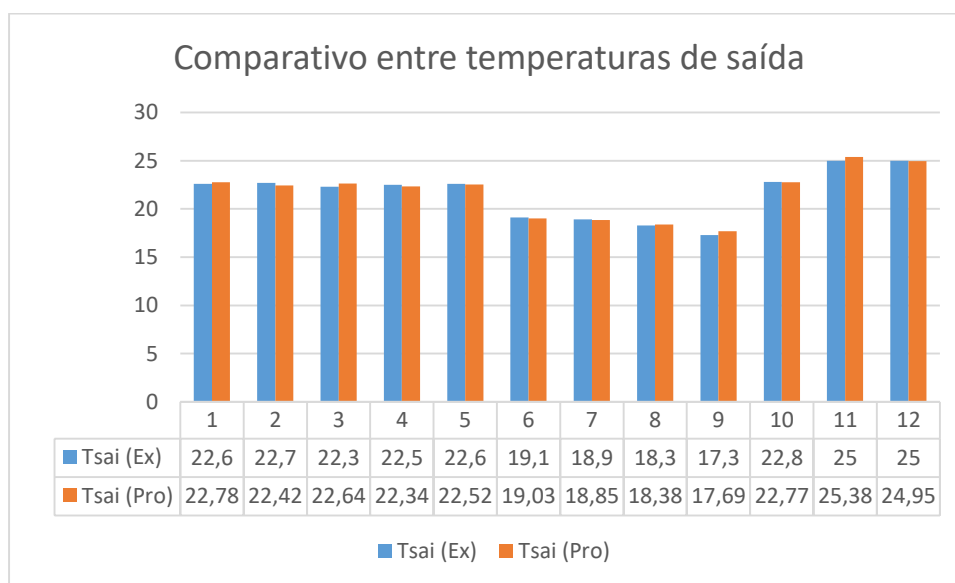


Figura 32: Gráfico comparativo entre as temperaturas de saída

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

Analisando essas informações é possível perceber que o modelo é totalmente aceito quando verificado quanto a temperatura de saída. Portanto, a modelagem converge em valores próximos aos obtidos no experimento. Vale ressaltar que a diferença percentual pode ser observada na tabela 10.

Tabela 10: Diferença percentual de temperatura de saída

Diferença Percentual		
Tsai (Ex)	Tsai (Pro)	Resultado
22,6	22,78	0,8%
22,7	22,42	1,2%
22,3	22,64	1,5%
22,5	22,34	0,7%
22,6	22,52	0,4%
19,1	19,03	0,4%
18,9	18,85	0,3%
18,3	18,38	0,4%
17,3	17,69	2,3%
22,8	22,77	0,1%
25	25,38	1,5%
25	24,95	0,2%
Erro Total Médio		0,8%

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

Como é possível observar pela tabela 10, o equacionamento possui um erro total médio de 0,8% para análise individual da temperatura de saída, mostrando que o equacionamento é satisfatório, quanto a esse parâmetro.

De maneira análoga, agora será analisada a Umidade Relativa de saída, cujos resultados são mostrados na Tabela 11 e na Figura 33.

Tabela 11: Comparativo entre umidade relativa de saída

Programa Equação Corrigida									
Dados de Entrada				Resultados					
Tent	URe	P	Ut	Nu	Re	Pr	hc	URs (Ex)	URs (Pro)
24,4	73,9	89,099	2,76	1077	57406	0,748	144,7	83,2	84,72
24,1	73	89,099	2,65	1043	55255	0,7475	140	81,8	84,22
24	71,8	89,099	2,73	1067	56987	0,7471	143,4	81,3	83,42
24,1	71,8	89,099	2,58	1020	53816	0,7472	136,9	81,3	83,5
24,2	73	89,099	2,67	1049	55632	0,7476	140,8	81,5	84,2
22,1	52,1	89,099	2,26	925,1	48092	0,7415	123,4	69,1	70,76
21,8	53,5	89,099	2,2	905,8	46893	0,7416	120,7	69	71,81
21,2	54,8	89,099	2,19	905,2	46856	0,7417	120,4	70,2	72,73
20,3	57	89,099	2,15	895,5	46260	0,7417	118,8	72,7	74,28
24,1	78,5	89,099	2,39	955	49747	0,7489	128,3	87,5	87,72
28,1	61,9	89,099	1,48	625,2	30091	0,7478	84,96	74,2	79,17
27,1	69,9	89,099	1,48	628,1	30218	0,7493	85,11	77,8	83,16

