

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Arthur Pacheco Luz

**ESTUDO EXPERIMENTAL E MODELO SEMIEMPÍRICO DE UMA VÁLVULA DE
EXPANSÃO TERMOSTÁTICA DE UMA BOMBA DE CALOR SOLAR A R290**

Belo Horizonte

2023

Arthur Pacheco Luz

**ESTUDO EXPERIMENTAL E MODELO SEMIEMPÍRICO DE UMA VÁLVULA DE
EXPANSÃO TERMOSTÁTICA DE UMA BOMBA DE CALOR SOLAR A R290**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Linha de pesquisa: Energia e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Machado

Coorientador: Prof. Dr. Willian Moreira Duarte

Belo Horizonte

2023

L979e

Luz, Arthur Pacheco.

Estudo experimental e modelo semiempírico de uma válvula de expansão termostática de uma bomba de calor solar a R290 [recurso eletrônico] / Arthur Pacheco Luz. - 2023.

1 recurso online (68 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Luiz Machado.

Coorientador: Willian Moreira Duarte.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 65-68.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2.. Sustentabilidade - Teses.
3. Energia - Teses. 4. Bombas de calor - Teses. 5. Refrigeração - Teses.
6. Calor solar - Teses. I. Machado, Luiz. II. Duarte, Willian Moreira.
III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.
IV. Título.

CDU: 621 (043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

**“ESTUDO EXPERIMENTAL E MODELO SEMIEMPÍRICO DE UMA VÁLVULA DE
EXPANSÃO TERMOSTÁTICA DE UMA BOMBA DE CALOR SOLAR À R290”**

ARTHUR PACHECO LUZ

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dr. Luiz Machado (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Willian Moreira Duarte (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr^a. Cristiana Brasil Maia (Departamento de Engenharia Mecânica/PUC Minas) e Dr. Tiago de Freitas Paulino (Departamento de Engenharia de Materiais/CEFET), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **"Mestre em Engenharia Mecânica"**, na área de concentração de **"Energia e Sustentabilidade"**.

Dissertação aprovada no dia 20 de dezembro de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Machado, Decano(a)**, em 08/01/2024, às 12:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Willian Moreira Duarte, Professor do Magistério Superior**, em 09/01/2024, às 10:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cristiana Brasil Maia, Usuário Externo**, em 10/01/2024, às 17:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Tiago de Freitas Paulino, Usuário Externo**, em 24/01/2024, às 08:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2938849** e o código CRC **77509E35**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família por todo o suporte dado nessa trajetória, em especial a Simone, minha mãe, que sempre fez questão de deixar claro o quanto sou capaz. De forma não menos importante, agradeço também a Maryane, companheira, amiga e dona de todo meu amor, por sempre estar ao meu lado e me fornecer apoio emocional em todos os momentos, sem você seria impossível alcançar a conclusão deste trabalho.

Faço um agradecimento muito especial ao meu amigo e orientador professor Doutor Luiz Machado, a quem devo profunda gratidão por todos os ensinamentos, sejam eles técnicos ou no âmbito pessoal. O senhor fez parte de uma profunda evolução pessoal a qual serei eternamente grato. Agradeço também a todos da UFMG que de alguma forma participaram deste processo, ao corpo docente ao qual tive acesso e pude aprender muito e a toda a equipe do GREA, que me acolheu e possibilitou a execução do trabalho, em especial ao Doutor Hélio Diniz, que, por um longo período, foi meu companheiro de trabalho.

Meus agradecimentos à empresa Tuma Industrial, pelo desenvolvimento e viabilização do projeto, por todo o suporte técnico e financeiro. Agradeço à UFMG, especialmente, ao Programa de Pós-Graduação da Engenharia Mecânica (PPGMEC) e ao Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC), faço aqui uma menção especial à Marina, membro da secretaria acadêmica e que auxiliou e viabilizou de várias formas a conclusão deste trabalho, obrigado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) que possibilitou a execução da pesquisa através do programa de apoio a projetos de pesquisa científica, tecnológica e de inovação, a estes órgãos meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

O dispositivo de expansão é um componente crítico para o funcionamento de bombas de calor e máquinas de refrigeração, e seu estudo é parte fundamental do desenvolvimento de melhorias nas áreas de refrigeração e aquecimento. Dentre os diversos tipos de dispositivos de expansão existentes, a válvula de expansão termostática (VET) destaca-se pelo seu rápido tempo de resposta e por ser um componente puramente mecânico com alta capacidade no controle do grau de superaquecimento do fluido refrigerante. Diante disso, foi desenvolvido um modelo matemático semiempírico para uma VET instalada em uma bomba de calor assistida por energia solar com expansão direta (DX-SAHP) que opera com fluido R290 (Propano). O trabalho de pesquisa desenvolvido teve uma abordagem experimental e, para isso, foi utilizada uma DX-SAHP instrumentada. Durante os experimentos, vários modos de operação da bomba de calor foram testados para aquecimento de água. Os testes foram realizados sob o efeito de diferentes intensidades de irradiação solar, *outdoor*, e sem o efeito da irradiação, *indoor*. Os parâmetros operacionais do equipamento foram coletados seguindo uma única metodologia e, ao final do estudo, 150 experimentos foram realizados e criticamente analisados. O desenvolvimento do modelo semiempírico baseou-se na combinação da equação base existente na literatura, que descreve o funcionamento da VET, e na concepção de uma equação através do método de regressão múltipla linear de parâmetros avaliados durante os experimentos, tais como: incidência de irradiação solar, pressões de entrada e saída do componente e grau de superaquecimento. Como resultado, obteve-se uma regressão linear múltipla com ajuste superior a 96%. Essa regressão foi combinada à equação base, seguindo o que foi apresentado por trabalhos da literatura especializada, chegando-se a um modelo que mostrou um ajuste superior a 94%. Concluiu-se que o modelo semiempírico gerado apresenta bom desempenho na predição da vazão mássica do sistema, mesmo sob efeito de diferentes condições de irradiação solar. O modelo também pode ser usado para compor o modelo global da DX-SAHP estudada.

Palavras-chave: vet; dx-sahp; modelo semiempírico; regressão múltipla linear; r290.

ABSTRACT

The expansion device is a critical component for heat pump and refrigeration machines operation, its study is a fundamental part of the development of improvements in refrigeration and heating areas. Among the various types of expansion devices, the Thermostatic Expansion Valve (TEV) stands out for its fast response time and to being a purely mechanical component with high capacity in controlling the degree of refrigerant superheating. A semiempirical mathematical model was developed for a TEV installed in a Direct Expansion Solar-Assisted Heat Pump (DX-SAHP) operating with R290 (Propane). The research work was experimental and for this purpose an instrumented DX-SAHP was used. During the experiments, various operating modes of the heat pump were tested for water heating. The tests were performed under the influence of different solar irradiation intensities, outdoor, and without the effect of irradiation, indoor. The operational parameters of the equipment were collected following a single methodology, and at the end of the study, 150 experiments were conducted. The development of the semiempirical model was based on the combination of the base equation existing in the literature, which describes the operation of the TEV, and the conception of an equation through the method of multiple linear regression of parameters evaluated during the experiments, such as solar irradiation incidence, component inlet and outlet pressures, and degree of superheating. As a result, a multiple linear regression with an adjustment higher than 96% was obtained. This regression was combined with the base equation, following what was presented by works in the specialized literature, resulting in a model that showed an adjustment higher than 94%. It was concluded that the semiempirical model performs well in predicting the mass flow rate of the system, even under the influence of different solar irradiation conditions. The model can also be used to compose the overall model of the studied DX-SAHP.

Keywords: tev; dx-sahp; semiempirical model; multiple linear regression; r290.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1. Diagrama P-h de um ciclo ideal.....	20
FIGURA 2. Diferenças entre os ciclos teórico e real.	21
FIGURA 3. Ciclo DX-SAHP.	23
FIGURA 4. Válvula de expansão termostática (representação).....	26
FIGURA 5. Protótipo utilizado no estudo - BDC R290.....	36
FIGURA 6. Vista em CAD da lateral esquerda do protótipo.....	36
FIGURA 7. Vista em CAD da lateral direita do protótipo.....	37
FIGURA 8. Reservatório térmico em CAD..	37
FIGURA 9. Condensador coaxial, projeto em CAD.	38
FIGURA 10. Vista de cima CAD, apresentação parcial dos componentes BDC R290.....	38
FIGURA 11. Diagrama do ciclo de compressão com equipamentos e componentes.	40
FIGURA 12. Configuração simplificada utilizada para execução dos experimentos.	41
FIGURA 13. Visão dos componentes internos de uma VET.....	42
FIGURA 14. Válvula de expansão termostática utilizada no protótipo.	42
FIGURA 15. Informações de fábrica contidas no topo da VET.	43
FIGURA 16. Distribuição dos experimentos realizados por presença de irradiação.	44
FIGURA 17. Número de experimentos por grupo de nível de irradiação solar medida.	44
FIGURA 18. Distribuição dos experimentos por grupo de grau de superaquecimento.....	45
FIGURA 19. Número de experimentos por grupo de voltas de abertura da VET.	45
FIGURA 20. (a) Termopar Tipo K (b) Manômetro de Bourdon EOS 15 bar (c) Manômetro de Bourdon EOS 35 kgf/cm ²	47
FIGURA 21. (a) Transdutor de pressão FUELTECH (b) Wattímetro digital (c) Rotâmetro...47	47
FIGURA 22. (a) Medidor de vazão de refrigerante Contech (b) Piranômetro Eppley	47
FIGURA 23. (a) Balança digital de precisão; (b) Inclinômetro analógico base magnética.	47
FIGURA 24. (a) Termo-higro-anemômetro digital ASKO (b) Sistema de aquisição de dados National Instruments.	48
FIGURA 25. Interface de controle elaborada para acompanhamento dos experimentos.	48
FIGURA 26. Diagrama de bloco com visão geral do modelo da VET.....	55
FIGURA 27. Fluxograma de execução do modelo.	55
FIGURA 28. Resultado da regressão linear múltipla para o Cd VET.....	60
FIGURA 29. Resultado comparativo entre modelo mr; modelo e experimental mr.	61
FIGURA 30. Dispersão dos resultados para vazão mássica calculada pelo modelo.....	62

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Principais artigos que auxiliaram na condução do trabalho.	34
TABELA 2. Descrição dos instrumentos apresentados na Figura 11.	39
TABELA 3. Possíveis formas de configuração e utilização da DX-SAHP.	41
TABELA 4. Lista de instrumentos utilizados	46
TABELA 5. Instrumentação DX-SAHP - R290.	49
TABELA 6. Variáveis elencadas para regressão.....	54
TABELA 7. Resultados dos testes de variáveis para a regressão.	58
TABELA 8. Coeficientes de regressão.....	59
TABELA 9. Parâmetros estatísticos.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASHP: *Air Source Heat Pump*

ASHRAE: *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*

BDC: Bomba de Calor

BEN: Balanço Energético Nacional

CO₂: Dióxido de Carbono

COP: *Coefficient of Performance*

DX-SAHP: *Direct-Expansion Solar Assisted Heat Pump*

EES: *Engineering Equation Solver*

EPE: Empresa de Pesquisa Energética

GREA: Grupo de Refrigeração e Aquecimento

GWP: *Global Warming Potential*

IEA: *International Energy Agency*

IX-SAHP: *Indirect Expansion Solar Assisted Heat Pump*

KWES: *Key World Energy Statistics*

LABVIEW: *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*

ODP: *Ozone Depleting Potential*

R290: Propano

R600: Butano

R600a: Isobutano

R744: Dióxido de carbono

SAHP: *Solar Assisted Heat Pump*

UFMG: Universidade Federal de Minas Gerais

TEWI: *Total Equivalent Warming Impact*

VET: Válvula de Expansão Termostática

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Gregas		Unidades
β	Coeficiente de regressão	-
Δ	Variação	-
ε	Emissividade	-
η	Eficiência	%
θ	Ângulo de inclinação do evaporador com a vertical	°
ν	Volume específico	m ³ /kg
ρ	Massa específica	kg/m ³
ϕ	Umidade relativa	%
Letras Latinas		Unidades
A	Área	m ²
c_p	Calor específico a pressão constante	J/kg.K
COP	Coeficiente de desempenho energético	-
I	Irradiância solar	W/m ²
m	Massa	kg
\dot{m}	Vazão mássica	kg/s
n	Número de pontos analisados	-
P	Pressão	kPa
\dot{Q}	Taxa de transferência de calor	W
\dot{Q}_{cond}	Capacidade de aquecimento	kW
\dot{Q}_{evap}	Capacidade de refrigeração	kW
R^2	Coeficiente de determinação	-
s	Entropia específica	J/kg.K
T	Temperatura	°C
t	Tempo	s
$TEWI$	<i>Total Equivalent Warming Impact</i>	kg-CO ₂
\dot{V}	Vazão volumétrica	m ³ /s
\dot{W}	Taxa de trabalho	W
x	Título de vapor	-
X_n	Variáveis	-

Y_n Parâmetro -

Subscritos

1	Entrada do compressor
2	Saída do compressor
3	Entrada do dispositivo de expansão
4	Entrada do evaporador
a	Água
amb	Ambiente
atm	Atmosférica
col	Coletor
comp	Compressor
cond	Condensador
crit	Crítico
des	Dessuperaquecimento
disp	Disponível
ele	Elétrico
e	Entrada
evap	Evaporador
exp	Experimental
ext	Externo
irad	Irradiação
isen	Isentrópica
s	Saída
sat	Saturação
sr	Subresfriamento
sup	Superaquecimento
vet	Válvula de expansão termostática

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivo	16
1.2 Motivação e justificativa	17
1.3 Estrutura da dissertação	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Ciclos de compressão de vapor	19
2.2 Bombas de calor assistidas por energia solar	22
2.3 Seleção de fluido refrigerante.....	24
2.4 Válvula de expansão termostática	25
2.5 Modelagem matemática.....	27
2.6 Regressão linear múltipla	28
2.7 Estado da arte.....	30
2.8 Considerações finais	34
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.1 Descrição da bancada de testes.....	35
3.2 Válvula de expansão termostática	41
3.3 Plano de ensaios	43
3.4 Instrumentação aplicada	45
3.5 Incerteza de medição	48
3.6 Softwares utilizados.....	50
3.7 Considerações finais	50
4 MODELO	51
4.1 Condições para o modelo	51
4.2 Cálculo da vazão mássica.....	52
4.3 Equação base da VET.....	52
4.4 Regressão linear múltipla	52
4.5 Teste de variáveis	53
4.6 Estrutura do modelo semiempírico.....	54
4.7 Definição do modelo	56
4.8 Considerações finais.....	56
5 RESULTADOS	57

5.1 Resultados dos testes de variáveis	57
5.2 Resultado da regressão e coeficientes de linearização	58
5.3 Resultados gerados pelo modelo	60
5.4 Considerações finais	63
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	64
6.1 Sugestões de trabalhos futuros	64
REFERÊNCIAS	65

1. INTRODUÇÃO

A demanda mundial de energia tem aumentado significativamente nas últimas décadas com o crescimento da população e o desenvolvimento econômico. De acordo com o relatório *Key World Energy Statistics (KWES)* da *International Energy Agency (IEA)* de 2021, os combustíveis fósseis representam a maior fonte de energia, respondendo por 77,8% da energia total demandada no mundo. Embora ainda sejam as principais fontes de energia exploradas, esses combustíveis possuem reservas finitas e emitem altas quantidades de CO₂ e outros poluentes durante seu uso, tornando o aquecimento global e a poluição ambiental problemas cada vez mais presentes e difíceis de solucionar dia após dia (DINIZ, 2023). A crescente preocupação com as mudanças climáticas globais e desastres naturais nas últimas décadas, além das preocupações com o esgotamento das fontes de energia fóssil, tem gerado uma reação natural em agências de proteção ambiental em todo o mundo, levando a uma aceleração na transição energética para fontes renováveis, como solar, eólica, maremotriz, hidráulica e biomassa (JAVADI *et al.*, 2020; VAISHAK e BHALE, 2019; KAMEL *et al.*, 2015).

A energia solar é uma fonte de energia limpa, sustentável e amplamente acessível, correspondendo a cerca de 3,8% da geração global de eletricidade (*International Energy Agency*). Por outro lado, a energia solar, apesar de abundante, não é uma fonte estável, pois a irradiância solar varia em uma faixa de 0-1100 W/m² de acordo com as coordenadas geográficas e a nebulosidade do local (SEZEN e GUNGOR, 2022). Uma das formas de se captar e aproveitar esta energia é por meio de coletores solares térmicos, que convertem a radiação solar em energia térmica para aquecedores de água, aquecedores de espaço, secadores e dispositivos de destilação com uma eficiência aproximada de 40-60% (KAMEL *et al.*, 2015, KHANLARI *et al.*, 2020).

O cenário brasileiro de consumo energético, apesar de suas particularidades, não difere do cenário mundial. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em seu relatório de 2021, a principal fonte de energia no Brasil é proveniente de derivados do petróleo cerca de 45%, e, se somados todos os combustíveis fósseis ao percentual, o valor sobe para 61%, por exemplo, processos industriais, motores à combustão, termoeletricas, aquecedores de água à GLP, cozimento de alimentos entre outros processos. Uma forma de promover a migração para fontes de energia mais sustentáveis que utilizem os recursos da energia solar e faça utilização de coletores solares, seria através da aplicação de bombas de calor auxiliadas por energia solar SAHP, do inglês, *Solar Assisted Heat Pump*. Esses equipamentos podem ser utilizados tanto para o aquecimento de água quanto para aquecimento de ambientes, além do fato de serem

dispositivos energeticamente eficientes, consumindo menos energia do que liberam de acordo com os princípios termodinâmicos aos quais são submetidos durante os processos de evaporação, condensação, compressão e expansão do fluido refrigerante em um ciclo fechado de compressão de vapor (BADIEI *et al.*, 2020).

As bombas de calor geram menores emissões de CO₂ que outros equipamentos térmicos e podem ser utilizadas de forma mais econômica e ambientalmente amigável, especialmente quando apoiadas por fontes de energia renovável, como a solar. Para maximizar o desempenho das bombas de calor (BDC), a temperatura da fonte de calor na qual o evaporador é instalado é um fator crítico, pois a energia solar promove o aumento da temperatura do evaporador usando o sistema de coletor solar térmico (STC), conforme sugerido por Duarte *et al.*, (2019). Os sistemas de bomba de calor solar de expansão direta DX-SAHP usam estruturas de STC diretamente como evaporadores, onde o refrigerante circula e troca calor com o componente, este por sua vez absorve calor do ar ambiente por meio de convecção e energia solar por meio de radiação. Para o bom funcionamento de uma bomba de calor, seja ela assistida por energia solar ou não, faz-se necessária a presença de componentes fundamentais, como o compressor, o dispositivo de expansão os trocadores de calor e o fluido refrigerante. De acordo com o trabalho apresentado por Diniz (2023), a seleção de um bom fluido refrigerante é crucial para o bom desempenho da BDC, a capacidade térmica e a faixa de temperatura de operação, além de questões de segurança, como inflamabilidade e toxicidade deste fluido devem ser observados durante a seleção. O impacto ambiental do refrigerante também deve ser uma consideração importante no processo de seleção. Conforme Duarte (2019), o impacto ambiental de um refrigerante é geralmente avaliado com base no potencial de aquecimento global (GWP) e no potencial de destruição da camada de ozônio (ODP). Refrigerantes com baixo GWP e ODP zero, são melhores do ponto de vista ambiental. O fluido R290 (Propano) é um fluido orgânico que apresenta bom rendimento termodinâmico e boas características ambientais. (DUARTE *et al.*, 2019, DINIZ 2023).

