



## **Engenharia Mecânica**

Marquenis dos Santos Souza

Renato Pereira dos Santos Junior

Rogério Falcão Pereira

Wendisney Rosalém Neves

# **AUTOMAÇÃO DA BANCADA DIDÁTICA DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO A VAPOR**

**Aracruz/ES**

**2020**



## **Engenharia Mecânica**

Marquenis dos Santos Souza

Renato Pereira dos Santos Junior

Rogério Falcão Pereira

Wendisney Rosalém Neves

# **AUTOMAÇÃO DA BANCADA DIDÁTICA DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO A VAPOR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica das Faculdades Integradas de Aracruz para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Harerton Oliveira Dourado.

**Aracruz/ES**

**2020**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos primeiramente a Deus por ter nos dado saúde e sabedoria para superar todas as adversidades no decorrer do curso, agradecemos nossos amigos e familiares que nos deram muitos incentivos e nos encorajavam a não desistir.

A esta faculdade, corpo docente, e a todos que de alguma forma contribuíram para nosso crescimento intelectual.

Aos nossos amigos e colegas de classe que tornaram essa jornada mais tranquila.

Ao nosso orientador Prof. Dr. Harerton Oliveira Dourado pela orientação, apoio e confiança.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da nossa formação, o nosso muito obrigado.

## **RESUMO**

O presente trabalho apresenta uma proposta de automatização da bancada didática de refrigeração por compressão a vapor existente no laboratório de mecânica das FAACZ, buscando auxiliar os alunos e professores, principalmente em aulas práticas ministradas remotamente, através do monitoramento remoto via Web. Com o estudo do ciclo de refrigeração e da lógica de programação a ser utilizada, foi feito o levantamento de materiais necessários para automatização da mesma, e assim iniciou-se a montagem da bancada e por sua vez a realização de testes. Como hardware principal foi utilizado o Arduino UNO, onde possibilitou a coleta dos dados remotamente com os pulsos elétricos enviados pelos sensores de temperatura e transdutores de pressão, que localizados em diversos pontos do ciclo, mediam a temperatura e pressão do fluido refrigerante R-22, e o módulo ESP 01 que conecta o Arduino na internet através do wifi, permitindo assim o monitoramento dos dados na web, através da plataforma gratuita fornecida pela fabricante de componentes eletrônicos Adafruit. Após ter finalizado toda coleta de dados, e análise dos mesmos, foi validado e comprovado com qualidade todo processo de automatização da bancada, cumprindo assim com os objetivos propostos de auxiliar em aulas práticas ministradas remotamente.

**Palavras-chave:** Bancada didática. Ciclo de Refrigeração. Arduino. Monitoramento remoto.

## **ABSTRACT**

The present work presents a proposal for the automation of the didactic bench for refrigeration by vapor compression existing in the FAACZ mechanics laboratory, seeking to assist students and teachers, mainly in practical classes taught remotely, through remote monitoring via the Web. Refrigeration cycle and service programming logic, materials were surveyed to automate it, and thus the workbench assembly began and tests were carried out. As the main hardware, Arduino UNO was used, where it enabled the collection of data remotely with the electrical pulses sent by temperature sensors and pressure transducers, which they incorporated at different points in the cycle, measure the temperature and pressure of the R-22 refrigerant, ESP 01 module that connects Arduino to the internet via wifi, thus allowing data monitoring on the web, through the free platform implemented by the electronic components manufacturer Adafruit. After having finished all data collection and analysis, the entire bench automation process was validated and proved with quality, thus fulfilling the proposed objectives of the assistant in practical classes taught remotely.