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

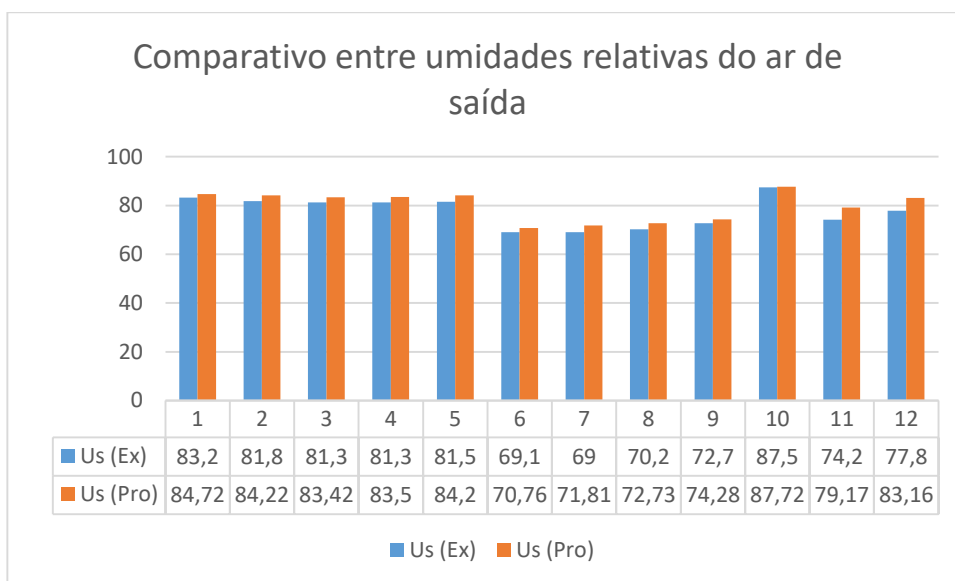


Figura 33: Gráfico comparativo entre umidades relativas de saída
Fonte: Pesquisa Direta (2021)

Tal qual a temperatura, é perceptível, seja pela figura 33 ou tabela 11, que o modelo também se faz válido, quando é analisado de forma individual para a umidade relativa do ar de saída. De forma a corroborar com a análise, tem-se a tabela 12 que destaca a diferença percentual individual de cada amostra.

Tabela 12: Diferença percentual de umidade de saída

Diferença Percentual		
Us (Ex)	Us (Pro)	Resultado
83,2	84,72	1,8%
81,8	84,22	3,0%
81,3	83,42	2,6%
81,3	83,5	2,7%
81,5	84,2	3,3%
69,1	70,76	2,4%
69	71,81	4,1%
70,2	72,73	3,6%
72,7	74,28	2,2%
87,5	87,72	0,3%
74,2	79,17	6,7%
77,8	83,16	6,9%
Erro Total Médio		3,3%

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

Quanto a tabela 12, é possível visualizar, que o erro total médio da análise de umidade relativa do ar de saída é de 3,3%, ou seja, assim como a temperatura de saída, é um erro satisfatório, visto que é situação experimental.

Por fim, será feita a mesma discussão para a efetividade do resfriador evaporativo. O resultado das simulações são mostrados na Tabela 13 e na Figura 34.

Tabela 13: Comparativo entre efetividade

Programa Equação Corrigida									
Dados de Entrada				Resultados					
Tent	URe	P	Ut	Nu	Re	Pr	hc	E (Ex)	E (Pro)
24,4	73,9	89,099	2,76	1077	57406	0,748	144,7	50	45,57
24,1	73	89,099	2,65	1043	55255	0,7475	140	37,8	45,78
24	71,8	89,099	2,73	1067	56987	0,7471	143,4	43,6	45,64
24,1	71,8	89,099	2,58	1020	53816	0,7472	136,9	41	45,93
24,2	73	89,099	2,67	1049	55632	0,7476	140,8	43,2	45,74
22,1	52,1	89,099	2,26	925,1	48092	0,7415	123,4	45,5	46,69
21,8	53,5	89,099	2,2	905,8	46893	0,7416	120,7	45,3	46,82
21,2	54,8	89,099	2,19	905,2	46856	0,7417	120,4	47,5	46,93
20,3	57	89,099	2,15	895,5	46260	0,7417	118,8	53,6	46,89
24,1	78,5	89,099	2,39	955	49747	0,7489	128,3	44,8	46,3
28,1	61,9	89,099	1,48	625,2	30091	0,7478	84,96	52,5	49,03
27,1	69,9	89,099	1,48	628,1	30218	0,7493	85,11	47,7	48,97