Os dispositivos de expansão também são fundamentais para o funcionamento adequado das bombas de calor. Eles controlam o fluxo de fluido refrigerante dentro do sistema, permitindo que a BDC funcione com melhor eficiência. Existem vários tipos de dispositivos de expansão, com destaque para o tubo capilar e a válvula de expansão termostática (VET) (DINIZ, 2023). Embora ambos cumpram a mesma função básica, existem diferenças significativas em termos de vantagens e desvantagens de uma VET e um tubo capilar. Dentre as vantagens das VETs encontram-se: controle preciso do fluxo de refrigerante, o que possibilita a adaptação do sistema de refrigeração às condições de carga variáveis; capacidade de manter

a pressão do evaporador constante, o que ajuda a evitar a formação de gelo no evaporador e aumenta a eficiência do sistema; possibilidade de ajuste para operação com diferentes tipos de refrigerantes; operação em uma ampla faixa de temperaturas, possibilitando o controle do grau de superaquecimento na entrada do compressor, característica crucial de segurança que evita danos ao compressor devido à sucção de refrigerante no estado líquido. Das desvantagens pode-se citar a complexidade do dispositivo com peças móveis, o que aumenta o risco de falhas e o seu preço se comparado ao de um tubo capilar. Em contrapartida, o tubo capilar apresenta as vantagens de ser um dispositivo simples e barato, sem peças móveis, que não exige nenhum tipo de manutenção. Porém, das desvantagens, encontram-se a falta de controle sobre a vazão de refrigerante, grau de superaquecimento fixo pré-estabelecido pela construção física do equipamento e dependente das condições ambientais, além de uma piora significativa no desempenho dos ciclos termodinâmicos. Por conseguinte, a utilização da VET é indicada na maioria dos casos em que se busca o equilíbrio entre o controle do sistema, desempenho e custo (CICHONG *et al.*, 2018, ASHRAE 2018, BEHFAR e YUILL 2018).

A elaboração de modelos que descrevem os processos que ocorrem tanto em bombas de calor como em válvulas de expansão termostáticas é fundamental para a evolução e aperfeiçoamento de estudos e projetos destes equipamentos. Diversos pesquisadores se empenham na elaboração de tais modelos de forma a simplificar o processo de estudo e simulação de suas operações, tornando, assim, mais fácil e viável o aprimoramento e a concepção de melhorias. O desenvolvimento de bons modelos que consigam descrever os processos com fidelidade à realidade minimiza a necessidade de investimentos em aparatos construtivos, protótipos e experimentos, que, muitas das vezes, demandam tempo e recursos, financeiro e pessoal, para sua execução (BEHFAR e YUILL 2018, EAMES *et al* 2014, TEGROTHUIS *et al* 2017, CHEUNG e BRAUN 2014, KIM e BRAUN 2016, LI e BRAUN 2008).

1.1. Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo a elaboração de um modelo matemático tipo semiempírico a partir de dados experimentais, que descreva o comportamento de uma válvula de expansão termostática implementada em uma bomba de calor solar de expansão direta à R290 (Propano) para a determinação da vazão mássica de fluido refrigerante da máquina em diversas condições de operação.

Os objetivos específicos são:

- Executar testes experimentais e coletar dados através de um protótipo de DX-SAHP desenvolvido para este trabalho;
- Avaliar o uso da técnica de regressão múltipla linear em associação com equações pré-definidas para determinação da vazão mássica de refrigerante através da VET;
- Estabelecer relação matemática entre a VET (vazão mássica) e incidência solar;
- Determinar as principais variáveis físicas que afetam direta ou indiretamente o fluxo de massa no ciclo termodinâmico da bomba de calor solar.

1.2. Motivação e Justificativa

No Brasil, água quente para banhos é amplamente produzida por chuveiros e aquecedores elétricos, equipamentos de eficiência energética muito baixa (RABELO *et al.*, 2019). Bombas de calor ar/água são máquinas para aquecimento de água que operam com baixo consumo de energia, pois, além do aporte de energia elétrica para acionamento do compressor do sistema, uma quantidade expressiva do calor para aquecimento da água é extraída gratuitamente do meio ambiente (KONG *et al.*, 2020). Ademais, bombas de calor podem operar com fluidos de trabalho (fluidos frigoríficos) menos agressivos ao meio ambiente, como mostram Duarte *et al.*, (2019) em sua pesquisa, apresentando o fluido R290 como uma alternativa interessante para conciliar um bom rendimento das bombas de calor com um bom aparato ambiental. Este fluido é o refrigerante da máquina analisada neste trabalho. No Brasil, Não há registros de fabricação em escala de bombas de calor para aquecimento de água no setor residencial e hoteleiro e tampouco de bombas de calor assistidas por energia solar, sobretudo operando com o fluido R290. Essa última permite produzir água quente com uma eficiência energética ainda maior que bombas de calor convencionais (KONG *et al.*, 2020). Neste sentido, a VET é parte fundamental de uma bomba de calor, pois através deste dispositivo é possível controlar o fluxo de fluido refrigerante que circula no evaporador e por conseguinte controla-se a taxa de troca de calor entre o fluido frigorífico e o fluido secundário (CICHONG *et al.*, 2018). O estudo da VET é tema de diversos trabalhos, como, por exemplo, Behfar e Yuill, (2018) e Eames *et al.*, (2014), que, por sua vez, elaboraram modelos matemáticos que descreveram o comportamento da VET através de parâmetros físicos identificados no sistema, porém, nenhum trabalho sobre VET envolvendo o fluido R290. Por isso, este é objeto de estudo deste trabalho, sendo que, uma vez descrita seu modo de funcionamento, torna-se mais viável

o aprofundamento de pesquisas para melhorias de performance e redução de custos, tanto da VET como também das bombas de calor à R290.

1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação é composta por sete capítulos distintos. Neste primeiro capítulo é realizada uma contextualização sobre o tema do trabalho, sua problemática, possíveis soluções e o objetivo do trabalho. No segundo capítulo é realizada uma breve conceituação teórica onde são explorados alguns fundamentos da termodinâmica e engenharia para o pleno entendimento e alcance do objetivo proposto, além de apresentar o estado da arte no que tange pesquisas sobre o tema deste trabalho. No terceiro capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados para aquisição de dados durante os testes executados, bem como uma descrição dos equipamentos, componentes, instrumentos e softwares utilizados. No quarto capítulo encontram-se os passos e métodos utilizados para a elaboração do modelo matemático semiempírico (caixa-cinza). O capítulo seguinte trata dos resultados, com as análises e discussões dos achados da pesquisa, a partir dos quais foi possível elaborar o capítulo seguinte, as conclusões do estudo realizado. Por fim, no sétimo capítulo encontram-se as referências utilizadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados conceitos fundamentais para o entendimento deste trabalho. Ao final tem-se o estado da arte contendo pesquisas atuais e suas devidas contribuições sobre o tema deste trabalho. O fluxo de informações discorrido neste capítulo tem uma sequência lógica que se dá desde conceitos macros para conceitos menores e mais específicos. São abordados tópicos de ciclo de compressão de vapor, bombas de calor e bombas de calor assistidas por energia solar, fluido refrigerantes, dispositivos de expansão e válvula de expansão termostática, modelos matemáticos e métodos estatísticos.

2.1. Ciclos de Compressão de Vapor

Um sistema frigorífico clássico opera através do ciclo de compressão a vapor e é composto basicamente por um compressor, um condensador, um dispositivo de expansão e um evaporador. Para entender o comportamento do fluido neste ciclo, é útil analisar um diagrama Pressão-Entalpia, como mostrado na Figura 1, que ilustra um ciclo de compressão a vapor sem perdas de energia. O ciclo começa no compressor (1), que tem a função de aumentar a pressão do fluido, aspirando-o em baixa pressão e comprimindo-o em direção ao condensador. No ciclo ideal apresentado, o processo de compressão (1) a (2) ocorre de forma isentrópica, no qual o vapor saturado passa da pressão P_{evap} para a pressão P_{cond} e da entalpia h_1 para h_2 , consumindo trabalho mecânico. Em seguida, o fluido chega ao condensador (2) e sofre o processo de condensação entre (2) e (3), cedendo calor à pressão constante, passando de vapor superaquecido para líquido saturado. O dispositivo de expansão (3) tem a função de reduzir a pressão do fluido entre os pontos (3) e (4). Este dispositivo recebe líquido vindo do condensador e o converte em uma mistura de líquido e vapor à pressão inferior à de entrada, que é encaminhada para o evaporador (4). Este é um processo idealmente isentálpico, desde a pressão de condensação P_{cond} até a pressão de vaporização P_{evap} . No final do ciclo, ocorre a evaporação do fluido no evaporador, entre os pontos (4) e (1) da Figura 1. O fluido recebe calor e vai desde um estado bifásico líquido-vapor até atingir o estado de vapor saturado. Assim sendo, o fluido é encaminhado ao compressor (1) novamente, fechando o ciclo. Nesse sentido, um ciclo de compressão de vapor envolve absorção de calor através do evaporador e liberação de calor por meio do condensador. Os processos supracitados estão descritos por Venturini e Pirani (2005), Vargas (2010), Mandal e Roy (2014), Lima (2015) e Borgnakke e Sonntag (2020).

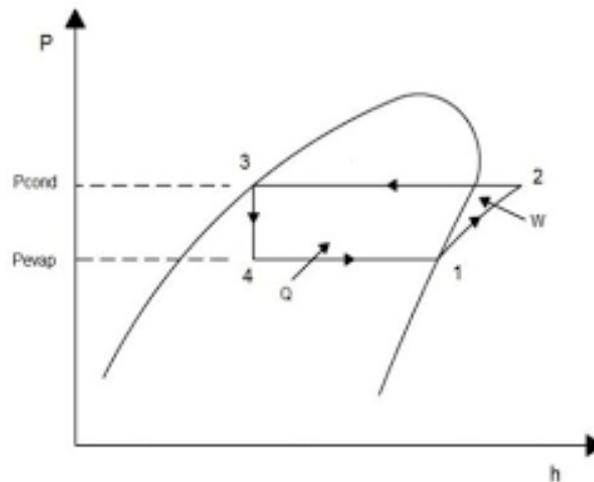


FIGURA 1. Diagrama P-h de um ciclo ideal. Fonte: Mandal e Roy (2014).

O ciclo da Figura 1 é idealizado e não leva em consideração o grau de superaquecimento na saída do evaporador, subresfriamento na saída do condensador, tampouco as perdas de carga nos trocadores de calor e perdas de eficiência no compressor. Na prática, a entrada do fluido no compressor é representada na região de superaquecimento (pontos 1-1') de acordo com a Figura 2, que retrata as principais diferenças entre o ciclo real e teórico de refrigeração por compressão de vapor, estando o ciclo ideal representado com linha cheia e o ciclo real com linha tracejada. Um aumento de temperatura é necessário para garantir que o fluido entre totalmente no estado de vapor, garantindo a segurança e o funcionamento do compressor. Outra diferença é o subresfriamento do refrigerante na saída do condensador (pontos 3-3'), processo muito importante que evita a existência de vapor na saída do condensador.

A medida do desempenho de um sistema por compressão de vapor se dá através do COP (Coeficiente de Performance) que é a razão entre o calor desejado, para refrigeração ou para aquecimento, e a energia gasta no compressor, conforme mostra a Equação 1. A vazão mássica de fluido refrigerante no ciclo pode ser obtida através de equações de balanço de energia no condensador durante o aquecimento da água como apresenta as Equações 2 a 5.

$$COP = \frac{\dot{Q}}{\dot{W}} \quad (1)$$

Onde \dot{Q} é a taxa de calor desejado, e \dot{W} é a taxa de trabalho consumido pelo compressor.

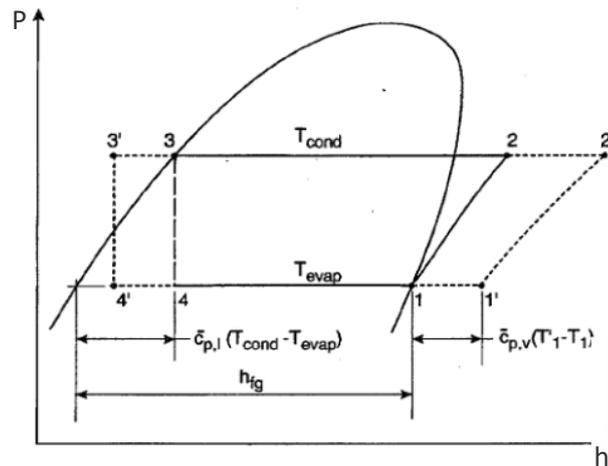


FIGURA 2. Diferenças entre os ciclos teórico e real.

Fonte: adaptado de Barbosa e Medeiros (2009).

$$\dot{Q}_{Cond} = \dot{Q}_{Água} \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{Água} = V_a \cdot Cp_a \cdot (T_{s;a} - T_{e;a}) \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{Cond} = \dot{m}_r \cdot (h_{e;cond} - h_{s;cond}) \quad (4)$$

$$\dot{m}_r = \frac{V_a \cdot Cp_a \cdot (T_{s;a} - T_{e;a})}{(h_{e;cond} - h_{s;cond})} \quad (5)$$

Onde \dot{Q}_{Cond} e $\dot{Q}_{Água}$ representam a taxa de calor fornecido e recebido pelo condensador e água aquecida respectivamente, V_a é a vazão volumétrica de água, Cp_a é o calor específico da água na temperatura média durante seu aquecimento, $T_{s;a}$ e $T_{e;a}$ são as temperaturas da água aquecida na saída e na entrada do condensador, respectivamente, \dot{m}_r é a vazão mássica de fluido refrigerante que circula no condensador durante o processo de aquecimento da água e por fim $h_{e;cond}$ e $h_{s;cond}$ são as entalpias específicas do fluido refrigerante na entrada e na saída do condensador obtidas através de seus respectivos valores de temperatura e pressão em cada ponto.

2.2. Bombas de calor assistidas por energia solar

Sistemas termodinâmicos por compressão de vapor podem ser concebidos em diferentes configurações e finalidades, podendo ser utilizados tanto para refrigeração quanto para aquecimento como bombas de calor. A diferença está apenas no objetivo: nos refrigeradores a finalidade é retirar o calor de um ambiente ou de fluido secundário e nas bombas de calor, a finalidade é aquecer o ambiente ou fluido secundário, transmitindo-lhe calor (BORGNAKKE e SONNTAG, 2020).

As bombas de calor, assim como refrigeradores, são aparelhos que utilizam energia elétrica (no compressor) para transferir calor de um ambiente para outro. No caso do aquecimento de água, as bombas de calor podem ser utilizadas como uma alternativa aos sistemas convencionais, baseados em efeito Joule, por serem mais eficientes, possuem baixo consumo de energia e não emitem gases poluentes, o que as torna uma opção mais sustentável. A nomenclatura internacional para a bomba de calor para aquecimento de água é ASHPWH (*Air Source Heat Pump Water Heater*), já o termo ASHP (*Air Source Heat Pump*) também é utilizado, mas identifica um sistema para aquecimento de ambiente e não exclusivamente para aquecimento de água, sendo importante identificar o fluido presente na fonte quente do sistema (DINIZ, 2023).

O termo SAHP (*Solar Assisted Heat Pump*) é utilizado para identificar um sistema de aquecimento com assistência solar, geralmente através da utilização de um coletor solar térmico, como um coletor de placa plana, tubo evacuado, entre outros. Segundo Diniz (2017), este sistema foi criado para ter um desempenho superior ao ASHP, pois o aporte térmico do meio ambiente disponível para o aquecimento da água é notavelmente superior. Quando o sistema SAHP contém um coletor solar como evaporador do ciclo termodinâmico de compressão de vapor, conforme apresentado na Figura 3, o equipamento é classificado como DX-SAHP (*Direct Expansion Solar Assisted Heat Pump*). Por outro lado, quando o coletor solar não está em contato direto com o fluido refrigerante, ou seja, não faz parte diretamente do ciclo de compressão de vapor, temos a IX-SAHP (*Indirect Expansion - Solar Assisted Heat Pump*). Esta denominação dá-se devido à existência de um trocador de calor posicionado entre o sistema de coletores solares térmicos e o ciclo de compressão de vapor (BUKER e RIFFAT, 2016).

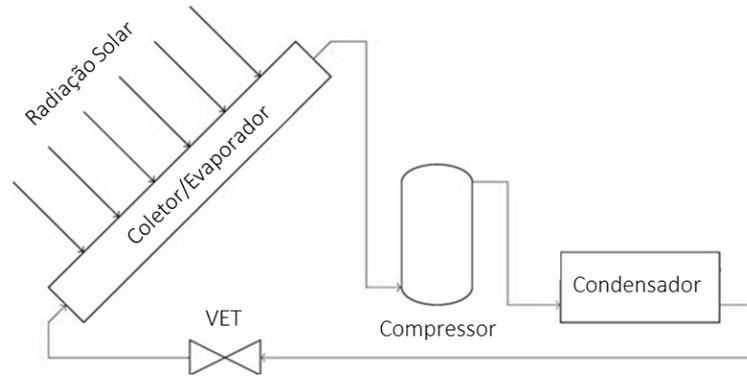


FIGURA 3. Ciclo DX-SAHP. Fonte: Adaptado de Oliveira *et al.*, (2020).

A DX-SAHP utiliza energia proveniente do ar atmosférico (configuração padrão) e da irradiação solar (coletor solar térmico) para realizar o aquecimento de água. No entanto, quando não há exposição à irradiação solar, a DX-SAHP mantém sua capacidade de realizar o aquecimento de água. Apesar da inexistência de irradiação solar, transforma-se em uma ASHP (*Air Source Heat Pump*), resultando em uma redução da eficiência energética (DUARTE *et al.*, 2019; DINIZ *et al.*, 2021; LUZ *et al.*, 2021).

As BDC assistidas por energia solar podem ser projetadas para uma variedade de aplicações, desde pequenos sistemas residenciais até grandes sistemas comerciais e industriais. Elas também podem ser integradas com outras fontes de energia renovável, como eólica ou geotérmica, para fornecer uma solução abrangente e sustentável de aquecimento e refrigeração. Desta forma, estes sistemas podem reduzir significativamente os custos de energia e as emissões de gases de efeito estufa em comparação com sistemas tradicionais de aquecimento e refrigeração. Eles também fornecem uma fonte de energia mais consistente do que os sistemas solares térmicos tradicionais, pois a bomba de calor pode operar mesmo quando os níveis de radiação solar são baixos. Os sistemas SAHPs são tecnologias promissoras para reduzir os custos de energia e as emissões de carbono em edifícios (DUARTE *et al.*, 2019; DINIZ *et al.*, 2021; DINIZ, 2023).

Para o caso específico de uma bomba de calor, o cálculo do COP apresentado pela Equação 1 pode ser ajustado conforme a Equação 6.

$$COP_{BDC} = \frac{Q_{cond}}{W_{comp}} \quad (6)$$

Onde o calor Q_{cond} é representado pelo aporte térmico cedido pela BDC para o aquecimento do fluido secundário por meio do condensador, e o trabalho W_{comp} é a energia consumida no

equipamento de compressão. Este COP é o do ciclo, desconsiderando-se possíveis equipamentos periféricos, como ventiladores para circulação de ar nos trocadores de calor, bombas hidráulicas para circulação de água e instrumentações instaladas.