**Keywords:** Didactic bench. Refrigeration Cycle. Arduino. Remote monitoring.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Diagrama T-s ciclo ideal.....	15
Figura 2- Diagrama T-s ciclo real.. .....	17
Figura 3-Condensador da bancada experimental da UFES .....	21
Figura 4– Bancada de refrigeração por compressão a vapor. ....	29
Figura 5 – Bancada didática de um trocador de calor compacto aletado.....	30
Figura 6 - Bancada didática portátil de refrigeração.....	30
Figura 7 - Fluxograma metodológico da elaboração do trabalho. ....	31
Figura 8 - Bancada de Didática de Refrigeração Por Compressão a Vapor. ....	32
Figura 9 - Sensor de temperatura Ds18b20. ....	34
Figura 10 - Transdutores de pressão. ....	35
Figura 11 - Conjunto de Acionamento remoto.....	35
Figura 12 - Conjunto de sensores e módulos.....	36
Figura 13 - Bancada Didática De refrigeração por compressão a vapor automatizada. .....	37
Figura 14 - Dados através da porta serial usb.....	38
Figura 15 - Layout da coleta de dados online.....	38
Figura 16 - Diagrama do ciclo de refrigeração da bancada automatizada. ....	39
Figura 17 - Diagrama T-s. ....	44
Figura 18 - Indicação do monitor serial. ....	62
Figura 19 - Acesso ao portal adafruit.io.....	63
Figura 20 – Login ao portal.....	63
Figura 21 - Dashboard de monitoramento.....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos fluidos refrigerantes típicos. ....	25
Tabela 2 - Procedimentos das simulações.....	40
Tabela 3 - Simulações realizadas no estágio 3.....	41
Tabela 4 - Simulações realizadas no estágio 2.....	42
Tabela 5 - Simulações realizadas no estágio 1.....	43
Tabela 6 - Entalpias do estágio 2.....	46
Tabela 7 - Entalpias do estágio 3.....	46
Tabela 8 - Dados obtidos pelos autores que construíram a bancada. ....	46
Tabela 9 - Dados coletados antes da automação. ....	47
Tabela 10 - Comparação dos dados antes e após a automação. ....	48
Tabela 11 - Propriedades Termodinâmicas do Refrigerante 22 (Temperatura – Líquido Vapor) .....	71
Tabela 12 - Propriedades do Refrigerante 22 Saturado (Pressão - Líquido Vapor) ..	72
Tabela 13 - Propriedades do Vapor de Refrigerante 22 Superaquecido.....	73

## LISTA DE SIMBOLOS E SIGLAS

### Siglas

<b>Btu/h</b>	Potência medida pela unidade inglesa <i>British Thermal Unit</i> .
<b>COP<sup>teórico</sup></b>	Coeficiente de performance teórico.
<b>COP<sup>real</sup></b>	Coeficiente de performance real.
<b>IOT</b>	Internet das coisas, termo inglês <i>Internt of Things</i> .
<b>IDE</b>	Ambiente de desenvolvimento integrado, termo inglês <i>Integrated development environment</i> .

### Símbolos

<b>Q</b>	Taxa de transferência de calor.
<b>m</b>	Vazão mássica.
<b>h<sub>1</sub></b>	Entalpia do ponto 1.
<b>h<sub>2</sub></b>	Entalpia do ponto 2.
<b>h<sub>4</sub></b>	Entalpia do ponto 4.
<b>h<sub>r1</sub></b>	Entalpia real do ponto 1.
<b>h<sub>r2</sub></b>	Entalpia real do ponto 2.
<b>h<sub>r4</sub></b>	Entalpia real do ponto 4.
<b>n</b>	Eficiência isoentrópica do compressor.
<b>T<sub>1</sub></b>	Temperatura no ponto 1.
<b>T<sub>2</sub></b>	Temperatura no ponto 2.
<b>T<sub>3</sub></b>	Temperatura no ponto 3.
<b>T<sub>4</sub></b>	Temperatura no ponto 4.
<b>P<sub>1</sub></b>	Pressão no ponto 1.

<b>P<sub>2</sub></b>	Pressão no ponto 2.
<b>P<sub>3</sub></b>	Pressão no ponto 3.
<b>kJ/kg</b>	Unidade de energia.
<b>W<sub>c</sub></b>	Potência do compressor.
<b>W</b>	Trabalho.
<b>atm</b>	Unidade de pressão.
<b>Hz</b>	Unidade de frequência.
<b>v</b>	Unidade de tensão elétrica.
<b>°C</b>	Unidade de temperatura.
<b>bar</b>	Unidade de pressão.
<b>PSI</b>	Unidade de pressão.
<u>Gregos</u>	
<b>β</b>	Coeficiente de desempenho.
<b>φ</b>	Fase.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
2.	OBJETIVOS. ....	13
2.1	Objetivo Geral. ....	13
2.2	Objetivos específicos:.....	13
3.	REFERENCIAL TEÓRICO. ....	14
3.1	Sistemas de refrigeração.....	14
3.2	Ciclo Ideal de refrigeração por compressão a vapor. ....	14
3.3	Ciclo real de refrigeração por compressão a vapor. ....	16
3.3.1	Capacidade frigorífica.....	18
3.3.2	Potência de alimentação por massa de fluido ....	18
3.3.3	COP teórico.....	19
3.3.4	COP real:.....	19
3.3.5	Eficiência isentrópica.....	19
3.4	Componentes de um ciclo de refrigeração; .....	20
3.4.1	Compressor.....	20
3.4.2	Condensador.....	21
3.4.3	Dispositivo de expansão.....	21
3.4.4	Evaporador.....	22
3.4.5	Fluido refrigerante.....	23
3.5	Indústria 4.0.....	25
3.5.1	Surgimento da indústria 4.0.....	25
3.5.2	Internet das coisas (lot).....	26
3.5.3	Arduino.....	27
3.5.4	Sensores e Transdutores.....	27
3.6	Modelos de bancadas didáticas de refrigeração de outros autores.....	29
4.	METODOLOGIA.....	31
4.1	Fluxograma.....	31
4.2	Descrição da bancada de refrigeração.....	32
4.3	Análise de possíveis modificações.....	32
4.4	Montagem e automatização.....	34
4.4.1	Montagem e substituição de sensores.....	34