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

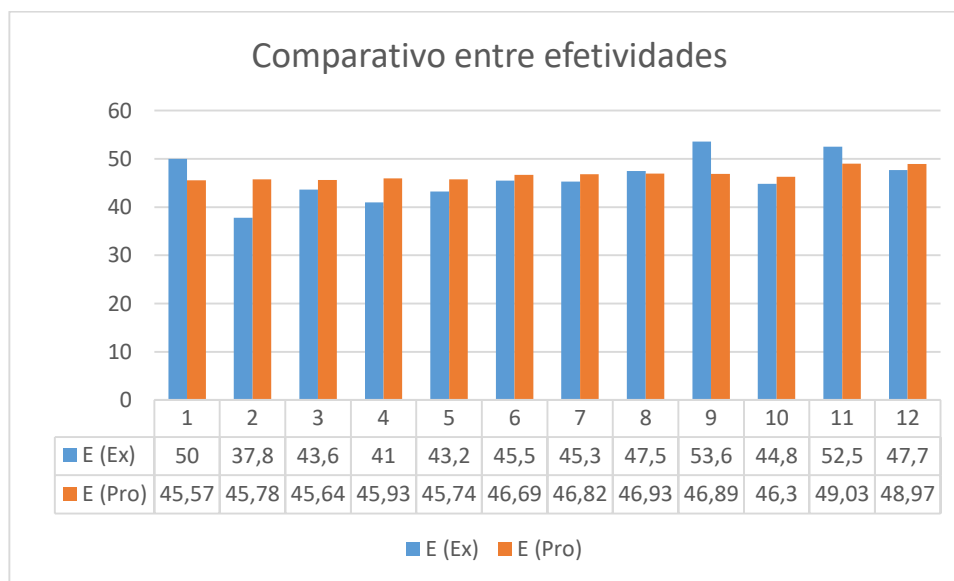


Figura 34: Gráfico comparativo entre efetividades

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

A efetividade apresenta o mesmo comportamento da umidade relativa e temperatura na saída, convergiu de forma satisfatória com o experimento, dando respaldo ao equacionamento/modelo matemático, para isso é possível visualizar a diferença percentual de cada caso na tabela 14.

Tabela 14: Diferença percentual de efetividade

Diferença Percentual		
E (Ex)	E (Pro)	Resultado
50	45,57	8,9%
37,8	45,78	21,1%
43,6	45,64	4,7%
41	45,93	12,0%
43,2	45,74	5,9%
45,5	46,69	2,6%
45,3	46,82	3,4%
47,5	46,93	1,2%
53,6	46,89	12,5%
44,8	46,3	3,3%
52,5	49,03	6,6%
47,7	48,97	2,7%
Erro Total Médio		7,1%

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

Quanto à efetividade, a mesma possui um erro total médio de 7,1%, o que é aceitável devido a situação experimental, tal qual os outros resultados.

O erro total médio envolvido na abordagem é apresentado na tabela 15.

Tabela 15: Erro entre os resultados calculados e experimentais

Erro								
Tsai (Ex)	Tsai (Pro)	Resultado	Us (Ex)	Us (Pro)	Resultado	E (Ex)	E (Pro)	Resultado
22,6	22,78	0,8%	83,2	84,72	1,8%	50	45,57	8,9%
22,7	22,42	1,2%	81,8	84,22	3,0%	37,8	45,78	21,1%
22,3	22,64	1,5%	81,3	83,42	2,6%	43,6	45,64	4,7%
22,5	22,34	0,7%	81,3	83,5	2,7%	41	45,93	12,0%
22,6	22,52	0,4%	81,5	84,2	3,3%	43,2	45,74	5,9%
19,1	19,03	0,4%	69,1	70,76	2,4%	45,5	46,69	2,6%
18,9	18,85	0,3%	69	71,81	4,1%	45,3	46,82	3,4%
18,3	18,38	0,4%	70,2	72,73	3,6%	47,5	46,93	1,2%
17,3	17,69	2,3%	72,7	74,28	2,2%	53,6	46,89	12,5%
22,8	22,77	0,1%	87,5	87,72	0,3%	44,8	46,3	3,3%
25	25,38	1,5%	74,2	79,17	6,7%	52,5	49,03	6,6%
25	24,95	0,2%	77,8	83,16	6,9%	47,7	48,97	2,7%
Erro Total Médio		0,8%	Erro Total Médio		3,3%	Erro Total Médio		7,1%

Fonte: Pesquisa Direta (2021)

Analisando a tabela 15, fica perceptível que o maior erro advém da efetividade, visto que o mesmo é um erro médio 7,1%, enquanto isso, o menor erro fica para a temperatura de saída, logo que a mesma possui um erro médio de 0,8%.