2.3. Seleção de fluido refrigerante

O fluido refrigerante desempenha papel crítico em um ciclo termodinâmico para aplicações de refrigeração e aquecimento. É o fluido refrigerante que absorve e libera calor permitindo a transferência deste calor de um local para outro. Segundo o que foi apresentado por Duarte *et al.*, (2019) em seu trabalho sobre seleção de fluidos refrigerantes para aplicação em bombas de calor assistidas por energia solar, o processo de selecionar um refrigerante adequado para uma aplicação específica envolve avaliar as propriedades físicas, químicas e termodinâmicas do refrigerante, bem como seu impacto ambiental, segurança e viabilidade econômica. O primeiro passo no processo de seleção do refrigerante é identificar os requisitos específicos da aplicação, como a faixa de temperatura de operação desejada, capacidade de refrigeração e tamanho do sistema. Uma vez que esses requisitos são conhecidos, uma lista de refrigerantes candidatos pode ser compilada com base em suas propriedades físicas e termodinâmicas, como ponto de ebulição, temperatura crítica, calor específico e condutividade térmica.

O impacto ambiental do refrigerante também é uma consideração importante no processo de seleção. O impacto ambiental é tipicamente avaliado com base no potencial de aquecimento global (GWP – “*global warming potential*”) e potencial de depleção da camada de ozônio (ODP – “*ozone depletion potential*”). Refrigerantes com baixo GWP e zero ODP são geralmente preferidos do ponto de vista ambiental (DUARTE *et al.*, 2019). A segurança é outro fator crítico na seleção do refrigerante, de modo que, inflamabilidade, toxicidade e estabilidade química são considerações importantes a serem tomadas. Por exemplo, refrigerantes altamente inflamáveis ou tóxicos podem não ser adequados para determinadas aplicações, como sistemas de refrigeração residenciais ou comerciais.

Outro indicador para a seleção do fluido é o TEWI (*total equivalent warming impact*), que permite avaliar o impacto ambiental de sistemas levando em consideração não apenas o potencial de aquecimento global dos gases refrigerantes utilizados, mas também o impacto relacionado ao consumo de energia ao longo do ciclo de vida do sistema. O TEWI é calculado somando-se duas contribuições principais: o TEWI direto, que considera as emissões diretas de

gases refrigerantes durante a operação do sistema, e o TEWI indireto, que leva em conta as emissões relacionadas à geração de energia elétrica consumida pelo sistema (DINIZ, 2023).

A seleção de um refrigerante adequado para uma aplicação específica envolve a avaliação cuidadosa das propriedades físicas, termodinâmicas, ambientais, de segurança e econômicas. É essencial que o refrigerante selecionado possua um equilíbrio entre boas propriedades termodinâmicas, baixo impacto ambiental, segurança e viabilidade econômica. Alguns refrigerantes que foram utilizados em estudos anteriores em DX-SAHP são o R12, R22, R134a, R290, R600a, R744, R410A, R407C, R433A e R1234yf, como visto nos trabalhos de Duarte *et al.*, (2019) e Diniz *et al.*, (2023). É importante ressaltar que a correta seleção do refrigerante pode impactar significativamente a eficiência, o custo e a sustentabilidade ambiental do sistema. Diversos estudos apresentam o R290 (propano) como um bom candidato na substituição sustentável de fluidos refrigerantes por apresentar um equilíbrio entre boas características termodinâmicas e ambientais.

2.4. Válvula de Expansão Termostática

Conforme mencionado por Lima (2015), a capacidade volumétrica do compressor, a vazão mássica de refrigerante e a potência de compressão são parâmetros que dependem das pressões de evaporação e condensação. Nesse contexto, os dispositivos de expansão desempenham um papel crucial no equilíbrio dessas pressões, sendo essenciais para o bom desempenho do ciclo. Dentre esses dispositivos, a válvula de expansão termostática (VET), representada na Figura 4, possui características particulares. A VET desempenha a função de regular o fluxo de refrigerante para o evaporador, mantendo um superaquecimento aproximadamente constante na saída desse componente. Quando há um aumento da carga térmica e, conseqüentemente, um aumento do superaquecimento no final do evaporador, a válvula de expansão termostática aumenta o fluxo de refrigerante até que o nível de superaquecimento seja normalizado. O inverso também ocorre, garantindo que o evaporador permaneça efetivo em quase todas as condições operacionais.

Outra abordagem da VET foi apresentada por Mesquita (2009). Segundo o autor, a válvula de expansão ajusta a vazão de refrigerante na entrada do evaporador com base na taxa de evaporação. Quando ocorre superaquecimento no evaporador, a temperatura na saída aumenta, o que resulta em um aumento na temperatura do bulbo. Isso faz com que o fluido no bulbo se expanda, empurrando o diafragma para baixo e abrindo a válvula. O aumento do fluxo na válvula de expansão, e, conseqüentemente, no evaporador, restabelece o superaquecimento

inicial. Além disso, conforme mencionado por Stoecker e Jones (1985), uma das funções da válvula de expansão termostática é manter aproximadamente constante a quantidade de refrigerante líquido dentro do evaporador. Se a quantidade de líquido diminui, a temperatura do fluido na saída do evaporador aumenta, pois o vapor é exposto a uma área maior de transferência de calor no evaporador. O aumento da temperatura do vapor superaquecido resulta em um aumento da pressão no bulbo, empurrando o diafragma e, por sua vez, abrindo a válvula.



FIGURA 4. Válvula de expansão termostática (representação). Fonte: Danfoss® (2023).

Por se tratar de um componente crítico para os ciclos termodinâmicos de compressão de vapor, o correto funcionamento da VET mantém a eficiência e confiabilidade do sistema (ASHRAE, 2018). A VET promove o controle preciso do fluxo de refrigerante que entra no evaporador, mantendo a temperatura e pressão desejadas no mesmo. O controle preciso do fluxo de refrigerante também garante que o compressor não seja sobrecarregado, o que pode levar a uma falha prematura. Além disso a VET promove a melhoria da eficiência energética, otimizando o fluxo de refrigerante para o evaporador prevenindo inundações e congelamentos, ajudando o sistema a operar com máxima eficiência e segurança para seus componentes. Koury *et al.*, (2001) apresentou em seu trabalho a Equação 7, que determina a vazão mássica através de uma válvula de expansão termostática.

$$\dot{m}_{VET} = C_d \sqrt{(P_1 - P_2) \rho_e} \quad (7)$$

Onde \dot{m}_{VET} é a vazão mássica imposta pela válvula de expansão termostática, P_1 , P_2 são, respectivamente, a pressão do fluido refrigerante na entrada da VET e a pressão do fluido na saída da VET, C_d é a constante característica da válvula de expansão termostática conhecida

como coeficiente de descarga e ρ_e é a massa específica do fluido refrigerante na entrada da VET.

2.5. Modelagem matemática

A modelagem matemática é um processo de criação de representações abstratas de sistemas ou fenômenos complexos usando equações matemáticas e estruturas lógicas. Existem vários tipos de modelos matemáticos usados em diferentes áreas da ciência e engenharia, incluindo modelos determinísticos ou físicos (caixa-branca), semiempíricos ou híbridos (caixa-cinza) e empíricos ou baseados em dados experimentais (caixa-preta) (MAIA *et al.*, 2014). Um modelo caixa-branca é um modelo matemático que representa explicitamente os mecanismos internos e/ou componentes de um sistema (MAIA *et al.*, 2013). Em outras palavras, um modelo caixa-branca é uma representação completa e detalhada da estrutura, comportamento e princípios físicos subjacentes de um sistema. Esses modelos são geralmente usados em situações em que o sistema subjacente é bem compreendido e os objetivos da modelagem requerem muita precisão (PELZ *et al.*, 2021).

Um modelo caixa-preta descreve o comportamento de entrada e saída de um sistema sem representar explicitamente seus mecanismos internos ou componentes. Em outras palavras, este modelo estabelece uma relação entre as variáveis de entrada e de saída, sem abordar o funcionamento interno do sistema. Esses modelos são geralmente usados em situações em que o sistema subjacente é mal compreendido ou os objetivos da modelagem requerem um modelo mais simples e computacionalmente eficiente. Um modelo caixa-cinza é uma combinação de modelos caixa-branca e caixa-preta, em que alguns aspectos do sistema são representados explicitamente, enquanto outros são tratados como desconhecidos ou incertos (BEHFAR e YUILL, 2018). Um modelo caixa-cinza é uma representação parcialmente detalhada de um sistema que inclui alguns mecanismos internos, mas também permite algum grau de incerteza ou variabilidade. Esses modelos são geralmente usados em situações em que o sistema subjacente é parcialmente compreendido ou os objetivos da modelagem requerem um compromisso entre precisão e simplicidade (PELZ *et al.*, 2021).

Em um modelo caixa-cinza, a representação explícita do sistema geralmente é baseada no conhecimento prévio da estrutura ou comportamento do sistema, ou em dados disponíveis de experimentos ou simulações. Essa representação explícita pode assumir a forma de equações físicas, relações empíricas ou uma combinação de ambas. Por exemplo, em um problema de dinâmica dos fluidos, as equações que governam o fluxo do fluido podem ser explicitamente

representadas em um modelo caixa-cinza, enquanto os efeitos da turbulência ou outras incertezas podem ser tratados como desconhecidos ou incertos. Ao representar explicitamente alguns aspectos do sistema, os modelos caixa-cinza podem capturar as características mais importantes do sistema, ao mesmo tempo em que são computacionalmente eficientes. Isso pode ser especialmente útil em situações em que os dados disponíveis são limitados ou ruidosos, ou quando o sistema subjacente é complexo e difícil de modelar (PELZ *et al.*, 2021).

Em geral, os modelos caixa-cinza são uma abordagem de modelagem versátil que pode ser útil em uma ampla gama de aplicações, desde engenharia e física até biologia e ciências sociais. Ao combinar as vantagens dos modelos caixa-branca e caixa-preta, os modelos caixa-cinza podem fornecer uma ferramenta poderosa para entender e prever sistemas complexos no mundo real.

2.6. Regressão Linear Múltipla

Segundo Montgomery e Runger (2021), a regressão linear múltipla é uma técnica de modelagem estatística que examina a relação linear entre duas ou mais variáveis independentes e uma única variável dependente. Em outras palavras, a regressão linear múltipla é uma maneira de modelar como um conjunto de variáveis independentes afeta uma única variável dependente. O modelo de regressão linear múltipla pressupõe que a relação entre a variável dependente e cada variável independente seja linear, sendo o objetivo de a regressão linear múltipla identificar a relação entre as variáveis independentes e a variável dependente, além de usar essa relação para fazer previsões sobre a variável dependente com base nos valores das variáveis independentes. Para construir um modelo de regressão linear múltipla é necessário coletar dados da variável dependente e das variáveis independentes. Os dados são então usados para estimar os coeficientes da equação de regressão. A equação de regressão assume a forma apresentada pela Equação 8.

$$Y_0 = \beta_0 + \beta_1 X_a + \beta_2 X_b + \dots + \beta_n X_n \quad (8)$$

Onde Y_0 é a variável dependente, X_a, X_b, \dots, X_n são as variáveis independentes, β_0 é o termo de interceptação ou constante e $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ são os coeficientes de regressão das variáveis independentes.

A análise estatística de uma regressão múltipla linear envolve a avaliação da significância estatística dos coeficientes de regressão, bem como a qualidade geral do modelo de regressão. Os coeficientes de regressão estimados fornecem uma medida da relação linear

entre as variáveis independentes e a variável dependente. Para cada variável independente, é possível testar se o coeficiente de regressão é significativamente diferente de zero, o que indica se a variável independente é um preditor significativo da variável dependente (MONTGOMERY e RUNGER 2021). Outras estatísticas, como R^2 , o erro padrão da estimativa e o F-teste, também podem ser usadas para avaliar a qualidade do modelo. A análise de resíduos também é importante na regressão múltipla linear, pois permite avaliar a adequação do modelo para explicar a variação na variável dependente e identificar possíveis violações das suposições do modelo, como a normalidade dos resíduos e a homoscedasticidade, que é uma característica de um modelo de regressão linear que implica que a variância dos erros é constante ao longo do tempo.

A seguir estão explicitadas algumas considerações importantes a serem observadas para garantir a confiabilidade e o sucesso de uma regressão linear múltipla por meio de métricas e testes estatísticos, são elas:

- Coeficiente de determinação (R^2): Mede a proporção da variabilidade dos dados de resposta que é explicada pelo modelo. Um valor de R^2 próximo a 1 indica um bom ajuste do modelo aos dados, sugerindo que as variáveis independentes estão explicando uma parte significativa da variabilidade da variável dependente.
- Valor-p e significância dos coeficientes: Cada coeficiente estimado na regressão possui um valor-p associado, indicando a probabilidade de que o coeficiente seja igual a zero na população. Valores-p baixos (geralmente abaixo de 0,05) indicam que o coeficiente é estatisticamente significativo e contribui para explicar a relação entre a variável independente e a variável dependente.
- Análise de resíduos: Os resíduos são as diferenças entre os valores observados e os valores previstos pelo modelo. Uma análise de resíduos ajuda a avaliar se os resíduos estão distribuídos aleatoriamente em torno de zero, se não há padrões evidentes nos resíduos e se as premissas da regressão linear estão sendo atendidas. Os resíduos devem seguir uma distribuição normal, com média zero e variância constante.
- Teste de significância global do modelo: Avalia se o modelo de regressão como um todo é estatisticamente significativo. Ele compara a variabilidade explicada pelo modelo com a variabilidade não explicada.
- Validação cruzada: Técnica utilizada para avaliar o desempenho do modelo em dados não utilizados durante o treinamento. Ela ajuda a verificar se o modelo possui uma

capacidade de generalização adequada, ou seja, se ele é capaz de fazer previsões precisas em novos conjuntos de dados.

Para testar se o coeficiente de regressão é significativamente diferente de zero em uma regressão múltipla, é necessário realizar um teste de hipótese. A hipótese nula (H_0) indica que o coeficiente de regressão é igual a zero, enquanto a hipótese alternativa (H_a) indica que o coeficiente de regressão é diferente de zero. O teste de hipótese é geralmente realizado usando um teste t ou um teste F, dependendo do número de variáveis independentes no modelo. Para o teste t, o valor t é calculado como o coeficiente de regressão dividido pelo seu erro padrão. Em seguida, o valor t é comparado com um valor crítico de t com base no nível de significância e no número de graus de liberdade do modelo. Se o valor t calculado for maior do que o valor crítico de t, a hipótese nula é rejeitada, indicando que o coeficiente de regressão é significativamente diferente de zero. Para o teste F, o modelo é comparado com um modelo reduzido que contém apenas a variável intercepto. Em seguida, o valor F é calculado como a razão da soma de quadrados do modelo dividido pela soma de quadrados do modelo reduzido. O valor F é comparado com um valor crítico de F com base no nível de significância e no número de graus de liberdade do modelo. Se o valor F calculado for maior do que o valor crítico de F, a hipótese nula é rejeitada, indicando que o modelo completo é significativamente melhor do que o modelo reduzido e que pelo menos uma variável independente é um preditor significativo da variável dependente (MONTGOMERY e RUNGER 2021).

2.7. Estado da Arte

Nesta seção são apresentados estudos de grande relevância que abordam os temas tratados neste trabalho. É dada ênfase aos estudos de modelagem matemática do tipo caixa-cinza (semiempírico) de válvulas de expansão termostática, mas também são apresentados estudos sobre bombas de calor assistidas por energia solar e pesquisas com o fluido R290 (propano). Ao final desta seção é apresentada a Tabela 1 com a consolidação dos principais artigos utilizados, e, espera-se evidenciar de forma clara a relevância dos temas discutidos neste trabalho e corroborar com sua execução.

Alireza Behfar e David Yuill (2018) realizaram um estudo com o objetivo de avaliar modelos matemáticos de VET para prever com maior precisão a vazão mássica de refrigerante em sistemas de refrigeração e ar-condicionado. O método utilizado envolveu a análise de quatro modelos tipo caixa-cinza e dois modelos tipo caixa-preta, comparando-os com resultados experimentais. Os principais resultados mostraram que os modelos de caixa-cinza foram

capazes de prever com precisão a vazão mássica do refrigerante, com erro médio absoluto inferior a 5%. As principais conclusões indicam que os modelos caixa-cinza podem ser usados com sucesso para prever a vazão mássica de refrigerante em sistemas termodinâmicos, permitindo melhor controle do processo e diagnóstico de falhas.

Um dos modelos avaliados por Alireza Behfar e David Yuill (2018) foi o apresentado por Eames, Milazzo e Maidment (2014), que realizaram um estudo com o objetivo de apresentar e comparar diferentes modelos para simular o comportamento de uma VET em um refrigerador de compressão de vapor. Os autores propuseram um modelo simplificado tipo caixa-cinza de baixa ordem, bem como um modelo mais complexo baseado em equações diferenciais parciais. Os resultados das simulações foram comparados com dados experimentais, mostrando que ambos os modelos foram capazes de prever com precisão o desempenho da VET em uma ampla gama de condições de operação. Os autores concluíram que os modelos propostos são úteis para a otimização do sistema de refrigeração e para o desenvolvimento de estratégias de controle mais eficientes, reforçando que a utilização de modelos semiempíricos é eficiente e vantajosa, necessitando de um menor esforço para sua elaboração.

Kim e Braun (2016) descreveram o desenvolvimento e avaliação de sensores virtuais de vazão mássica de fluido refrigerante para detecção e diagnóstico de falhas em sistemas de refrigeração. Um dos sensores virtuais elaborados foi baseado em um modelo matemático empírico tipo caixa-preta sobre o dispositivo de expansão do equipamento. A avaliação do desempenho dos sensores virtuais foi realizada por meio de comparação com medições reais de fluxo de massa de refrigerante obtidas por um sensor de fluxo de massa de referência. Os resultados indicaram que os sensores virtuais são capazes de detectar com precisão e diagnosticar falhas no sistema de refrigeração, incluindo vazamento de refrigerante e obstruções no sistema.

A busca por dispositivo de expansão mais eficientes e que se adequam melhor a cada ciclo termodinâmico frequentemente é tema de trabalhos científicos e estudos como os de Peng *et al.* (2016) e Liu *et al.* (2018) reforçam esta perspectiva. Estes autores realizaram trabalhos muito similares em que foi avaliado experimentalmente o desempenho de ciclos de compressão de vapor, o primeiro comparou o desempenho de um aquecedor de água por bomba de calor de fonte de ar com diferentes dispositivos de expansão, enquanto o segundo estudou um sistema de ar-condicionado também com diferentes dispositivos de expansão e fluido refrigerante R290. Os autores realizaram testes experimentais em diferentes condições de operação e mostraram que o dispositivo de expansão tem um impacto significativo no desempenho do sistema. Os resultados mostraram que além do dispositivo de expansão afetar significativamente o

desempenho do sistema, o tamanho da carga de refrigerante também tem uma influência considerável no desempenho. Os artigos concluem de forma bem similar que é importante selecionar o dispositivo de expansão apropriado pois isto melhora a eficiência energética do sistema e reduzir o consumo de energia.