4.4.2	Acionamento remoto. ....	35
4.4.3	Coleta de dados. ....	36
4.4.4	Bancada didática automatizada e finalizada. ....	36
4.5	Teste e coletas de dados ....	37
4.6	Análise dos resultados. ....	39
5.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS ....	40
5.1	Comparação dos resultados obtidos antes e após a automação da bancada didática. ....	46
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS. ....	49
7.	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO. ....	51
8.	APÊNDICES. ....	54
8.1	Apêndice A. ....	54
8.2	Apêndice B. ....	57
8.3	Apêndice C. ....	62
8.4	Apêndice D. ....	62
8.5	Apêndice E. ....	64
8.6	Apêndice F. ....	65
8	ANEXOS. ....	71

## 1. INTRODUÇÃO.

A intensa busca no mercado de trabalho por engenheiros capacitados exige da instituição de ensino superior um aumento da qualidade de seu ensino, uma vez que se torna maior a competição por vagas. Um profissional completo deve possuir um amplo conhecimento teórico, prático e se possível experiência profissional. Mas como adquirir todo esse conhecimento dentro da faculdade? Uma forma seria assimilando a teoria da sala de aula a uma atividade prática, porém para isso é necessário um laboratório equipado com dispositivos como as bancadas didáticas que podem simular o funcionamento de equipamentos industriais (REIS, 2014).

Segundo Amorim (2006), “as bancadas experimentais são dispositivos usados didaticamente para avaliar conceitos e validar modelos teóricos”. A utilização dessas bancadas que simulam uma situação real são amplamente empregadas para o desenvolvimento de projetos em geral. O surgimento de novas tecnologias digitais ligadas à indústria ficou conhecida em todo o mundo como a quarta revolução industrial ou indústria 4.0, e a engenharia mecânica é uma das responsáveis pelo processo de inovação de vários setores industriais, muitos desses processos são caracterizados por serem automatizados (MEGDA, 2018).

Sem as aulas presenciais ocasionadas pela pandemia da Covid-19, alunos e professores vem enfrentando desafios e dificuldades na realização de aulas online, alunos de graduação sofrem ainda mais pois alguns cursos se fazem necessário a realização de aulas práticas, no segundo semestre de 2020 o MEC abriu a possibilidade das instituições oferecerem atividades práticas que utilizem a tecnologia, se a instituição possuir equipamentos tecnológicos em seus laboratórios que ofereçam essa possibilidade vai facilitar a realização de aulas práticas remotamente.

Portanto esse trabalho acadêmico tem como finalidade a construção de uma bancada didática automatizada, que seja capaz de processar informações e transmitir para um dispositivo externo através de algoritmos programados por uma placa Arduino, que possibilite a simulação de um ciclo de refrigeração auxiliando o professor na apresentação de assuntos práticos e facilite o aprendizado dos alunos na matéria de refrigeração.

## **2. OBJETIVOS.**

### **2.1 Objetivo Geral.**

- Automatizar a bancada didática de refrigeração existente no laboratório das FAACZ, a fim de auxiliar os alunos em aulas práticas presenciais ou ministradas remotamente.

### **2.2 Objetivos específicos:**

- Estudar os sistemas termodinâmicos e os ciclos de refrigeração;
- Estudar e levantar dados necessários para realizar a lógica de programação;
- Levantar os materiais necessários para automatizar o processo da bancada didática;
- Montagem da bancada e realização de testes.