Os valores calculados e seus respectivos erros médios confirmam valores satisfatórios e a validade do equacionamento proposto.

5 CONCLUSÃO

Neste capítulo trata-se de finalizar o estudo proposto inicialmente com base nos resultados experimentais anteriores e suas relações com o apresentado sobre o resfriador evaporativo simulado. Vale ressaltar que são discutidos/apresentados projetos futuros que buscam melhorar a qualidade do trabalho em questão.

5.1 Conclusão

O presente trabalho teve como pressuposto inicial definir uma modelagem matemática correspondente a um resfriador evaporativo de baixo custo já existente, buscando explicar e caracterizar os fenômenos que ocorrem no mesmo, com foco na transferência de calor.

Primeiramente foi possível perceber que o modelo segue os princípios de um resfriador evaporativo direto, que é a refrigeração de um fluido, no caso o ar ambiente, tendo como fluido de trabalho utilizado a água presente nos canais dos tijolos e um aumento da umidade relativa do ar.

Os resultados permitiram perceber que a modelagem pode ser considerada bastante satisfatória, quanto as amostras escolhidas, visto que foi feito uma regressão linear com base em 57 amostras anteriormente feitas e prescritas.

Concluiu-se também, que a temperatura de saída, que pode ser considerada como parâmetro mais importante, dentro de toda análise, obteve um resultado particularmente muito satisfatório dentro do observado escolhido, dando respaldo a modelagem feita e suas rotinas de cálculos.

Eventuais erros se devem inicialmente pela necessidade do uso de regressão linear para encontrar os coeficientes da equação de Nusselt, onde não se obteve um R^2 tão confiável, o que não permitiu o seu uso para todas as amostras do trabalho.

Deve-se lembrar também, que a velocidade trabalhada dentro da modelagem, foi uma velocidade média, que pode ser considerada alta para a realidade, visto que estamos em um escoamento de camada limite, sendo assim, perto da superfície de troca de calor, essa velocidade seria menor do que a usada como dado de entrada.

Vale ressaltar o fato do estabelecimento entre a relação experimento e teoria, que nem sempre tende a ser fácil e direto, demandando normalmente diferentes estudos e esforços para sua realização.

Tendo ressalvado todos esses pontos, é possível entender que a modelagem proposta é um embasamento inicial para o estudo da simulação do resfriador evaporativo de baixo custo, visto que não havia coeficientes estabelecidos pela literatura quanto à situação envolvida e mesmo assim a modelagem convergiu satisfatoriamente para o universo proposto no respectivo trabalho.

Em linhas gerais, o trabalho em questão, traz benefícios quanto ao experimento anteriormente proposto, e o estabelecimento de seus coeficientes de forma inicial, o que tende a ser a base para projetos e estudos futuros quanto ao protótipo em questão, ou novos, que sigam o mesmo sistema.

5.2 Recomendações

Quanto as recomendações futuras podem-se estabelecer algumas:

- Realizações de mais experimentos, de forma a comparar os resultados obtidos pela nova modelagem com o experimento, aumentando o número de observações e confiabilidade;
- Otimização da regressão linear, por meio da comparação da regressão atual com os novos dados obtidos, ou até mesmo um novo equacionamento;
- Criação de uma modelagem seguindo apenas a transferência de calor, mas de forma convencional, utilizando a modelagem da transferência em dutos;
- Projetar e construir um novo resfriador evaporativo, esse com maiores dimensões, para um melhor estudo e comparação de suas efetividades;
- Análise quanto a transferência de massa, utilizando o número de Sherwood, de forma a definir e explicar ainda mais o fenômeno e enriquecer a atual modelagem;
- Revisão do atual protótipo, quanto a seus equipamentos, de forma a trazer maior confiabilidade para os dados;

- Elaboração do equacionamento de forma iterativa, calculando a temperatura intermediária do processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

ARAÚJO, Ismael Nickson Pinto de. **Desenvolvimento de sistema auxiliar de resfriamento evaporativo, para arrefecimento de transformadores de força.** 2016.