Kong *et al.* (2020) apresentaram uma análise experimental comparativa entre dois tipos de refrigerantes (R134a e R290) em sistemas de aquecimento de água por bomba de calor solar de expansão direta (DX-SAHP). O objetivo do estudo foi avaliar a eficiência dos sistemas e comparar o desempenho dos dois refrigerantes. O experimento foi realizado com dois sistemas de aquecimento de água, um usando R134a e outro usando R290, ambos equipados com coletores térmicos solar. O desempenho dos sistemas foi avaliado em termos de eficiência energética, temperatura da água e consumo de energia elétrica. Os resultados mostraram que o sistema com R290 apresentou melhor desempenho em termos de eficiência energética atingindo um COP 32% maior do que o sistema com R134a e consumo de energia elétrica no compressor cerca de 7% menor durante todo o período de estudo. Os autores concluem que o refrigerante R290 é mais adequado para uso em sistemas de aquecimento de água por bomba de calor solar de expansão direta.

Rabelo *et al.* (2019) realizaram uma análise econômica e otimização do projeto de uma bomba de calor assistida por energia solar de expansão direta. Os resultados mostraram que a DX-SAHP pode reduzir significativamente os custos operacionais em comparação com a utilização de sistemas convencionais. Assim como Yang *et al.* (2021) estudaram as bombas de calor assistidas por energia solar e concluíram que estas são uma tecnologia promissora para aquecimento de água para uso doméstico com economia de energia no setor residencial. O artigo apresenta uma revisão abrangente dos avanços recentes nessa área, abordando configuração do sistema, coletores solares, armazenamento de energia térmica e método de degelo. Os resultados destacam a necessidade de mais pesquisas para melhorar o desempenho e reduzir os custos iniciais desses sistemas em comparação com aquecimento baseado em combustão de hidrocarbonetos principalmente. O estudo fornece informações valiosas para pesquisadores, empresas de energia renovável e agentes políticos e reforça o uso de DX-SAHP como alternativa viável.

Rabelo *et al.* (2023) neste estudo contribuíram para a compreensão do comportamento de dispositivos de expansão dentro de sistemas de bombas de calor, focando especificamente aqueles que operam com energia solar. Em particular, a investigação se concentra em uma bomba de calor assistida por energia solar de expansão direta (DX-SAHP) utilizando CO₂ como fluido refrigerante. Ao examinar dados experimentais, o estudo propõe uma nova correlação

para elucidar a complexa relação entre a abertura da válvula de expansão e a taxa de fluxo de massa. Essa correlação integra vários parâmetros, incluindo pressões de saída e entrada, fatores geométricos e viscosidade do fluido, para fornecer uma análise abrangente. Notavelmente, a correlação proposta demonstra um alto nível de concordância com os resultados experimentais, mostrando sua precisão e confiabilidade. Além disso, o estudo revela uma correlação significativa entre o fluxo de radiação solar e a taxa de fluxo de massa, lançando luz sobre a interação dinâmica entre fatores ambientais e desempenho do sistema.

Tratando-se especificamente sobre o estudo e seleção de fluidos refrigerantes, Duarte *et al.* (2019) apresentaram uma análise teórica e experimental da seleção de refrigerantes para um sistema de bomba de calor com assistência solar para aquecimento de água residencial. O estudo teve como objetivo identificar refrigerantes com baixo impacto ao meio ambiente, alta eficiência térmica e boa viabilidade econômica. Os autores avaliaram o desempenho do sistema com diferentes refrigerantes, como R134a, R290, R600a, R744 e R1234yf. Os resultados mostraram que o R134a possui a maior eficiência térmica. Por outro lado, o R290 possui o menor GWP e é o refrigerante mais economicamente viável, mas sua inflamabilidade é uma preocupação importante. Com base nos resultados da simulação e em uma avaliação abrangente do impacto ambiental, eficiência térmica e viabilidade econômica, o estudo indicou o uso do R290 como o refrigerante mais adequado para a bomba de calor assistida por energia solar para a produção de água quente doméstica. Em geral, o estudo forneceu informações importantes sobre a seleção de refrigerantes para bombas de calor assistidas por energia solar, e com destaque para a necessidade de uma avaliação abrangente do impacto ambiental, eficiência térmica e viabilidade econômica durante a seleção do refrigerante.

Diniz *et al.* (2023), apresentaram uma análise 4E's de uma DX-SAHP que trabalho com fluido R290 localizada em Belo Horizonte, Minas Gerais. No trabalho desenvolvido foi utilizado um refrigerante de baixo potencial de aquecimento global (GWP) R290, selecionado como a melhor opção entre seis candidatos anteriormente examinados (R152a, R744, R1234yf, R1234ze(E), R170, R290), a DX-SAHP utilizada foi projetada para a produção de água quente doméstica. A validação do modelo proposto pelos autores foi realizada utilizando uma configuração de teste experimental especificamente desenvolvida para a pesquisa. Os resultados indicam que o aumento da área do evaporador produz melhorias no COP (117 e 80,4%) e as maiores reduções no TEWI (53,8 e 44,5%) para temperaturas finais de água de 45 e 65°C, respectivamente.

Como apresentado, diversos estudos têm sido realizados em diferentes frentes de pesquisa com intuito de entender melhor o funcionamento de componentes fundamentais para

a operação de equipamentos. Possíveis soluções para os desafios que a humanidade enfrentará para manter a capacidade, confiabilidade, qualidade e eficiência dos processos já existentes também foram mencionadas.

TABELA 1. Principais artigos que auxiliaram na condução do trabalho.

Autores	Ano	Por que foi utilizado?
Eames, Milazzo e Maidment	2014	Modelagem matemática semiempírica de VET.
Kim e Braun	2016	Modelagem matemática semiempírica de VET.
Peng <i>et al.</i>	2016	Dispositivos de expansão.
Liu <i>et al.</i>	2018	Dispositivos de expansão.
Alireza Behfar e David Yuill	2018	Modelagem matemática semiempírica de VET.
Duarte <i>et al.</i>	2019	Fluidos refrigerantes (R290).
Rabelo <i>et al.</i>	2019	DX-SAHP R134a.
Kong <i>et al.</i>	2020	DX-SAHP R134a/R290.
Yang <i>et al.</i>	2021	DX-SAHP.
Rabelo <i>et al.</i>	2023	DX-SAHP CO ₂ (controle vazão de fluido).
Diniz <i>et al.</i>	2023	DX-SAHP R290.

2.8. Considerações finais

Neste capítulo, foram abordados os fundamentos essenciais para a compreensão e desenvolvimento do modelo matemático semiempírico da válvula de expansão termostática. Ao longo deste estudo, buscamos estabelecer uma sólida base teórica, compreendendo desde os princípios de funcionamento da VET até a aplicação da regressão linear múltipla como ferramenta para o desenvolvimento do modelo. Através da revisão da literatura, foi possível identificar a importância do dispositivo de expansão no ciclo termodinâmico e, em particular, a relevância da VET devido à sua rápida resposta e eficiente controle do grau de superaquecimento do refrigerante. Ademais, nenhum trabalho de cunho experimental foi encontrado para VET operando com o fluido R290 em bombas de calor assistidas por energia solar. Assim, o presente trabalho vem no sentido de preencher uma lacuna existente na literatura. No próximo capítulo, apresentaremos a metodologia utilizada para a execução dos testes e elaboração do modelo, é apresentado também o equipamento utilizado e seus instrumentos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentadas informações relacionadas aos materiais utilizados para a execução do trabalho, bem como o método, as principais equações, *softwares* e instrumentos usados para medições. Também é explicado todo o processo de aquisição dos dados e sua tratativa, além de uma apresentação das incertezas envolvidas nas medições. O trabalho foi executado através de metodologia científica focada em coleta e análise de dados experimentais. Para isso, foi constituída uma bancada de testes. O modelo matemático semiempírico apresentado no próximo capítulo foi concebido através da execução de testes experimentais organizados e estruturados, coletando-se os dados, tratando e analisando-os.

Salienta-se que o protótipo apresentado neste trabalho faz parte do acervo de equipamentos do GREA (Grupo de Refrigeração e Aquecimento) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais. Este equipamento já foi utilizado para o desenvolvimento de outros trabalhos de pesquisa: Diniz (2017), Oliveira (2021) e Diniz (2023).

3.1. Descrição da bancada de testes

A bancada de testes consiste em uma bomba de calor a propano (R290), de expansão direta e assistida por energia solar (DX-SAHP), conforme a Figura 5. O fluido usado neste equipamento é considerado de baixo impacto ambiental devido ao seu baixo GWP e TEWI de acordo com o trabalho apresentado por Duarte (2019). Conforme mostrado nas Figuras 6 a 9, esta bancada conta com dois condensadores, um coaxial e um submerso, que trabalham em paralelo, podendo ser selecionado um por vez em cada tipo de ensaio. Também conta com dois evaporadores, um convencional por ventilação forçada de ar e um coletor solar térmico tipo placa plana responsável pela absorção de energia solar, além de um compressor hermético de rotação fixa.



FIGURA 5. Protótipo utilizado no estudo - BDC R290.

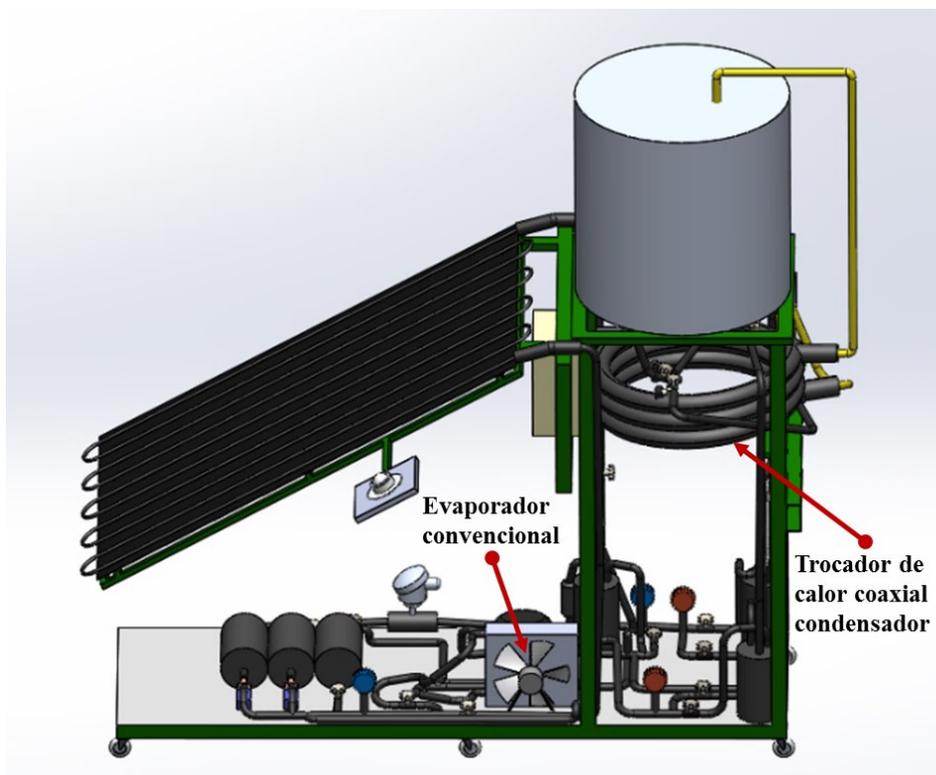


FIGURA 6. Vista em CAD da lateral esquerda do protótipo.

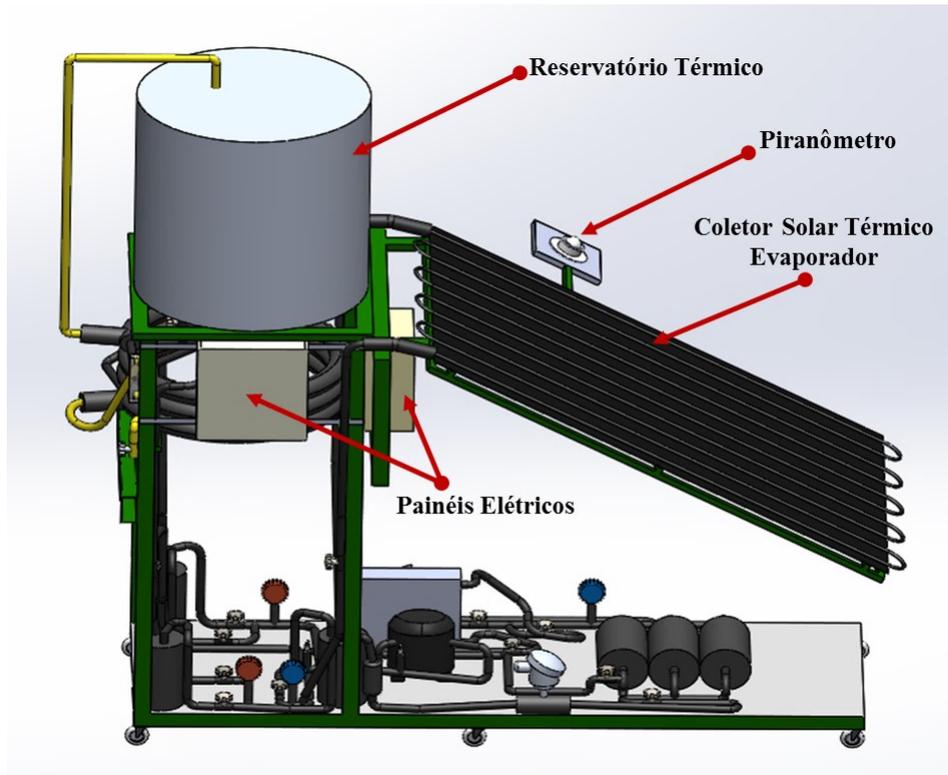


FIGURA 7. Vista em CAD da lateral direita do protótipo.

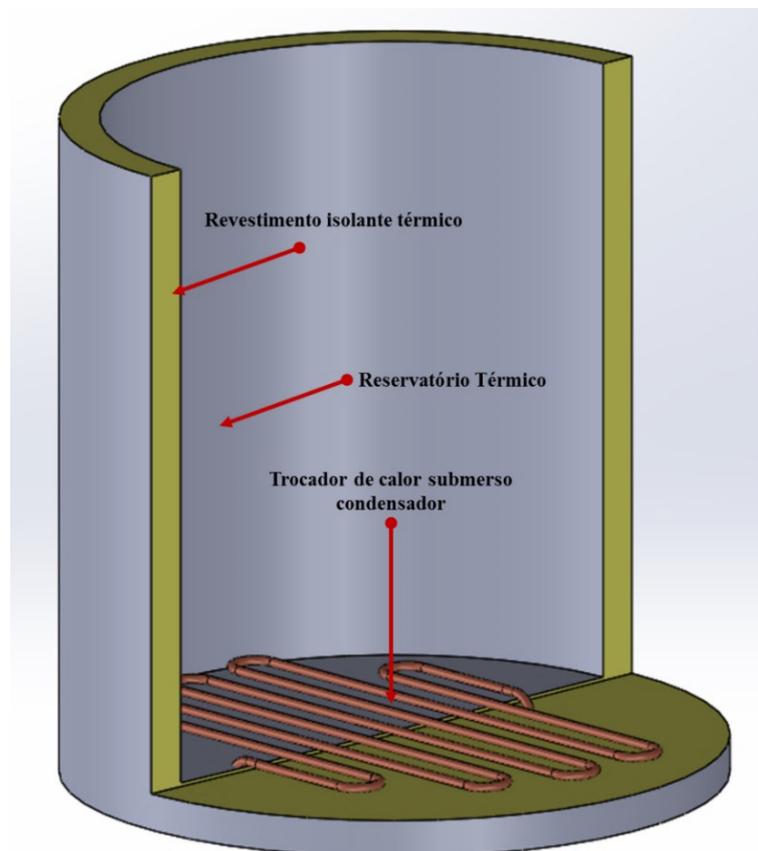


FIGURA 8. Reservatório térmico em CAD. Fonte: Adaptado de Diniz (2023).

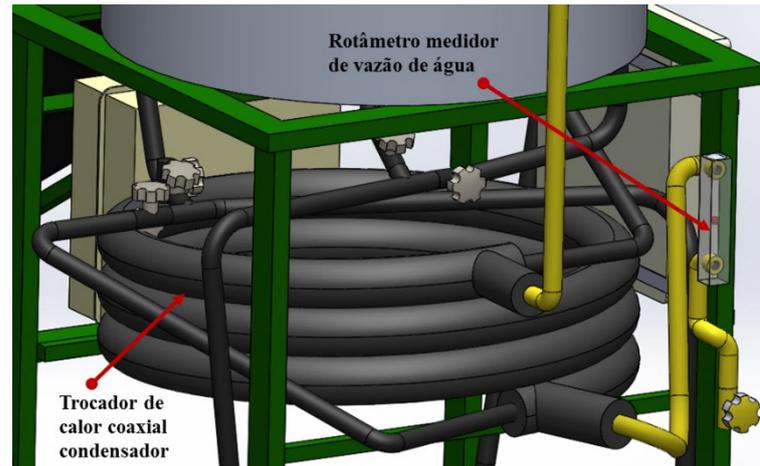


FIGURA 9. Condensador coaxial, projeto em CAD.

O equipamento também conta com dois componentes de expansão do fluido refrigerante: sistemas de tubos capilares, que estão distribuídos em três diferentes configurações e que podem ser ajustados para trabalharem em conjunto ou individualmente e válvula de expansão termostática, conforme apresentado na Figura 10. O equipamento conta com um tanque de armazenamento de água quente de capacidade 200 litros etambém com acessórios que proporcionam segurança para o equipamento durante sua operação e uma base de instrumentação robusta.

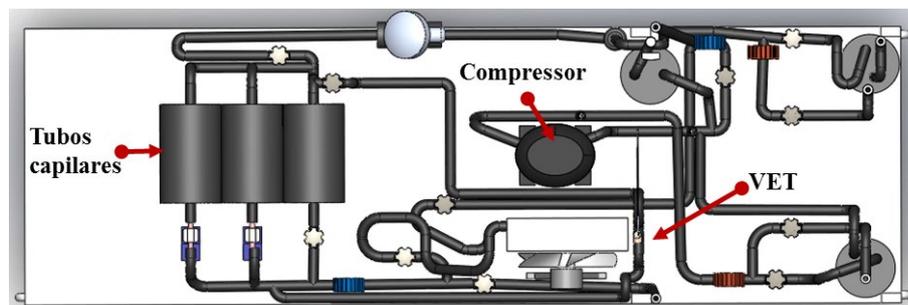


FIGURA 10. Vista de cima CAD, apresentação parcial dos componentes BDC R290. Fonte: Adaptado de Diniz (2023).

Dos acessórios adicionais, destacam-se: garrafa separadora de óleo, posicionado após o compressor e trabalha na separação dos fluidos lubrificante e de trabalho e redirecionamento do óleo lubrificante de volta para o compressor hermético; garrafa acumuladora de líquido, posicionada após os condensadores, cuja função é garantir fluido em estado monofásico líquido na VET; filtro secador, que atua na retirada de umidade presente no fluido refrigerante; garrafa separadora de líquido, assessorio posicionado na entrada do compressor, que atua na prevenção

da aspiração de líquido pelo compressor. A Figura 11 apresenta um diagrama com toda a estrutura que compõe o equipamento. Este diagrama é parte da tese de doutorado de Diniz (2023) e foi adaptado para este trabalho por se tratar do mesmo equipamento. A Tabela 2 apresenta a descrição dos instrumentos identificados na Figura 11.