### **3. REFERENCIAL TEÓRICO.**

#### **3.1 Sistemas de refrigeração.**

Os ciclos de refrigeração, são descritos como os processos que realizam a circulação de um fluido refrigerante em um sistema, onde são submetidos a mudanças de estado ou condição (DOSSAT, 2004) apud (PEREIRA, 2018). O ciclo ocorre de tal maneira que o refrigerante sai de sua condição inicial e passa por determinados processos e por fim retorna a sua condição inicial.

Na natureza, pode-se notar que é natural a ocorrência de transferência de calor de uma fonte quente para uma fonte fria, ou seja, o calor percorre com o fluxo de calor a partir do meio quente para o meio com temperatura mais baixa, contudo, não há possibilidade de ocorrer de forma natural a situação reversa, ou seja, a transferência de calor da fonte fria para a fonte quente (ÇENGEL & BOLES, 2013). Por tanto a finalidade básica do ciclo de refrigeração é permitir a transferência de calor de uma fonte fria para uma fonte quente.

#### **3.2 Ciclo Ideal de refrigeração por compressão a vapor.**

O ciclo ideal, também conhecido como ciclo de Carnot, é um ciclo reversível, cuja máquina que opera a partir deste ciclo é denominada máquina térmica de Carnot. Basicamente o ciclo de Carnot é composto por dois processos isotérmicos e dois adiabáticos, eles são reversíveis, ou seja, todo calor recebido é convertido em trabalho sem haver perdas (BORGNAKKE & SONNTAG, 2013).

Portanto Borgnakke & Sonntag (2013), afirma, que o ciclo de Carnot, pode ser representado por estes 4 processos reversíveis, tais como:

- Expansão isotérmica;
- Expansão adiabática;
- Compressão isotérmica;
- Compressão adiabática.

Ao se realizar a inversão do ciclo ideal de Carnot, o processo passa a funcionar conforme o ciclo de Carnot inverso, ou seja, irar operar em sentido contrário ao ciclo de Carnot (ÇENGEL & BOLES, 2013). O ciclo basicamente seria o mesmo, a mudança empregada, em si, seria apenas nas direções do fluxo de calor e trabalho, onde uma determinada porção de calor seria removida de uma fonte de menor temperatura, e uma quantidade de calor seria recebida pela fonte de alta temperatura, para este ciclo funcionar há necessidade de trabalho externo.

Çengel & Boles (2013) assegura que “O ciclo de Carnot reverso é o ciclo de refrigeração mais eficiente que opera entre dois níveis especificados de temperatura. Assim, é natural considerá-lo a princípio como o ciclo ideal para refrigeradores e bombas de calor.” Embora teoricamente o ciclo de Carnot reverso seja considerado como o mais eficiente ciclo de refrigeração, o mencionado autor cita complexidades tais como, comprimir uma mistura de líquido vapor e a umidade existente no processo de expansão do fluido refrigerante na turbina.

À vista de tais complicações, uma solução seria a vaporização completa do fluido precedente ao processo de compressão, juntamente com a mudança da turbina por uma válvula de expansão, assim sendo caracterizado como ciclo de ideal de refrigeração por compressão a vapor (ÇENGEL & BOLES, 2013).

O ciclo ideal de refrigeração por compressão a vapor, pode ser representado em seguida pelo diagrama T-s na figura 1.

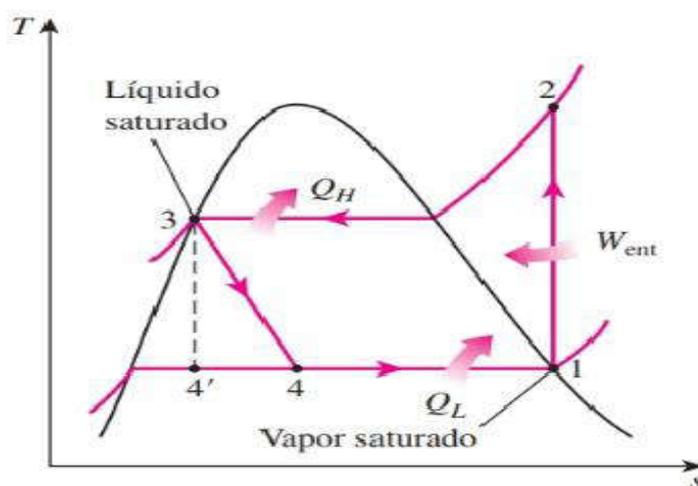


Figura 1-Diagrama T-s. - Fonte (ÇENGEL & BOLES, 2013).