ASHRAE. **ASHRAE Handbook: Fundamentals.** I-P. ed. [S.l.]: [s.n.], 2009.

ASHRAE. **Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications.** 2007.

CAMARGO, J. R. **Resfriamento evaporativo: Climatização ecológica.** Rio de Janeiro: Editora Moderna, 2009.

CAMARGO, J. R.; EBINUMA, C. D.; CARDOSO, S. **A mathematical model for direct evaporative cooling air conditioning system.** Revista de Engenharia Térmica, v. 2, n. 2, p. 30-34, 2003.

CAMARGO, José Rui. **Sistemas de resfriamento evaporativo-adsortivo aplicados ao condicionamento de ar.** 2003.

CAMARGO, José Rui; EBINUMA, C. D. **Resfriamento evaporativo: poupando a energia e o meio ambiente.** Revista de ciências exatas, v. 10, n. 2, p. 69-75, 2004.

CAMARGO, José Rui; EBINUMA, C. D. **Resfriamento evaporativo: poupando a energia e o meio ambiente.** Revista ciências exatas, Taubaté, v. 9, p. 10, 2001.

CAROSI, Gilmar de Assis Borges. **Resfriamento evaporativo: estudo do potencial de sua aplicação no Brasil.** 2006.

CASTRO, W. P.; PIMENTA, João MD. **Aplicação de sistemas de resfriamento evaporativo em Brasília: casos de estudo.** Revista Tecnologia, [S. l.], v. 24, n. 2, 2009.

CASTRO, W. P.; PIMENTA, João MD. **Modelagem e simulação de painéis evaporativos diretos.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas. 2004.

COSTA, Helisângela Ramos. **A modelagem matemática através de conceitos científicos.** Ciências & Cognição, v. 14, n. 3, p. 114-133, 2009.

DA FONSECA, João José Saraiva. **Apostila de metodologia da pesquisa científica.** João José Saraiva da Fonseca, 2002.

DE LUNA, Sergio Vasconcelos. **Planejamento de Pesquisa.** São Paulo: EDUC, 1998.

DE PESQUISA ENERGÉTICA, Empresa. **Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética.** Nota Técnica EPE 030, 2018.

DEPONTI, Cidonea Machado; ECKERT, Córdula; AZAMBUJA, JLB de. **Estratégia para construção de indicadores para avaliação da sustentabilidade e monitoramento de sistemas.** Agroecologia e desenvolvimento rural sustentável, v. 3, n. 4, p. 44-52, 2002.

FONSECA, André Luiz Amorim da et al. **Análise do uso de conversor de frequência na ventilação forçada de sistemas de resfriamento evaporativo visando à eficiência energética.** 2012.

FONTES, Assis Oliveira. **ANÁLISE DE VIABILIDADE DA APLICAÇÃO DO RESFRIAMENTO EVAPORATIVO NO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE.**

FROTA, Anésia Barros; SCHIFFER, Sueli Terezinha Ramos. **Manual de conforto térmico.** Studio Nobel, 2001.

GARLET, Liége; CUNHA, Eduardo Grala; SANTOS, Joaquim C. Pizzutti. **USO DO RESFRIAMENTO EVAPORATIVO EM CLIMAS ÚMIDOS: ESTUDO DE CASO EM PAVILHÃO INDUSTRIAL NA CIDADE DE SANTA MARIA/RS1.**

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa.** São Paulo: Atlas, 2002.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** 6. ed. Editora Atlas SA, 2008.

GOVERNO DO BRASIL. **Uso de fontes renováveis é três vezes maior que o mundial. 2020.** Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/07/uso-de-fontes-renovaveis-no-brasil-e-tres-vezes-maior-que-o-mundial>.

IBRAHIM, Thamir K.; RAHMAN, M. M.; ABDALLA, Ahmed N. **Improvement of gas turbine performance based on inlet air cooling systems: A technical review.** International journal of physical sciences, v. 6, n. 4, p. 620-627, 2011.

JABARDO, José Maria Sáiz; STOECKER, Wilbert F. **Refrigeração industrial.** Editora Blucher, 2002.

KACHHWAHA, S. S.; PRABHAKAR, Suhas. **Heat and mass transfer study in a direct evaporative cooler.** 2010.