TABELA 2. Descrição dos instrumentos apresentados na Figura 11.

Termopares	
T1: Entrada do compressor	T8: Entrada da água no condensador coaxial
T2: Saída do compressor	T9: Saída da água no condensador coaxial
T3: Entrada dos condensadores	T10: Água no reservatório
T4: Saída dos condensadores	T11: Placa do evaporador (coletor) solar
T5: Entrada dos dispositivos de expansão	T12: Ar na saída do evaporador convencional
T6: Entrada dos evaporadores	T13: Carcaça do compressor
T7: Saída dos evaporadores	T14: Ar ambiente
Manômetros	
M1: Entrada do compressor	M3: Saída dos condensadores
M2: Saída do compressor	M4: Entrada dos evaporadores
Transdutores de pressão	
TP1: Entrada do compressor	TP2: Saída do compressor

Fonte: Adaptado de Diniz (2023).

A bomba de calor solar de expansão direta (DX-SAHP) utilizada neste trabalho possui diversas configurações possíveis para sua operação, como explica Diniz (2023) e é apresentado pela Tabela 3. Neste trabalho, foi utilizada a configuração apresentada na Figura 12, que visa priorizar fatores importantes para o estudo: utilização do coletor solar térmico como evaporador; utilização da VET como dispositivo de expansão; trocador de calor coaxial como trocador de calor. O uso desta configuração se explica pelos seguintes atributos: a VET é o objeto de estudo principal do trabalho; interferência da irradiação solar durante os experimentos; uso do condensador coaxial de contracorrente, que proporciona melhor estabilidade do sistema.

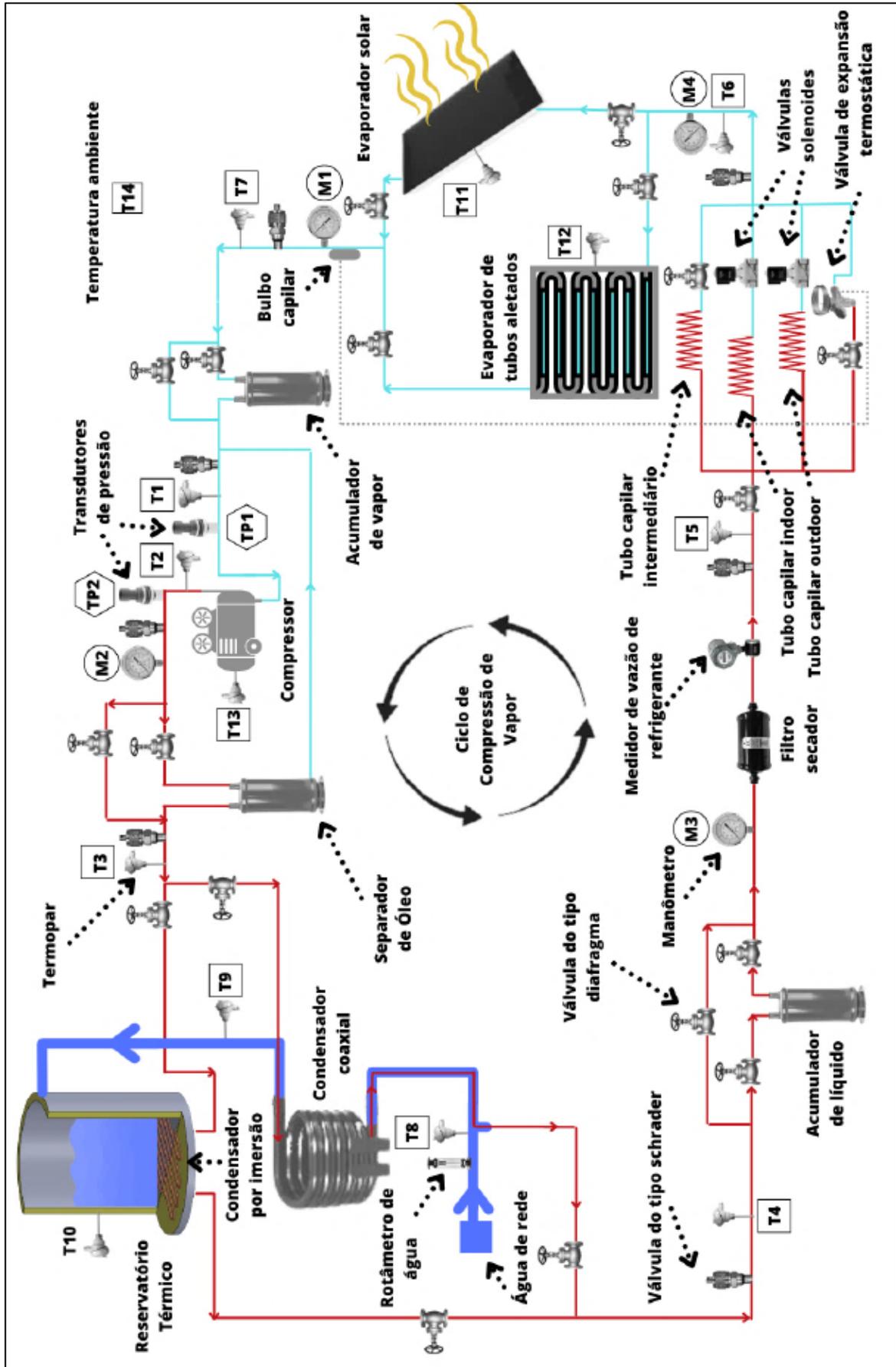


FIGURA 11. Diagrama do ciclo de compressão com equipamentos e componentes. Fonte: Diniz (2023).

TABELA 3. Possíveis formas de configuração e utilização da DX-SAHP.

Dispositivo de Expansão	Evaporador	Condensador
VET	Coletor Solar	Coaxial
		Submerso
	Convencional	Coaxial
		Submerso
Tubos Capilares	Coletor Solar	Coaxial
		Submerso
	Convencional	Coaxial
		Submerso

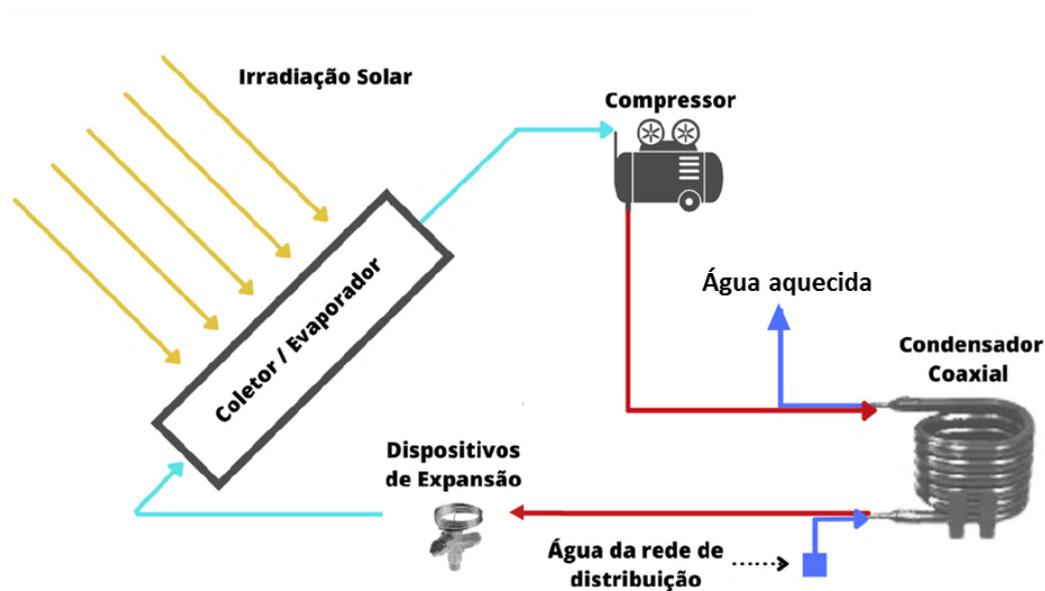


FIGURA 12. Configuração simplificada utilizada para execução dos experimentos. Fonte: Adaptado de Diniz (2023).

3.2. Válvula de expansão termostática

A válvula de expansão termostática é parte fundamental da bomba de calor, permitindo o controle da vazão mássica de fluido refrigerante que circula pelo ciclo termodinâmico através do ajuste do grau de superaquecimento que será imposto ao final do processo de evaporação. Este controle é feito de acordo a abertura ou fechamento da válvula que acontece através do posicionamento do pino de estrangulamento conforme mostrado na Figura 13. Esse pino se movimenta de acordo com as forças aplicadas tanto pelo fluido no sentido de abri-lo, como da

mola, que tende a fechá-lo, implicando ajuste na área de passagem do fluido. De forma prática, este ajuste é realizado através de um parafuso que, ao ser acionado, comprime ou destende a ação sobre a mola, permitindo controlar o grau de superaquecimento do sistema. Para cada volta completa do parafuso, o grau de superaquecimento pode variar em torno de 2,5 °C.



FIGURA 13. Visão dos componentes internos de uma VET.

O foco deste trabalho é a modelagem da VET. Conforme apresentado por Diniz (2023), a válvula foi selecionada por meio da utilização do software Coolselector (2021), a fabricante da VET é a empresa dinamarquesa Danfoss® e está disponível no mercado nacional. Como apresentam as Figuras 14 e 15, ela foi projetada para trabalhar com o fluido R290 e possui uma faixa de operação ótima de -40 a 10 °C, pressão máxima suportada de 34 bar e capacidade de refrigeração nominal de 2,55 kW.



FIGURA 14. Válvula de expansão termostática utilizada no protótipo. Fonte: Diniz (2023).



FIGURA 15. Informações de fábrica contidas no topo da VET.

3.3. Plano de ensaios

Os experimentos realizados seguiram uma rígida metodologia, visando a máxima confiabilidade dos dados coletados. Todos os dados foram obtidos em regime permanente e, para isso, as medições foram lançadas após a máquina estar há pelo menos 5 minutos ininterruptos sem variação significativa de seus parâmetros internos (sem variação do grau de superaquecimento em 1° para mais ou para menos) e nem exposta a variações de condições externas como, por exemplo, oscilações de irradiação solar maiores que 50 W/m². Alguns dados foram obtidos por meio de fotografia como, por exemplo, manômetros de Bourdon, rotâmetro medidor de vazão de água e o wattímetro digital. Os demais foram registrados por meio do sistema de aquisição de dados.

Ao final da coleta dos dados, a informação obtida é o resultado da média aritmética de todos os dados coletados dentro de 1 minuto de aquisição, sendo que essa foi realizada de 1 em 1 segundo, somando um conjunto de 60 dados para execução dessa média. O processo se repetiu para todos os pontos coletados, para cada ponto correspondente a um ciclo de operação da bomba de calor. As únicas modificações realizadas na máquina entre os testes foram o ajuste da vazão de água, visando manter ou atingir determinado patamar de temperatura de água aquecida, bem como o número de voltas de abertura da VET, visando variar o grau de superaquecimento do fluido refrigerante.

Os experimentos foram conduzidos buscando alternar os modos de operação da bomba de calor, mas nunca a configuração do ciclo. Para isso, a máquina foi exposta a diferentes níveis de radiação solar, como, por exemplo: experimentos “*outdoor*” (área externa) com dia ensolarado e céu limpo e dia nublado; experimento “*indoor*” (dentro do laboratório) sem

radiação solar, tendo como fonte de calor apenas a convecção natural com o ambiente, conforme apresentado na Figura 16.

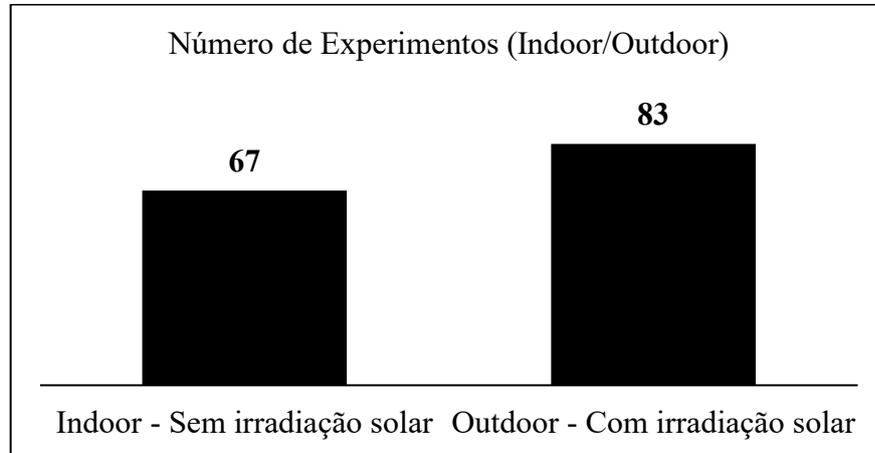


FIGURA 16. Distribuição dos experimentos realizados por presença de irradiação.

Todos os resultados obtidos foram organizados e sintetizados em um banco de dados, do qual se extraíram as variáveis de entrada e saída da VET para desenvolver a correspondente regressão linear múltipla. O modelo matemático que descreva o comportamento da VET em regime permanente leva em consideração as principais grandezas físicas envolvidas no sistema, como, por exemplo, pressões, grau de superaquecimento do fluido na entrada do compressor, temperatura ambiente e radiação solar conforme apresentado na Figura 17.

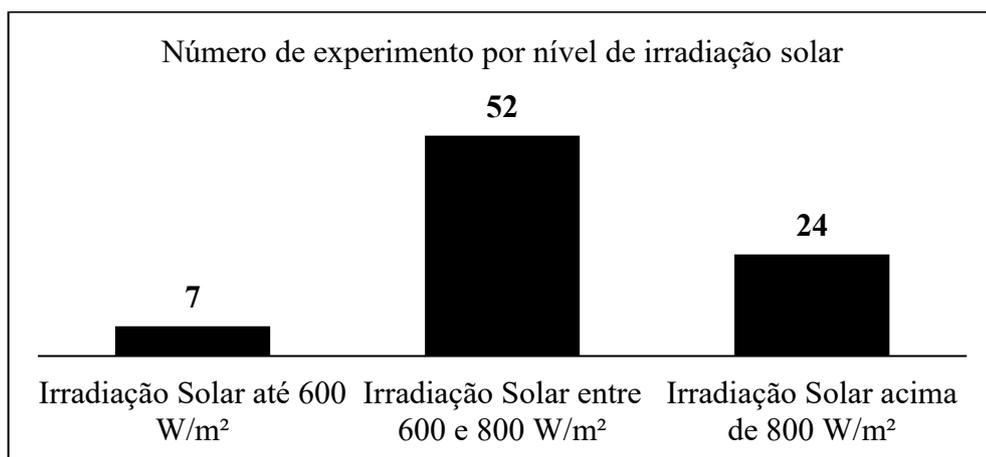


FIGURA 17. Número de experimentos por grupo de nível de irradiação solar medida.

Ao todo, foram realizados 150 experimentos, conforme mostram as Figuras 18 e 19, nas quais se podem observar a variação do grau de superaquecimento e o número de voltas de abertura da VET durante os ensaios.

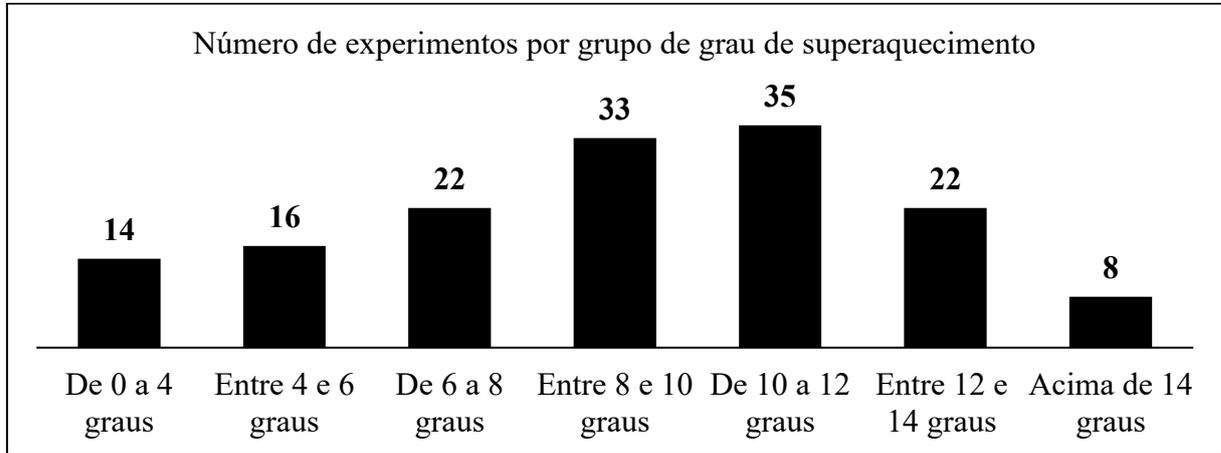


FIGURA 18. Distribuição dos experimentos por grupo de grau de superaquecimento.

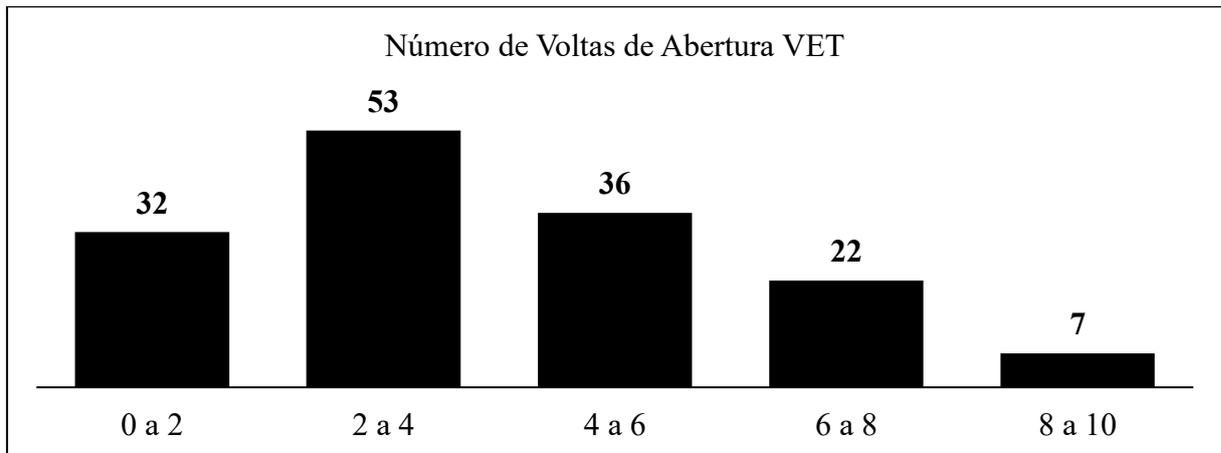


FIGURA 19. Número de experimentos por grupo de voltas de abertura da VET.

3.4. Instrumentação aplicada

O protótipo utilizado conta com dispositivos de instrumentação para medição dos principais parâmetros operacionais, como temperaturas, pressões, vazões, potência e irradiação solar, entre outros. Os instrumentos podem ser divididos em dois grupos: instrumentos que possuem integração com os sistemas de aquisição de dados e que, por esse motivo, possuem um sistema automatizado de coleta; instrumentos analógicos juntamente com instrumentos digitais que não possuem integração com os sistemas de aquisição e que, por esse motivo,

necessitam coleta de dados manual. A Tabela 4, lista todos os instrumentos presentes no protótipo juntamente com algumas informações sobre eles.