E os processos do ciclo ideal de refrigeração por compressão a vapor podem ser descritos como:

- 1-2 Compressão isentrópica de vapor através de um compressor;
- 2-3 Rejeição isobárica de calor em um condensador;
- 3-4 Expansão do líquido saturado;
- 4-1 Adição isobárica de calor no evaporador;

Çengel & Boles (2013), ressalta que o ciclo de refrigeração ideal por compressão a vapor, difere de alguns ciclos ideais, pois existe irreversibilidades, quais são geradas pelo dispositivo de estrangulamento, utilizado para expandir o líquido saturado ao invés de uma turbina, isto ocorre com a finalidade de aproximar-se do ciclo real de refrigeração. Portanto esta alteração torna o ciclo não reversível.

### **3.3 Ciclo real de refrigeração por compressão a vapor.**

De maneira geral o ciclo real de refrigeração, difere bastante do ciclo ideal de refrigeração, uns dos fatores são as irreversibilidades, as quais são ocasionadas por existir o atrito do fluido refrigerante com as tubulações, a perda de calor através da parede dos tubos para a vizinhança e perda de carga nas pressões devido o alongamento das tubulações. Ao se executar o ciclo de refrigeração ideal, é quase que impossível controlar precisamente em que fase o fluido refrigerante estará, ao em vez de tentar controlar esse fator, utiliza-se no sistema um meio em que o fluido refrigerante possa estar superaquecido na entrada do compressor (ÇENGEL & BOLES, 2013).

O ciclo real de refrigeração por compressão a vapor é representado através do diagrama T-s, conforme a figura 2.

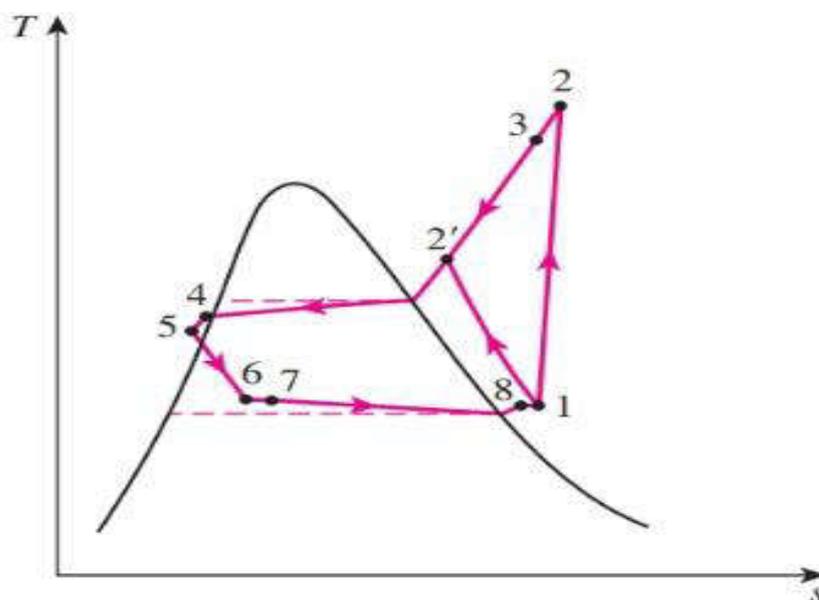


Figura 2- Diagrama T-s ciclo real. Fonte (ÇENGEL & BOLES, 2013).

Outro fator em relação ao ciclo ideal de compressão a vapor, seria que o processo de compressão é de forma irreversível, adiabática e isentrópico, porém no ciclo real o processo de compressão, é submetido ao atrito, o qual pode ocasionar aumento de entropia e a transferência de calor pode ocasionar menor entropia, assim representado no diagrama T-s na figura 2, onde no ponto (1-2), ocorre o aumento de entropia devido o atrito, ou pode ocorre o processo (1-2'), ocorrendo a diminuição de entropia devido a transferência de calor (ÇENGEL & BOLES, 2013).

Já no processo de condensação, conseqüentemente após a passagem do fluido refrigerante pelo condensador, a pressão de saída será menor que a de entrada, pois existe queda de pressão durante o processo. Outro ponto importante seria que a temperatura no condensador deve estar maior que a temperatura do meio, assim possibilitando a troca térmica (ÇENGEL & BOLES, 2013).