KRETSCHMER, Augusto; GEREMIA, Guilherme; RANZI, Mateus Forenzi. **PROJETO EXPERIMENTAL DE RESFRIADOR EVAPORATIVO.**

LOTTI, Luisa Botelho; RUSSO, Marcelo Iamarino Fernandes; BACCI, Murilo Del Nero; PRADO, Natália Freire Firmo. **Substituição dos aparelhos de ar-condicionado por resfriadores evaporativos na Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.** Revista Ciências do Ambiente On-Line, v. 2, n. 2, 2006.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica.** 5. ed.-São Paulo: Atlas, 2003.

MASIERO, Erico; OLIVEIRA, Djanny Klismara; COSTA, Orlando Pereira da; VECCHIA, Francisco Arthur da Silva. **Estudo experimental de condicionamento ambiental com resfriamento evaporativo direto.** Ambiente Construído, v. 20, n. 2, p. 151-173, 2020.

MOLION, Luiz Carlos Baldicero. **Aquecimento global: uma visão crítica.** Revista brasileira de climatologia, v. 3, 2008.

OLIVEIRA, R. S. **Análise experimental e numérica da eficiência de resfriamento de painéis de fibras vegetais utilizados em sistemas de resfriamento evaporativo.** Recife: O Autor, 2011.

PRAÇA, Fabíola Silva Garcia. **Metodologia da pesquisa científica: organização estrutural e os desafios para redigir o trabalho de conclusão.** Revista Eletrônica "Diálogos Acadêmicos, v. 8, n. 1, p. 72-87, 2015.

RAFAEL, Aline de Paula. **Estudo experimental do desempenho de um sistema alternativo de resfriamento de ar de baixo custo.** 2019.

ROSA, José Francisco Vilela. **Avaliação de painéis porosos constituídos de argila expandida em sistemas de resfriamento adiabático evaporativo.** 2009.

SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação.** 2001.

UNIVERSITY OF EAST ANGLIA. **ClimaticResearch Unit.** 2021. Disponível em:<https://sites.uea.ac.uk/cru/>.

UREÑA, Gerardo Antero Barba; GARCIA, Ezio Castejon; SABOYA, Sergio Mourão.
**ETAPAS CONSTRUTIVAS DE UM PROTÓTIPO DE UM RESFRIADOR
EVAPORATIVO.**

WU, J. M.; HUANG, X.; ZHANG, H. **Theoretical analysis on heat and mass transfer
in a direct evaporative cooler.** Applied Thermal Engineering, v. 29, n. 5-6, p. 980-984,
2009.

ANEXO A

Programa de cálculo teórico

Quanto ao programa de cálculo as variáveis são: o coeficiente de transferência de calor por convecção, área de passagem do ar em contato com a superfície úmida, vazão mássica e calor específico úmido, sendo que o objetivo é calcular os parâmetros de saída: temperatura de saída do ar, umidade relativa de saída do ar e efetividade do resfriador evaporativo.

"Programa de cálculo teórico para um resfriador evaporativo de baixo custo"

"DADOS DE ENTRADA"

Tent=28,2 "°C" "Temperatura do ambiente"

URe=0,589 "Umidade relativa do ambiente"

p_atm=89,099 "kPa" "Pressão atmosférica local"

Ut=2,64 "m/s" "Velocidade média na saída do tubo de 10 cm de diâmetro"

"PROPRIEDADES DA MISTURA AR+ÀGUA"

mu=Viscosity(AirH2O;T=Tent;p=p_atm;R=URe)

rho=Density(AirH2O;T=Tent;p=p_atm;R=URe)

k=Conductivity(AirH2O;T=Tent;p=p_atm;R=URe)

cp1=Cp(AirH2O;T=Tent;p=p_atm;R=URe)

cp= cp1*10³

cpa1=Cp(Air;T=Tent)

cpa= cpa1 *10³

cpv1=Cp(Steam;T=Tent;p=p_atm)

cpv=cpv1*10³

we=HumRat(AirH2O;T=Tent;R=URe; p=p_atm)

he=Enthalpy(AirH2O;T=Tent;R=URe; p=p_atm)

Tpoe=DewPoint(AirH2O;T=Tent;R=URe;p=p_atm) "Temperatura do ponto de orvalho"

$se = \text{Entropy}(\text{AirH}_2\text{O}; T = T_{\text{ent}}; R = U_{\text{re}}; p = p_{\text{atm}})$

"DADOS DO SISTEMA EVAPORATIVO"

$A_t = 7,854 \times 10^{-3} \text{ [m}^2\text{]}$ "Área do tubo de saída do ar resfriado"

$L_{1c} = 0,03 \text{ [m]}$ "Largura de um furo do tijolo"