TABELA 4. Lista de instrumentos utilizados.

Instrumento	Quant.	Fabricante	Modelo	Leitura	Identificação
Termopares	16	Mit Exacta	Tipo K	Automática	Figura 20a
Transdutor de pressão	1	Fueltech	PS-20B	Automática	Figura 21a
Transdutor de pressão	1	Fueltech	PS1500	Automática	Figura 21a
Manômetro de Bourdon	2	EOS	G6805L	Manual	Figura 20b
Manômetro de Bourdon	2	EOS	G6805H	Manual	Figura 20c
Wattímetro digital	1	Puucal	P06S-100	Manual	Figura 21b
Rotâmetro	1	Shllj	LZM-15	Manual	Figura 21c
Medidor de vazão	1	Contech	FMT-8.6	Automática	Figura 22a
Piranômetro	1	Eppley	8-48	Automática	Figura 22b
Balança de precisão	1	Marte	AC 10K	Manual	Figura 23a
Termo-higro-anemômetro digital	1	Akso	AK821	Manual	Figura 24a
Sistema de aquisição de dados	1	National Instruments	USB-9213	Automática	Figura 24b
Sistema de aquisição de dados	1	National Instruments	USB-6211	Automática	Figura 24b
Inclinômetro Analógico	1	Western	MA-180	Manual	Figura 23b

Todo instrumento de medição deve ser calibrado para garantir a confiabilidade dos valores coletados. Tanto fabricantes de dispositivos de instrumentação quanto laboratórios credenciados possuem equipamentos e técnicas que permitem a calibração dos instrumentos seguindo as normas do INMETRO e garantindo confiabilidade e rastreabilidade. Visto isso, todos os instrumentos utilizados na execução do trabalho seguem as incertezas padrão informadas pelo fabricante. Na próxima seção deste capítulo, são apresentadas as devidas incertezas de cada instrumento utilizado.

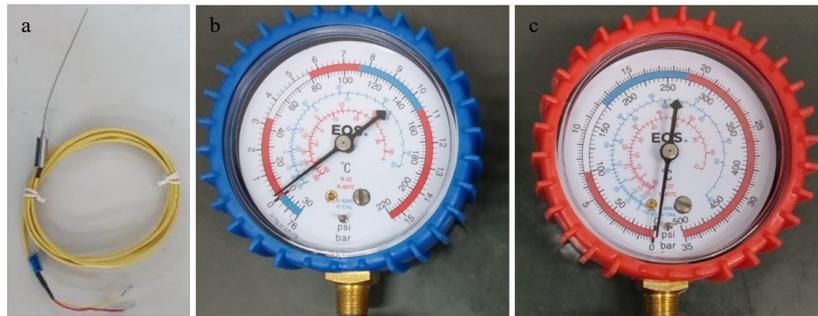


FIGURA 20. (a) Termopar Tipo K (b) Manômetro de Bourdon EOS 15 bar (c) Manômetro de Bourdon EOS 35 kgf/cm².

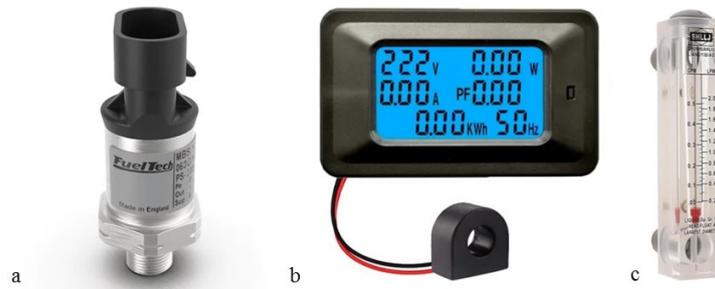


FIGURA 21. (a) Transdutor de pressão FUELTECH (b) Wattímetro digital (c) Rotâmetro.

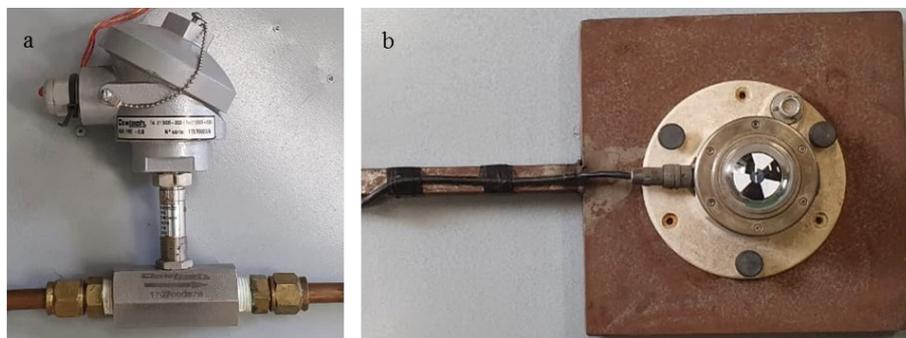


FIGURA 22. (a) Medidor de vazão de refrigerante Contech (b) Piranômetro Eppley.



FIGURA 23. (a) Balança digital de precisão; (b) Inclinação analógica base magnética.

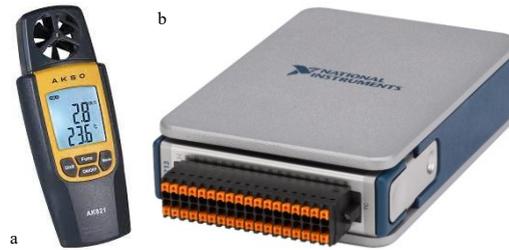


FIGURA 24. (a) Termo-higro-anemômetro digital ASKO (b) Sistema de aquisição de dados National Instruments.

O software LABVIEW® foi utilizado durante o trabalho para a leitura e tratamento dos sinais provenientes dos instrumentos que possuíam coleta automática e estavam interligados ao sistema de aquisição de dados. A Figura 25 apresenta a interface criada dentro do programa para acompanhamento e registro dos dados. O software permite realizar a conversão dos sinais recebidos em grandezas físicas, facilitando a interpretação das informações e possibilitando o monitoramento do sistema em tempo real.

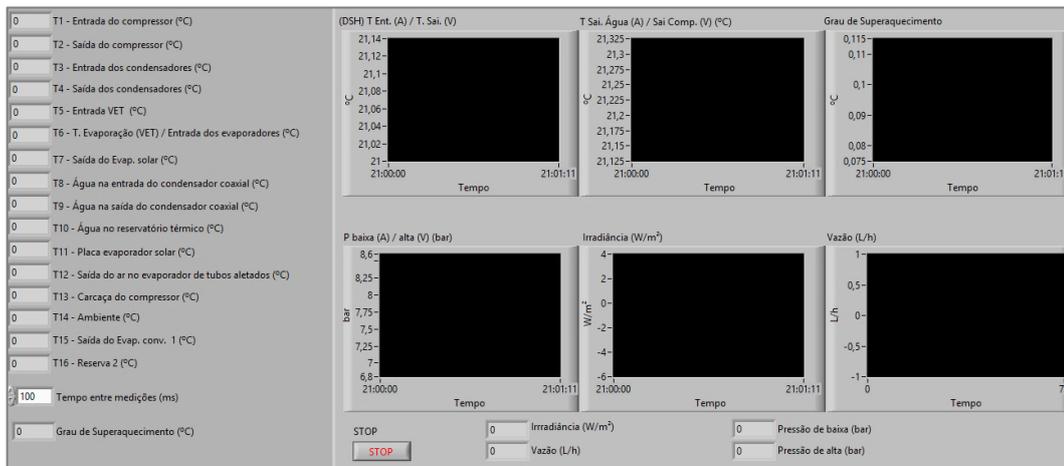


FIGURA 25. Interface de controle elaborada para acompanhamento dos experimentos.

3.5. Incerteza de medição

O cálculo de incertezas de medição é um processo que consiste em determinar a magnitude da incerteza associada a uma medição realizada em um instrumento. Isso é importante porque todas as medições possuem incertezas inerentes devido a diversos fatores, como variação de temperatura, pressão e umidade ambientes, desgaste do instrumento, entre outros. O processo de cálculo de incertezas envolve várias etapas, que podem variar dependendo do tipo de instrumento e do método de medição. De maneira geral, a primeira etapa

consiste em identificar todas as fontes de incerteza que podem afetar a medição, incluindo as incertezas do próprio instrumento, das condições ambientais e dos métodos de medição. Em seguida, é necessário quantificar cada fonte de incerteza utilizando informações de calibração, especificações de cada instrumento, manual técnico do instrumento ou análises estatísticas. Para a execução dos testes e obtenção de dados de funcionamento do protótipo, foram utilizados os instrumentos com as incertezas apresentadas na Tabela 5.

TABELA 5. Instrumentação DX-SAHP - R290.

Instrumento	Quant.	Faixa de Medição	Incerteza padrão
Termopar tipo K	16	-50–150 °C	± 1 °C
Transdutor de pressão (pressão de baixa)	1	0–20 bar	± 0,1 bar (0,5% do fundo de escala)
Transdutor de pressão (pressão de alta)	1	0–102 bar	± 0,5 bar (0,5% do fundo de escala)
Manômetro de Bourdon (pressão de baixa)	2	0–15 bar	± 0,15 bar (1% do fundo de escala)
Manômetro de Bourdon (pressão de alta)	2	0–35 kgf/cm ²	± 0,35 kgf/cm ² (1% do fundo de escala)
Wattímetro digital	1	0–1500 W	± 1%
Rotâmetro	1	0–2 L/min	± 2%
Medidor de vazão (tipo turbina)	1	0–50 L/h	± 1%
Piranômetro	1	0–2000 W/m ²	± 5%
Balança de precisão	1	0–10 kg	± 0,1 g ± 0,9 m/s
Termo-higro- anemômetro digital	1	4–20 m/s 5–95 %	(3% do fundo de escala) ± 2% (umidade relativa do ar)

Fonte: Adaptado de Diniz (2023).

Com as incertezas quantificadas, é possível realizar o cálculo da incerteza combinada, que é a soma quadrática de todas as incertezas individuais apresentada pela Equação 9. Esse valor representa a magnitude da incerteza total associada à medição realizada com o instrumento em questão.

$$u_Y = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial Y}{\partial X_i}\right)^2 u_{X_i}^2} \quad (9)$$

Onde u_Y representa a incerteza padrão combinada do parâmetro Y calculada em função da incerteza padrão u_{X_i} da variável X_i . A incerteza padrão expandida é comumente utilizada para relatar um determinado resultado dentro de um intervalo com certa confiabilidade estipulada. Essa incerteza padrão expandida representada por U é obtida através da multiplicação da incerteza padrão combinada u_Y por um fator de abrangência k , como segue na Equação 10.

$$U = k \cdot u_Y \quad (10)$$

O fator de abrangência k está relacionado ao intervalo de confiança desejado para a incerteza padrão. O valor do fator de abrangência depende do nível de confiança desejado e do número de graus de liberdade associados às medições. Geralmente, são utilizados valores de k tabelados ou calculados a partir de distribuições estatísticas, como a distribuição t de Student.

3.6. Softwares utilizados

Durante a execução do presente trabalho, fez-se necessária a utilização de softwares de engenharia, cálculos e estatística para auxiliar na tomada de dados, organização, interpretação e cálculo deles. Durante a fase de experimentação, o software LABVIEW® foi utilizado em conjunto com o equipamento de aquisição de dados para a tomada das informações em tempo real dos experimentos em execução. Posteriormente, o software EXCEL® foi utilizado para o armazenamento e organização destes dados. Com o auxílio do software EES®, foi possível executar os modelos termodinâmicos para a obtenção dos dados de processo, e estas informações, por fim, formaram a base que alimentou o modelo de regressão múltipla linear dentro do software EXCEL®.

3.7. Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentado o protótipo utilizado, bem como seus principais componentes e instrumentos. O método utilizado para a execução dos experimentos foi exposto e considerações adicionais necessárias para a criação do modelo da VET e interpretação dos resultados foram apresentadas. Munidos das incertezas que cada instrumento carrega consigo e cientes de todos os processos e procedimentos adotados é possível a elaboração do modelo da VET, cuja descrição é apresentada no próximo capítulo.

4. MODELO

Este capítulo tem como objetivo a apresentação de um modelo semiempírico para a válvula de expansão termostática, combinando o modelo fundamental para determinação da vazão mássica com uma abordagem de regressão linear múltipla baseada em dados experimentais. O modelo proposto capta os principais efeitos que influenciam o desempenho da VET, considerando fatores como as propriedades do fluido refrigerante, as condições operacionais, as condições externas/ambientais e o comportamento dinâmico da válvula em resposta a variações de carga térmica.

Este capítulo está estruturado da seguinte forma: inicialmente, serão apresentadas as considerações básicas necessárias para a elaboração do modelo, seguindo a apresentação do modelo fundamental utilizado como base para determinar a vazão mássica na válvula de expansão termostática. Em seguida, será apresentada a abordagem de regressão linear múltipla utilizada para relacionar os dados experimentais com os parâmetros do modelo fundamental. Posteriormente, será discutida a metodologia por trás da escolha das variáveis relevantes para o desenvolvimento do modelo semiempírico. Por fim, será realizada a integração dos modelos e variáveis para obter o modelo semiempírico completo da válvula de expansão termostática.

4.1. Condições para o modelo

A elaboração do modelo matemático envolveu as seguintes considerações gerais:

- O sistema opera em regime permanente durante a coleta dos dados;
- O compressor trabalha com rotação fixa e constante;
- Variações de energia cinética e potência do fluido refrigerante são desprezíveis;
- O condensador coaxial e o coletor solar térmico de placa plana possuem perdas de pressão constantes e detectadas pela variação de pressão entre sensores presentes nas entradas e saídas de cada trocador de calor;
- As perdas de pressão em tubos, conexões e válvulas são desprezíveis;
- As perdas de calor em tubos, conexões e válvulas são desprezíveis;
- O processo de expansão do fluido na VET acontece de forma isoentálpica;
- O sistema não apresenta nenhum tipo de vazamento de fluido;

- Os acessórios de linha, filtro de linha, garrafa separadora de óleo, garrafa acumuladora de líquido e garrafa separadora de líquido possuem queda de pressão desprezível.

4.2. Cálculo da vazão mássica

Para realizar o cálculo da vazão mássica é necessário realizar um balanço de energia no condensador da máquina, onde ocorre o aquecimento de água para uso doméstico. O balanço de energia é baseado na conservação da energia total do sistema, considerando todas as formas de energia envolvidas. Para realizar o balanço de energia, é necessário conhecer todos os dados relevantes do sistema, tais como as temperaturas e pressões do fluido refrigerante antes e depois do condensador, a temperatura e o fluxo de entrada de água, a capacidade térmica do condensador.

O cálculo da vazão mássica pode ser realizado utilizando a Equação 5, conforme apresentado na seção 2.1 do capítulo 2. Resolvendo esta equação para \dot{m}_r , podemos obter o valor da vazão mássica do fluido refrigerante que será utilizada durante a elaboração do modelo.

4.3. Equação base da VET

A equação base da VET constitui a base para a determinação da vazão mássica do refrigerante. Esse modelo leva em consideração os princípios de transferência de calor e massa, bem como os fenômenos de expansão e compressão do fluido refrigerante. No contexto do modelo semiempírico proposto, a equação base da VET é representada pela Equação 7. Nessa equação, o C_d é variável e dependente do projeto e das características mecânicas de cada válvula de expansão termostática.

4.4. Regressão Linear Múltipla

Para complementar o modelo e incorporar os efeitos de fatores específicos e complexos, como as características dinâmicas do sistema e a influência de diferentes variáveis operacionais, foi utilizada uma abordagem de regressão linear múltipla. Essa técnica estatística permitiu a identificação das relações empíricas entre os dados experimentais coletados e os parâmetros do modelo fundamental. O modelo empírico (caixa-preta) restringe-se apenas a métodos estatísticos e matemáticos para relacionar saídas (resultados) a entradas (variáveis), e isso se dá

por meio de regressões, ajustes, aproximações, séries, somatórias entre outras ferramentas matemáticas.

Para a determinação de um C_d específico foi usada uma regressão linear múltipla, onde foram testadas diversas entradas (variáveis) que se ajustaram ou não a uma determinada saída. Essa regressão tem a forma da Equação 8. Neste ponto, o modelo base foi combinado com a regressão linear múltipla, substituindo-se o coeficiente de descarga C_d por uma equação empírica com variáveis significativas e suas interações. Através dessa abordagem, foi possível melhorar a precisão do modelo ao capturar as nuances e as influências de múltiplos fatores que afetam o desempenho da VET. O resultado esperado é apresentado na forma proposta na Equação 11.

$$\dot{m}_r = (\beta_0 + \beta_1 X_a + \beta_2 X_b + \dots + \beta_n X_n) * \sqrt{(P_1 - P_2) \rho_{e,vet}} \quad (11)$$

Onde β é o coeficiente de regressão para a dada variável X de entrada, \dot{m}_r é a vazão mássica de refrigerante no ciclo termodinâmico, P_1 é a pressão de entrada da válvula de expansão, P_2 é a pressão de saída e $\rho_{e,vet}$ representa a densidade do fluido na entrada da válvula em estado líquido.

4.5. Teste de variáveis

Diversas variáveis foram elencadas para a definição de quais seriam utilizadas na regressão linear múltipla. Na Tabela 6 são apresentadas todas as variáveis elencadas com a correspondente justificativa. Desta forma, a equação que define o coeficiente de descarga C_d é a do tipo apresentado pela Equação 12, onde a saída da regressão linear múltipla (Y) é função das variáveis definidas na Tabela 6.

$$Y(C_d) = X(\Delta T_{SA}, P_1, P_2, I_{solar}, V_{\acute{a}gua}) \quad (12)$$

A Tabela 7 justifica o porquê de tais variáveis apresentadas na equação 12 terem sido escolhidas como variáveis de entrada para o modelo final.

TABELA 6. Variáveis elencadas para regressão.

Variável	Descrição	Justificativa
ΔT_{SA}	Grau de superaquecimento	Variável controlada diretamente pela VET.
P_1	Pressão do fluido na entrada da VET	Essa pressão “empurra” o fluido para dentro da VET.
P_2	Pressão do fluido na saída da VET	Essa pressão representa uma resistência no fluxo dentro da VET, e está relacionada ao posicionamento das partes móveis da VET
I_{solar}	Irradiação solar medida	A variação da intensidade de radiação solar implica em mudanças diretas no processo de evaporação do fluido, que, por sua vez, impacta o grau de superaquecimento controlado pela VET.
$V_{água}$	Vazão de água	A vazão de água que passa pelo condensador para ser aquecida define a carga térmica que o sistema terá que vencer, e esse fornecimento de energia depende da vazão mássica que passa pela VET.
T_{amb}	Temperatura ambiente	A variação da temperatura ambiente altera o ponto de operação da DX-SAHP e desta forma altera o comportamento da VET
$x_{saída}$	Título na saída da VET	O título do fluido na saída da VET está diretamente relacionado com o processo de expansão do fluido que acontece dentro da VET.

4.6. Estrutura do modelo semiempírico

Para gerar um modelo matemático semiempírico para a VET, pode-se iniciar pela coleta de dados experimentais. Para desenvolver um modelo semiempírico, precisa-se coletar dados experimentais da VET em diferentes condições de operação. Os dados podem incluir pressões, temperaturas, vazões mássicas, grau de superaquecimento, irradiação solar, entre outros. Uma boa definição de quais dados são necessários para o modelo é parte importante deste processo. O diagrama da Figura 26 apresenta uma visão geral do modelo.

A elaboração e execução do modelo seguiu uma sequência lógica que pode ser compreendida através do fluxograma apresentado na Figura 27.

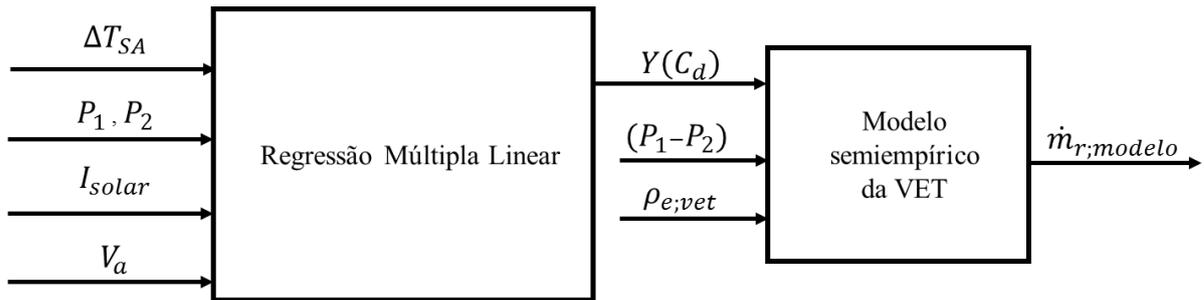


FIGURA 26. Diagrama de bloco com visão geral do modelo da VET.

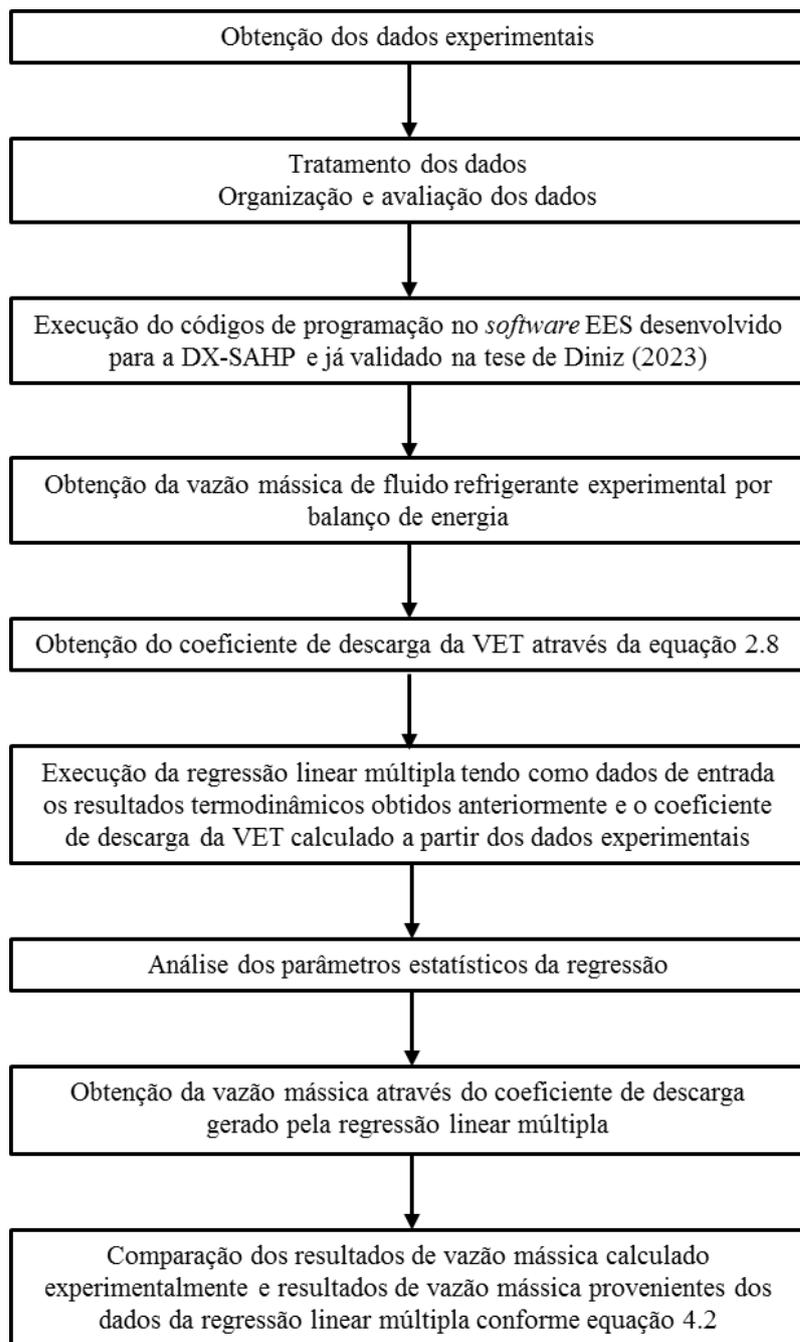


FIGURA 27. Fluxograma de execução do modelo.

4.7. Definição do modelo

Para a definição do modelo, existe uma combinação entre a equação base da VET, derivada das equações de Navier-Stokes, em conjunto com uma regressão linear múltipla baseada nos dados experimentais coletados. Desta forma, a Equação 13 representa o modelo matemático da VET, juntamente com a Equação 14.

$$\dot{m}_{r,modelo} = Y(C_d) * \sqrt{(P_1 - P_2)\rho_{e,vet}} \quad (13)$$

Onde, $Y(C_d)$ é:

$$Y(C_d) = \beta_0 + \beta_1\Delta T_{SA} + \beta_2P_1 + \beta_3P_2 + \beta_4I_{solar} + \beta_5V_{\acute{a}gua} \quad (14)$$

Onde os coeficientes de linearização β serão apresentados no capítulo de resultados.

4.8. Considerações finais

Neste capítulo foram abordados os principais aspectos relacionados à definição de um modelo matemático tipo semiempírico para uma válvula de expansão termostática. Através da utilização da equação base da VET e da técnica de regressão linear múltipla, foi possível estabelecer uma abordagem que combina a fundamentação teórica com dados experimentais coletados. No próximo capítulo, são apresentados os resultados obtidos a partir desse modelo semiempírico. Será possível verificar a sua eficácia na predição da vazão mássica da VET em diferentes condições operacionais e configurações. Além disso, são discutidas as vantagens e limitações desse modelo, bem como possíveis direções para futuras pesquisas e aprimoramentos.

5. RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos por meio da aplicação do modelo semiempírico desenvolvido para uma válvula de expansão termostática. Ao longo dos capítulos anteriores, foram exploradas a fundamentação teórica da VET, a definição do modelo matemático semiempírico e a análise das variáveis relevantes para a sua determinação. A partir dos dados experimentais coletados das equações mencionadas e do modelo estabelecido, foi possível observar a variação da vazão mássica do fluido refrigerante através da VET em diferentes condições operacionais. Os resultados obtidos fornecem informações valiosas sobre o desempenho da VET e sua capacidade de regular o fluxo de refrigerante de forma eficiente. Ao analisar os resultados, foi possível avaliar a precisão e a confiabilidade do modelo semiempírico proposto. Também são discutidas a validade das previsões do modelo em comparação com os valores medidos, bem como a influência das variáveis consideradas no processo de determinação da vazão mássica da VET.

5.1. Resultados dos testes de variáveis

De posse da vazão mássica do ciclo e com auxílio da Equação 7, foi possível obter o coeficiente de descarga da VET para cada experimento realizado. Este cálculo retorna o coeficiente de descarga instantâneo de cada ponto, representando a VET naquele momento. Este resultado é representado por $Y(C_d)$ que é dado pela saída da regressão linear múltipla, conforme apresentado na Equação 14. Por meio de consecutivas tentativas e erros, conforme apresentado pela Tabela 7, foram definidas 5 variáveis de entrada que, quando submetidas ao processo de regressão, se alinham com o melhor equilíbrio entre precisão para relacionar a saída com o *input* de entrada e o menor número de variáveis possível. Observa-se que o valor de R^2 diz respeito ao quão ajustado os dados utilizados para gerar a equação modelo estarão em relação aos novos resultados gerados pelo modelo, e o Desvio Médio diz respeito a distância média real avaliada dentro do conjunto de resultados gerados pelo grupo de variáveis selecionadas para aquele modelo. Um número menor de variáveis de entrada é importante para a diminuição da complexidade do modelo e por consequente promove um ganho computacional quando submetido a simulações.

TABELA 7. Resultados dos testes de variáveis para a regressão.

Teste	Variáveis elencadas	Resultado R ²	Desvio Médio
1	ΔT_{SA}	0,00011	27,69%
2	$x_{saída}$	0,83464	10,56%
3	I_{solar}	0,82198	8,94%
4	$P_1 P_2$	0,89076	6,83%
5	$\Delta T_{SA} P_1 P_2$	0,90464	6,65%
6	$P_1 P_2 I_{solar}$	0,91044	5,55%
7	$\Delta T_{SA} P_1 P_2 I_{solar}$	0,94966	5,14%
8	$\Delta T_{SA} P_1 P_2 T_{amb}$	0,92489	6,36%
9	$\Delta T_{SA} P_1 P_2 V_{água}$	0,92852	5,84%
10	$\Delta T_{SA} P_1 P_2 x_{saída}$	0,90547	6,74%
11	$P_1 P_2 I_{solar} V_{água}$	0,93568	5,15%
12	$\Delta T_{SA} P_1 P_2 I_{solar} x_{saída}$	0,95059	5,18%
13	$\Delta T_{SA} P_1 P_2 I_{solar} T_{amb}$	0,95368	4,94%
14	$\Delta T_{SA} P_1 P_2 I_{solar} V_{água}$	0,96475	4,34%
15	$\Delta T_{SA} P_1 P_2 I_{solar} T_{amb} V_{água}$	0,96477	4,33%
16	$\Delta T_{SA} P_1 P_2 I_{solar} V_{água} x_{saída}$	0,96540	4,41%
17	$\Delta T_{SA} P_1 P_2 I_{solar} T_{amb} V_{água} x_{saída}$	0,96542	4,42%

É possível observar na Tabela 7 que 17 testes de grupos de variáveis foram conduzidos e que boa parte destes testes apresentou resultados muito satisfatórios, com coeficiente de determinação R² superiores a 0,9 e desvio médio inferiores a 10%. O desvio médio é a média aritmética da variação percentual absoluta do resultado obtido através da regressão contra o valor de entrada. Dentre os resultados dos testes de variáveis pode-se destacar que, a partir de 5 variáveis de entrada independentes, todos tiveram R² superior a 0,95 e desvio menor ou igual a 5%. O maior coeficiente de regressão foi obtido no teste 17, porém, ressalta-se que o teste 14 foi observado como o teste com melhor resultado, que se deu devido ao R² elevado, 0,96475, menor desvio médio observado dentre todos os testes e ganho computacional por utilizar uma variável de entrada a menos que o teste número 17.

5.2. Resultado da regressão e coeficientes de linearização

Com a definição das variáveis de entrada a partir do teste 14 apresentado na Tabela 7 o cálculo da regressão linear múltipla pode ser realizado utilizando dados dos 150 experimentos realizados. Os coeficientes de regressão β encontrados estão dispostos na Tabela 8, e os parâmetros estatísticos da regressão estão apresentados na Tabela 9.

TABELA 8. Coeficientes de regressão.

Coeficiente	Valor
β_0	8,658E-08
β_1	-2,282E-09
β_2	-2,330E-11
β_3	1,042E-10
β_4	5,676E-11
β_5	8,020E-07

TABELA 9. Parâmetros estatísticos.

Parâmetro	Valor
R ²	0,96475
R ² ajustado	0,96378
F_0 (95% de confiança)	793,76
$F_{tab;superior}$ (95%)	3,51
Desvio médio absoluto	4,34 %
Desvio máximo superior	12,06 %
Desvio máximo inferior	-14,58 %

Os parâmetros estatísticos obtidos para a regressão demonstram que o método foi eficaz, dentro de um intervalo de confiança de 95%, a regressão múltipla linear executada apresentou F_0 de 793,76 para um $F_{tab;superior}$ de 3,51, ou seja, o mínimo que F_0 poderia ser para validar a regressão em um intervalo de confiança de 95% era 3,51, sendo assim apresentou um resultado superior, validando a execução do ponto de vista estatístico. Vale ressaltar também que o desvio médio absoluto do conjunto de dados foi de 4,34%, ou seja, os dados possuem amplitude dos resultados balanceada, e avaliando aos extremos, temos que os resultados não excederam 15% de desvio para a linha de regressão.

A equação gerada pela regressão linear múltipla pode ser observada na Equação 15.

$$C_d = 8,658E^{-08} - 2,282E^{-09}\Delta T_{SA} - 2,330E^{-11}P_1 + 1,042E^{-10}P_2 + 5,676E^{-11}I_{solar} + 8,020E^{-07}V_{\acute{a}gua} \quad (15)$$

Reescrevendo a Equação 7, obtém-se a Equação 16, que pode ser utilizada em simulações diversas para gerar resultados de vazão mássica de fluido refrigerante R290 em DX-SAHP.

$$\dot{m}_{r;modelo} = \left(8,658E^{-08} - 2,282E^{-09}\Delta T_{SA} - 2,330E^{-11}P_1 + 1,042E^{-10}P_2 + 5,676E^{-11}I_{solar} + 8,020E^{-07}V_{\acute{a}gua} \right) \sqrt{(P_1 - P_2)\rho_{ent}} \quad (16)$$

Onde nas Equações 15 e 16 os valores de ΔT_{SA} é dado em K, P_1 e P_2 São dados em kPa em pressão absoluta, I_{solar} é dado em W/m² e $V_{\acute{a}gua}$ em m³/h.

5.3. Resultados gerados pelo modelo

A Figura 28 apresenta o resultado da regressão linear múltipla em uma comparação entre o valor do coeficiente de descarga gerado pela regressão e o coeficiente de descarga utilizado como entrada para tal definido através da Equação 15. A Figura 29 por sua vez apresenta o resultado do modelo, aplicando a Equação 16. Neste caso, o R² obtido foi de 0,9466, representando o quão ajustado está a vazão mássica obtida através do modelo semiempírico e a vazão mássica obtida experimentalmente.

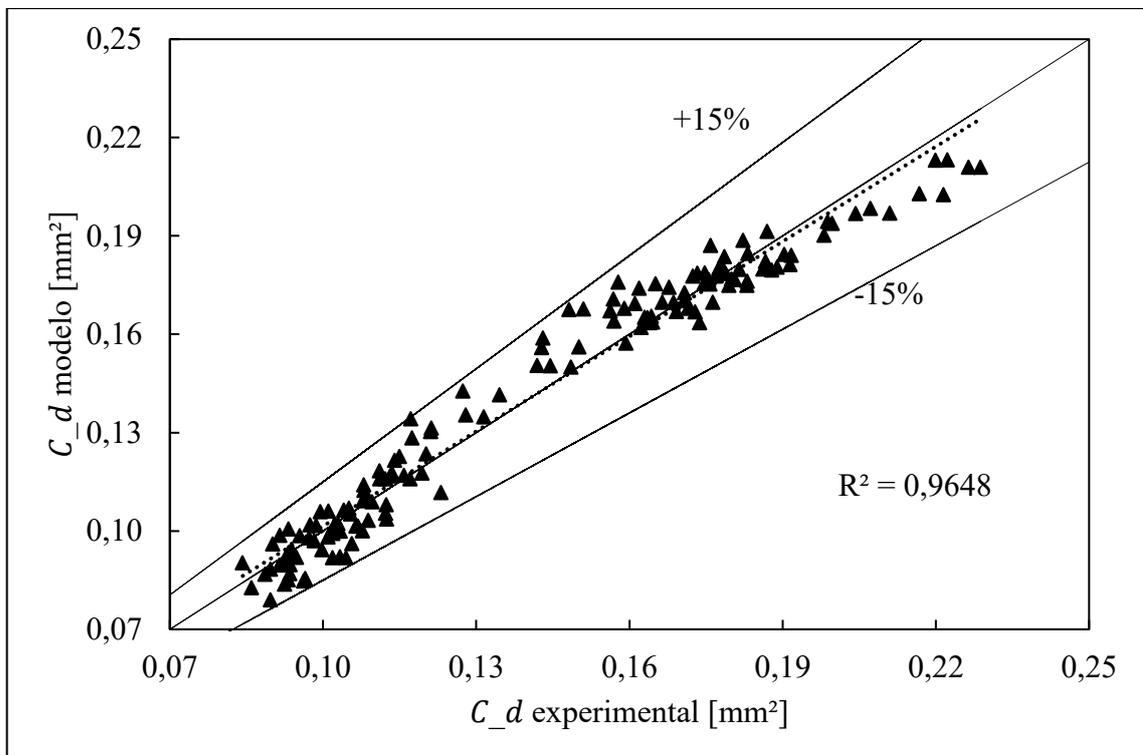


FIGURA 28. Resultado da regressão linear múltipla para o C_d VET.

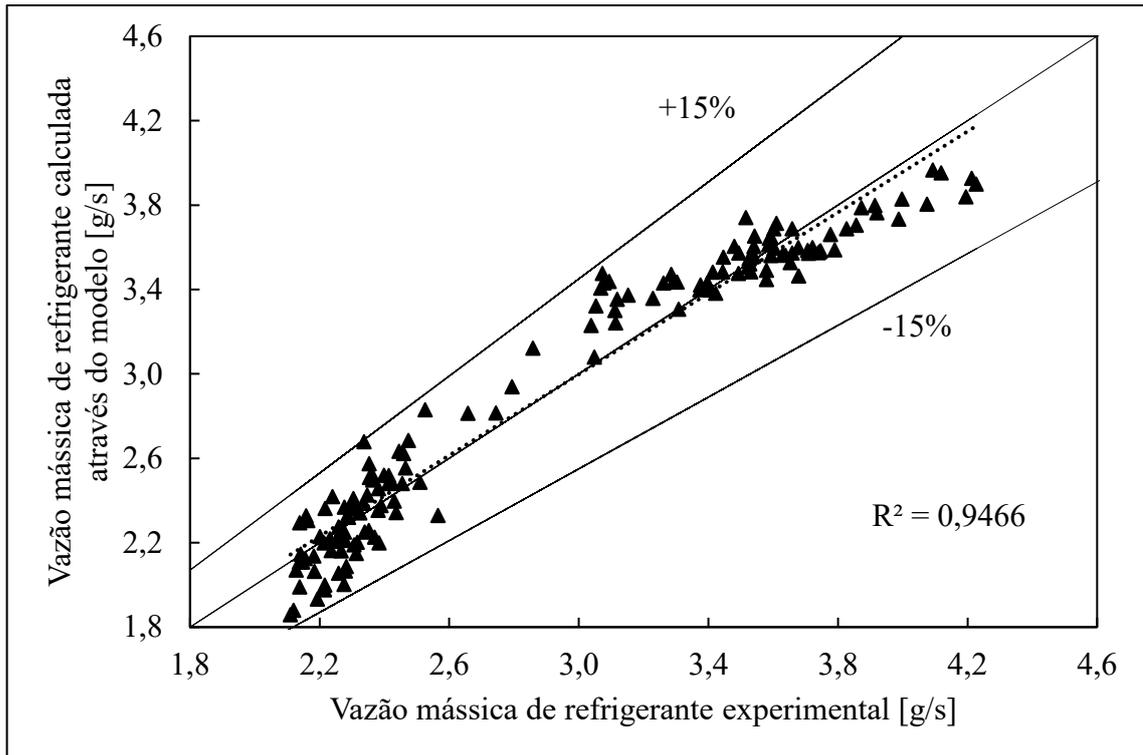


FIGURA 29. Resultado comparativo entre modelo $\dot{m}_{r,modelo}$ e experimental \dot{m}_r .