$L_{2c} = 0,033 \text{ [m]}$ "Altura de um furo do tijolo"

$L_c = 0,19 \text{ [m]}$ "Comprimento característico do tijolo/painel evaporativo"

" _____ "

"CÁLCULO DA VELOCIDADE DE ESCOAMENTO DO AR"

$V_{\text{sai}} = U_t \cdot A_t \text{ [m}^3\text{/s]}$ "Vazão de ar resfriado na saída do tubo"

$A_{1c} = 2 \cdot (L_{1c} \cdot L_c + L_{2c} \cdot L_c) \text{ [m}^2\text{]}$ "Área lateral de 1 canal de passagem de ar"

$A_c = 4 \cdot A_{1c} \text{ [m}^2\text{]}$ "Área de passagem do ar em contato com a superfície úmida - 4 canais"

$V_{\text{ent}} = V_{\text{sai}} \text{ [m}^3\text{/s]}$ "Vazão na entrada igual à vazão na saída - deve ser vazão mássica"

$U_{\text{ent}} = V_{\text{ent}} / A_{\text{strc}} \text{ [m/s]}$ "Velocidade de entrada"

$V_{1c} = V_{\text{ent}} / 4 \text{ [m}^3\text{/s]}$ "Vazão em um canal"

$A_{\text{strc}1} = (L_{1c} \cdot L_{2c}) \text{ [m}^2\text{]}$ "Área de escoamento do canal na seção transversal"

$A_{\text{strc}} = 4 \cdot A_{\text{strc}1} \text{ [m}^2\text{]}$ "Área total da seção transversal"

$U_{m1c} = V_{1c} / A_{\text{strc}1} \text{ [m/s]}$ "Velocidade média de escoamento do ar em um canal"

"CÁLCULO DA VISCOSIDADE CINEMÁTICA"

$\nu = \mu / \rho$

"CÁLCULO DA DIFUSIVIDADE"

$\alpha = (k) / (\rho \cdot c_p)$

"CÁLCULO DO NÚMERO DE PRANDTL"

$Pr = \nu / \alpha$

"CÁLCULO DO NÚMERO DE REYNOLDS"

$$Re=(Um1c*Lc)/ni$$

"CÁLCULO DE NÚMERO NUSSSELT"

$$NUS=0,664*(Re^{0,5})*(Pr^{(1/3)})$$

"CÁLCULO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO"

$$hc=NUS*k/Lc$$

" CÁLCULO DA VAZÃO MÁSSICA"

$$ma=Vent*\rho$$

"CÁLCULO DO CALOR ESPECÍFICO ÚMIDO"

$$cpu= cpa + (we*cpv)$$

"EFETIVIDADE"

$$E=1-\exp((-hc*Ac)/(ma*cpu))$$

"TEMPERATURA DE BULBO ÚMIDO NA ENTRADA: FUNÇÃO DE TENT, URE, PATM"

$$Tbue=WetBulb(AirH2O;T=Tent;p=p_atm;R=Ure)$$

" _____ "

"TEMPERATURA DO AR NA SAÍDA DO RESFRIADOR"

$$Tsai=Tent-E*(Tent-Tbue)$$

"PROPRIEDADES DO AR NA SAÍDA "

$$Tbus=Tbue$$

$$hs=he$$

$$ws=HumRat(AirH2O;T=Tsai;p=p_atm;h=hs)$$

$$URs=RelHum(AirH2O;T=Tsai;p=p_atm;h=hs)$$

$$\rho s=Density(AirH2O;T=Tsai;p=p_atm;R=URs)$$

$$Tpos=DewPoint(AirH2O;T=Tsai;R=URs;p=p_atm)$$

$$ss=Entropy(AirH2O;T=Tsai;p=p_atm;R=URs)$$

ANEXO B

Programa de cálculo com a equação de Nusselt corrigida

Quanto ao programa de cálculo as variáveis são: o coeficiente de transferência de calor por convecção, área de passagem do ar em contato com a superfície úmida, vazão mássica e calor específico úmido, e o objetivo é calcular os parâmetros de saída: temperatura de saída do ar, umidade relativa de saída do ar e efetividade.

"Programa de cálculo com equação corrigida para um resfriador evaporativo de baixo custo"

"DADOS DE ENTRADA"

Tent=28,2 "°C" "Temperatura do ambiente"

URe=0,589 "Umidade relativa do ambiente"

p_atm=89,099 "kPa" "Pressão atmosférica local"

Ut=2,64 "m/s" "Velocidade média na saída do tubo de 10 cm de diâmetro"

"PROPRIEDADES DA MISTURA AR+ÁGUA"

mu=Viscosity(AirH2O;T=Tent;p=p_atm;R=URe)

rho=Density(AirH2O;T=Tent;p=p_atm;R=URe)

k=Conductivity(AirH2O;T=Tent;p=p_atm;R=URe)

cp1=Cp(AirH2O;T=Tent;p=p_atm;R=URe)

cp= cp1*10³

cpa1=Cp(Air;T=Tent)

cpa= cpa1 *10³

cpv1=Cp(Steam;T=Tent;p=p_atm)

cpv=cpv1*10³

we=HumRat(AirH2O;T=Tent;R=URe; p=p_atm)

he=Enthalpy(AirH2O;T=Tent;R=URe; p=p_atm)

Tpoe=DewPoint(AirH2O;T=Tent;R=URe;p=p_atm) "Temperatura do ponto de orvalho"

$se=Entropy(AirH2O;T=Tent;R=Ure;p=p_atm)$

"DADOS DO SISTEMA EVAPORATIVO"

$At=7,854e-3$ "[m²]" "Área do tubo de saída do ar resfriador"

$L1c=0,03$ "[m]" "Largura de um furo do tijolo"

$L2c=0,033$ "[m]" "Altura de um furo do tijolo"

$Lc=0,19$ "[m]" "Comprimento característico do tijolo/painel evaporativo"

" _____ "

"CÁLCULO DA VELOCIDADE DE ESCOAMENTO DO AR"

$Vsai=Ut*At$ "[m³/s]" "Vazão de ar resfriado na saída do tubo"

$A1c=2*(L1c*Lc+L2c*Lc)$ "[m²]" "Área lateral de 1 canal de passagem de ar"

$Ac=4*A1c$ "[m²]" "Área de passagem do ar em contato com a superfície úmida - 4 canais"

$Vent=Vsai$ "[m³/s]" "Vazão na entrada igual à vazão na saída - deve ser vazão mássica"

$Uent=Vent/Astrc$ "[m/s]" "Velocidade de entrada"

$V1c=Vent/4$ "[m³/s]" "Vazão em um canal"

$Astrc1=(L1c*L2c)$ "[m²]" "Área de escoamento do canal na seção transversal"

$Astrc=4*Astrc1$ "[m²]" "Área total da seção transversal"

$Um1c=V1c/Astrc1$ "[m/s]" "Velocidade média de escoamento do ar em um canal"

"CÁLCULO DA VISCOSIDADE CINEMÁTICA"

$ni=mu/rho$

"CÁLCULO DA DIFUSIVIDADE"

$alfa=(k)/(rho*cp)$

"CÁLCULO DO NÚMERO DE PRANDTL"

$Pr=ni/alfa$

"CÁLCULO DO NÚMERO DE REYNOLDS"

$Re=(Um1c*Lc)/ni$

"CÁLCULO DE NÚMERO NUSSOLT"

$$NUS=0,118*(Re^{0,841})*(Pr^{1/3})$$

"CÁLCULO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO"

$$hc=NUS*k/Lc$$

" CÁLCULO DA VAZÃO MÁSSICA"

$$ma=Vent*\rho$$

"CÁLCULO DO CALOR ESPECÍFICO ÚMIDO"

$$cpu= cpa + (we*cpv)$$

"EFETIVIDADE"

$$E=1-\exp((-hc*Ac)/(ma*cpu))$$

"TEMPERATURA DE BULBO ÚMIDO NA ENTRADA: FUNÇÃO DE TENT, URE, PATM"

$$Tbue=WetBulb(AirH2O;T=Tent;p=p_atm;R=Ure)$$

"TEMPERATURA DO AR NA SAÍDA DO RESFRIADOR"

$$Tsai=Tent-E*(Tent-Tbue)$$

"PROPRIEDADES DO AR NA SAÍDA"

$$Tbus=Tbue$$

$$hs=he$$

$$ws=HumRat(AirH2O;T=Tsai;p=p_atm;h=hs)$$

$$URs=RelHum(AirH2O;T=Tsai;p=p_atm;h=hs)$$

$$\rho s=Density(AirH2O;T=Tsai;p=p_atm;R=URs)$$

$$Tpos=DewPoint(AirH2O;T=Tsai;R=URs;p=p_atm)$$

$$ss=Entropy(AirH2O;T=Tsai;p=p_atm;R=URs)$$