É possível observar na Figura 29 que os resultados se subdividem em dois grupos, superior e inferior, isso deu-se devido a variação da irradiação solar em cada um dos grupos. Como foi explicado no Capítulo 3, seção 3.3, foram executados teste “*indoor*” e “*outdoor*”, e, ao serem utilizados os dados obtidos nesses dois modelos de experimentos para a execução da regressão eles se organizaram de forma a evidenciar a variação de incidência solar durante os experimentos, a Figura 30 evidencia este fato de forma mais clara.

A dispersão dos resultados teóricos e experimentais pode ser observada na Figura 30 onde todos os 150 testes realizados foram utilizados, da qual observa-se que nenhum dos resultados do modelo ficou fora da faixa de $\pm 15\%$ de desvio.

Devido às incertezas padrão dos instrumentos apresentadas na Tabela 5, os resultados obtidos pelo modelo estão sujeitos a um determinado grau de incerteza. A incerteza expandida da vazão mássica calculada através do modelo gerado é de $\pm 0,180$ g/s. Essa incerteza representa uma parcela de 4 a 10% do valor do resultado dentro do grupo de experimentos realizados, isso se dá devido ao fato do grupo de experimentos estar entre 1,81 g/s no menor caso e 3,95 g/s no maior.

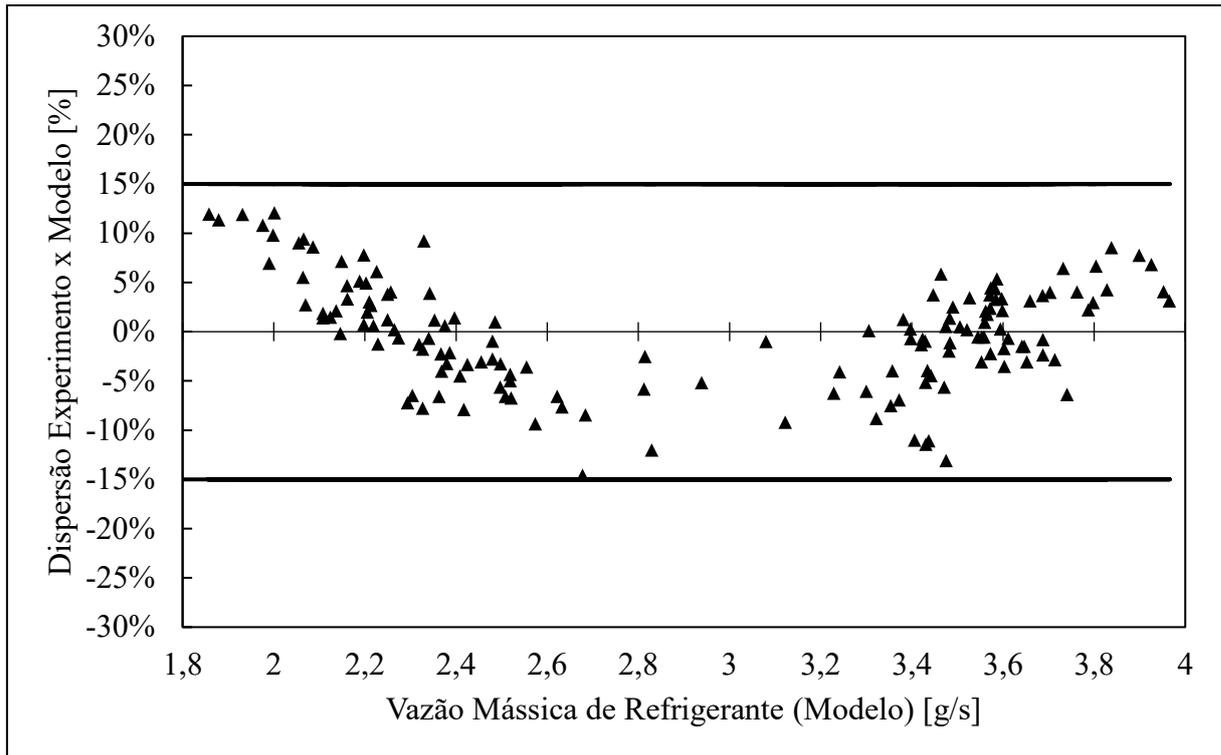


FIGURA 30. Dispersão dos resultados para vazão mássica calculada pelo modelo.

Na Figura 30 é possível observar o comportamento de agrupamento dos resultados, à medida que a vazão mássica de refrigerante varia, tem-se um grupo à esquerda, onde a vazão mássica encontra-se entre 1,8 g/s e aproximadamente 2,8 g/s e um segundo grupo a direita em que a vazão mássica se agrupa entre 3,2 g/s e 4 g/s. Estes grupos foram formados devido a variação da irradiação solar durante os experimentos, o grupo à esquerda é formado pelos testes executados sem presença de irradiação solar (testes “*indoor*”) e os resultados à direita com presença de irradiação solar (testes “*outdoor*”). A prevalência de cada grupo está distribuída na mesma proporção que a distribuição dos experimentos por índice de incidência solar, conforme apresentado na Figura 16. Outro fato relevante apresentado na Figura 30 é a clara dependência da variável I_{solar} para o resultado gerado pelo modelo

A análise dos resultados obtidos por meio da aplicação do modelo semiempírico para a válvula de expansão termostática revela um desempenho altamente satisfatório. A regressão linear múltipla utilizada para estimar a relação entre as variáveis apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9648, indicando uma excelente correlação entre as variáveis consideradas. Além disso, ao comparar a vazão mássica calculada pelo modelo semiempírico com a vazão mássica gerada experimentalmente, observa-se um R^2 de 0,9466. Esse resultado confirma a capacidade do modelo em prever de forma precisa a vazão mássica do fluido refrigerante através da VET, demonstrando sua eficácia e acurácia.

Um aspecto notável é que, dentre os 150 pontos analisados, nenhum apresentou um desvio superior a 15% em relação à vazão mássica esperada. Esse desvio pode ser atribuído a variações experimentais ou a fatores externos que influenciaram o desempenho da VET em um único ponto específico. No entanto, a ampla maioria dos pontos demonstrou uma concordância notável entre as vazões mássicas calculadas e geradas pelo modelo semiempírico. Esses resultados evidenciam a robustez e a confiabilidade do modelo semiempírico proposto, que apresenta com precisão a vazão mássica do fluido refrigerante através da VET. Tal precisão é importante para garantir o desempenho adequado da DX-SAHP.

Os resultados obtidos nesta análise fornecem suporte para a utilização do modelo semiempírico em futuras aplicações práticas e pesquisas na área. Com um alto coeficiente de determinação, uma boa correspondência entre as vazões mássicas calculadas e geradas experimentalmente e um desvio mínimo em relação aos valores esperados, o modelo demonstra sua eficiência e confiabilidade. Esses resultados incentivam a continuidade do desenvolvimento e aprimoramento do modelo semiempírico, bem como sua aplicação em diferentes configurações e condições operacionais. Futuras investigações podem explorar ainda mais os limites e a aplicabilidade do modelo.

5.4. Considerações finais

Os resultados desta pesquisa contribuem para o avanço do conhecimento científico na área de VET aplicadas a DX-SAHP e sistemas de refrigeração, fornecendo subsídios para o aprimoramento dessas tecnologias e para a otimização do desempenho energético dos sistemas. Além disso, os resultados também podem ter implicações práticas e aplicáveis na indústria, proporcionando dados valiosos para a seleção e projeto de VET mais eficientes e sistemas mais sustentáveis. A seguir, na conclusão deste trabalho foram pinçadas as principais contribuições da pesquisa.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta dissertação de mestrado foi focada na determinação de um modelo matemático semiempírico para uma Válvula de Expansão Termostática, desenvolvida para operar com fluido R290, por meio da combinação da equação base da VET e de regressão linear múltipla. Ao longo deste estudo, foram abordados diversos aspectos teóricos e práticos relacionados ao desenvolvimento desse modelo e à análise dos seus resultados. Salienta-se o ineditismo do trabalho ao gerar um modelo para o componente de expansão de uma DX-SAHP com fluido R290.

Os resultados obtidos a partir da aplicação do modelo semiempírico revelaram um desempenho satisfatório. É possível descrever o funcionamento da VET quanto ao controle da vazão mássica de refrigerante através de um modelo semiempírico. A regressão linear múltipla utilizada para estimar a relação entre as variáveis apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9648, evidenciando uma excelente correlação entre as variáveis consideradas. Além disso, a comparação entre a vazão mássica calculada pelo modelo e a vazão mássica gerada experimentalmente resultou em um R^2 de 0,9466, demonstrando a capacidade precisa do modelo em prever a vazão mássica do fluido refrigerante através da VET.

O funcionamento da VET é afetado por variáveis internas e externas, sendo as pressões de entrada e saída as principais internas e a incidência solar e a vazão de água a ser aquecida as principais externas.

Destaca-se que, dentre os 150 pontos analisados, nenhum apresentou desvio maior que 15% em relação à vazão mássica esperada. Esse desvio pode ser atribuído a variações e imprecisões experimentais que influenciaram o desempenho da VET em um ponto específico. No entanto, a ampla maioria dos pontos demonstrou uma concordância notável entre as vazões mássicas calculadas e geradas pelo modelo semiempírico.

6.1. Sugestões de trabalhos futuros

- Incorporar o modelo da VET no modelo global da DX-SAHP já desenvolvido;
- Aplicação do modelo gerado em outras configurações/montagens;
- Teste de eficácia em outro grupo de dados (validação externa);
- Elaborar o modelo matemático da VET em regime transiente.

REFERÊNCIAS

- ALIREZA BEHFAR, DAVID YUILL, **Evaluation of gray box thermostatic expansion valve mass flow models**, International Journal of Refrigeration, Volume 96, Pages 161-168, 2018.
- ASHRAE **Handbook - Refrigeration (SI)**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2018.
- BADIEI, A., GOLIZADEH AKHLAGHI, Y., ZHAO, X., SHITTU, S., XIAO, X., LI, J., FAN, Y., LI, G. **A chronological review of advances in solar assisted heat pump technology in 21st century**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 132, 2020.
- BARBOSA, C.R.F.; MEDEIROS, P.S.G., **Análise de um coeficiente de performance de um chillier doméstico operando com o R-401a em regime transiente**. Holos, Vol. 4, p.62-74, 2009.
- BORGNAKKE, CLAUDIUS; SONNTAG, RICHARD E., **Fundamentals of Thermodynamics**. United Kingdom, Wiley, 2020.
- BUKER, MAHMUT SAMI & RIFFAT, SAFFA B., **Solar assisted heat pump systems for low temperature water heating applications: A systematic review**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, vol. 55(C), pages 399-413, 2016.
- CAVALCANTI, J.O.; FILHO, C.R.B., **Eficiência de uma unidade de refrigeração por compressão de vapor**. 33th Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia. Campina Grande, Brasil, 2005.
- CHEUNG, H.; BRAUN, J. E. **Component-based, gray-box modeling of ductless multi-split heat pump systems**. International Journal of Refrigeration, Volume 38, Pages 30-45, 2014.
- CICHONG LIU, DANDONG WANG, ZIYANG SUN, LIANG CHEN, JUNYE SHI, JIANGPING CHEN, **Effects of charge on the performance of R290 air conditioner with different expansion devices**, Applied Thermal Engineering, Volume 140, Pages 498-504, 2018.
- DINIZ, H. A. G. **Estudo experimental e modelagem baseado na análise dos 4e de uma bomba de calor assistida por energia solar**. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2023.
- DINIZ, H. A. G., RESENDE, S. I. M., LUZ, A. P., MACHADO, L., OLIVEIRA, R. N., **Energetic, exergetic, environmental and economic (4E) analysis of a direct-expansion solar-assisted heat pump with low GWP refrigerant**. International Journal of Refrigeration, Volume 154, 2023.

DOUGLAS C. MONTGOMERY, GEORGE C. RUNGER; **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. LTC. 7ª Edição, 2021.

DUARTE, W. M.; PAULINO, TIAGO F.; PABON, JUAN J.G.; SAWALHA, SAMER; MACHADO, L. **Refrigerants Selection for a Direct Expansion Solar Assisted Heat Pump for Domestic Hot Water**. *Solar Energy*, V. 184, p. 527-538, 2019.

EAMES, I.W.; MILAZZO, A.; MAIDMENT, G.G., **Modelling thermostatic expansion valves**. *International Journal of Refrigeration*, Volume 38, Pages 189-197, 2014.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **BEN: Balanço Energético Nacional de 2021**. Rio de Janeiro, 2021.

FABRIS, G., **Desenvolvimento de um modelo semi-empírico de uma válvula de expansão termostática de um sistema de refrigeração**. 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences Engineering – ENCIT 2006. Braz. Soc. Of Mechanical Sciences and Engineering – ABCM. Curitiba, Brazil, 2006.

FERRAZ, F. **Apostila de refrigeração**. CEFET - Bahia, Santo Amaro, 2008.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Electricity Information**, 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key World Energy Statistics (KWES)**, 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewables**, 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2021**. OECD/IEA, 2021.

JAVADI, A. A., HOSSEINI, S. S., VASEGHI, B., & KHALAJ, M. **A comprehensive review on energy, economic, and environmental analysis of renewable energy sources**. *Journal of Cleaner Production*, 251, 2020.

JING-WEI PENG, HUI LI, CHUN-LU ZHANG, **Performance comparison of air-source heat pump water heater with different expansion devices**, *Applied Thermal Engineering*, Volume 99, 2016.

KAMEL, S., GANA, A., & ELALOUANI, T. **Modeling and optimization of wind turbines using particle swarm optimization (PSO) and artificial neural networks (ANN)**. *Renewable Energy*, 83, 576-584, 2015.

KHANLARI, A., SALARI, M., & JANGHORBAN, M. **Energy performance and thermal comfort of a novel passive cooling system for buildings: A case study in Tehran**. *Sustainable Cities and Society*, 54, 101991, 2020.

KIM, W.; BRAUN, J. E. **Development and evaluation of virtual refrigerant mass flow sensors for fault detection and diagnostics**. *International Journal of Refrigeration*, Volume 63, Pages 184-198, 2016.

- KOURY, R.N.N.; MACHADO, L.; ISMAIL, K.A.R., **Numerical simulation of a variable speed refrigeration system**. International Journal of Refrigeration, 2001.
- LI, H.; BRAUN, J. E. **A Method for Modeling Adjustable Throat-Area Expansion Valves Using Manufacturers' Rating Data**, HVAC&R Research, 14:4, 581-595, 2008.
- LI WEI YANG, RONG JI XU, NAN HUA, YU XIA, WEN BIN ZHOU, TONG YANG, YERZHAN BELYAYEV, HUA SHENG WANG, **Review of the advances in solar-assisted air source heat pumps for the domestic sector**, Energy Conversion and Management, Volume 247, 2021.
- LIMA, L.H.P., **Análise do desempenho de um refrigerador doméstico funcionando com válvula de expansão micrométrica**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.
- MAIA, A. A.; HORTA-GUTIERREZ, J. C.; KOURY, R. N.; MACHADO, L. **Superheating control using an adaptive PID controller**. HVAC&R Research, vol. 20, nº 4, p. 424-434, 2014.
- MAIA, A.A.T., R.N.N. KOURY, AND L. MACHADO. **Development of a control algorithm employing data generated by a white box mathematical model**. Applied Thermal Engineering 54:120–30, 2013.
- MANDAL, K.; ROY, R., 2014. “First law and second law analysis of mechanical vapor compression refrigeration system using refrigerants CFC12, R134a and R290”. International Journal of Current Engineering and Technology, India.
- MESQUITA, N., 2009. “Elementos do circuito de refrigeração”. Documento nº 3. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- OLIVEIRA, A. G.; DINIZ, H. A. G.; DUARTE, W. M.; MACHADO, L.; OLIVEIRA, R. N. Experimental validation and numerical simulation of a direct-expansion solar-assisted heat pump for heating water, 2020.
- OLIVEIRA, A. G. **Estudo experimental de uma bomba de calor solar a propano para aquecimento de água dotada de tubo capilar duplo**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2021.
- PETER F. PELZ, PETER GROCHE, MARC E. PFETSCH, MAXIMILIAN SCHAEFFNER. **Mastering Uncertainty in Mechanical Engineering**. Springer Cham, 2021.
- RABELO, SABRINA N.; PAULINO, TIAGO F.; MACHADO, LUIZ; DUARTE, WILLIAN M. **Economic Analysis and Design Optimization of a Direct Expansion Solar Assisted Heat Pump**. Solar Energy, V. 188, P. 164-174, 2019.

- RABELO, SABRINA N.; PAULINO, TIAGO F.; SOARES, CARLA P. M., DUARTE, WILLIAN M., MACHADO, LUIZ., NUNES, RAPHAEL O., **Mass flow characteristics of CO₂ operating in a transcritical cycle flowing through a needle expansion valve in a direct-expansion solar assisted heat pump**, Journal of Building Engineering, Volume 67, 2023.
- SEZEN, K.; GUNGOR, A. **Comparison of solar assisted heat pump systems for heating residences: A review**. Solar Energy, Volume 249, Pages 424-445, 2023.
- SHENGCHUN LIU, ZHENG LI, BAOMIN DAI, ZHIFENG ZHONG, HAILONG LI, MENGJIE SONG, ZHILI SUN, **Energetic, economic and environmental analysis of air source transcritical CO₂ heat pump system for residential heating in China**, Applied Thermal Engineering, Volume 148, 2019.
- STOECKER, W. F. E JABARDO, J. M. S. **Refrigeração Industrial**, 2^a edição, Editora Blucher, São Paulo, 2002.
- STOECKER, W.F.; JONES, J.W., **Refrigeração e ar-condicionado**. São Paulo: McGraw Hill, 1985.
- VARGAS, L.C.P., **Análise teórico-experimental do coeficiente de performance (COP) de um sistema de refrigeração por jato-compressão**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil, 2010.
- VENTURINI, O.J.; PIRANI, M.J., **Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e Comercial**. Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- VAISHAK, K. T., & BHALE, P. G. **A review on recent advances and future scope of solar stills**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 101, 544-554, 2019.
- WARD TEGROTENHUIS, ANDREW BUTTERFIELD, DUSTIN CALDWELL, ALEXANDER CROOK, AUSTIN WINKELMAN, **Modeling and design of a high efficiency hybrid heat pump clothes dryer**, Applied Thermal Engineering, Volume 124, Pages 170-177, 2017.
- XIANGQIANG KONG, MAOYUAN ZHANG, YIMENG YANG, YING LI, DECHANG WANG, **Comparative experimental analysis of direct-expansion solar-assisted heat pump water heaters using R134a and R290**, Solar Energy, Volume 203, Pages 187-196, 2020.