No processo de evaporação, o fluido refrigerante sai do condensador e normalmente estará submetido a uma temperatura menor que a de saturação, tornando assim um ponto positivo para o ciclo de refrigeração, pois o fluido entrara no evaporador com uma entalpia menor. Portanto irar influenciar positivamente na transferência de calor do fluido e o ambiente a ser refrigerado (BORGNAKKE & SONNTAG, 2013).

De acordo com Moran & Shapiro (2018), ao se considerar e analisar o ciclo de refrigeração por compressão a vapor em regime permanente, e conseqüentemente desprezar as variações de energia cinética e potencial, pode-se chegar a algumas relações termodinâmicas as quais estão representadas nos subcapítulos a seguir.

### 3.3.1 Capacidade frigorífica

Ao decorrer da passagem do fluido refrigerante pelo evaporador, ele é submetido ao processo de evaporação, o qual ocorre através da transferência de calor do ambiente que está sendo refrigerado. Portanto este processo em que uma quantidade de calor é retirada do ambiente é chamado como efeito frigorífico, e pode ser representado pela equação 1 (MORAN & SHAPIRO, 2018).

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{m}} = h_1 - h_4 \quad (1)$$

Onde:

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{m}} = \text{Taxa de transferência de calor (kJ/kg)}$$

$$h_1 = \text{Entalpia do ponto 1 (kJ/kg)}$$

$$h_4 = \text{Entalpia do ponto 4 (kJ/kg)}$$

### 3.3.2 Potência de alimentação por massa de fluido

Após o fluido passar pelo processo de evaporação, ele é submetido ao processo de compressão até atingir uma alta pressão e temperatura, esta etapa pode ser representada pela equação 2 (MORAN & SHAPIRO, 2018).

$$\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} = h_1 - h_2 \quad (2)$$

Onde:

$$\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} = \text{Potência de alimentação por massa de fluido (kJ/kg)}$$

$$h_1 = \text{Entalpia do ponto 1 (kJ/kg)}$$

$$h_2 = \text{Entalpia do ponto 2 (kJ/kg)}$$

### 3.3.3 COP teórico

É o coeficiente de performance teórico, parâmetro muito importante na análise de instalações frigoríficas, pois se trata do fator que verifica o desempenho teórico do sistema, conforme representado pela equação 3 (MORAN & SHAPIRO, 2018).

$$\text{COP Teórico} = \beta = \frac{\dot{Q}/\dot{m}}{\dot{w}/\dot{m}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (3)$$

Onde:

$\beta$  = Coeficiente de desempenho teórico

$h_1$  = Entalpia no ponto 1 (kJ/kg)

$h_2$  = Entalpia no ponto 2 (kJ/kg)

$h_4$  = Entalpia no ponto 4 (kJ/kg)

### 3.3.4 COP real:

É o coeficiente de desempenho real, ele possibilita a verificação do desempenho real no sistema através do processo de compressão que possui uma variação da entropia, conforme representado pela equação 4 (MORAN & SHAPIRO, 2018).

$$\text{COP Real} = \frac{h_{r1} - h_{r4}}{h_{r2} - h_{r1}} \quad (4)$$

Onde:

COP real = Coeficiente de desempenho real

$h_{r1}$  = Entalpia real no ponto 1 (kJ/kg)

$h_{r2}$  = Entalpia real no ponto 2 (kJ/kg)

$h_{r4}$  = Entalpia real no ponto 4 (kJ/kg)

### 3.3.5 Eficiência isentrópica

Processo no qual é diretamente ligado à compressão do fluido, razão entre o trabalho do compressor que faz com que haja um aumento da pressão do fluido até um determinado valor onde a entropia seja constante, e o trabalho real do compressor, com isso no processo de compressão ocorrem algumas perdas por não se tratar de um gás ideal, e devido às trocas de calor com o ambiente, conforme representada pela equação 5 (JOFFILY, 2007, apud SCARPATI et al., 2015).

$$n = \frac{h_2 - h_1}{h_{r2} - h_1} \quad (5)$$

Onde:

$n$  = eficiência isentrópica do compressor

$h_{2r}$  = Entalpia real no ponto 2 (kJ/kg)

$h_2$  = Entalpia teórica no ponto 2 (kJ/kg)

$h_1$  = Entalpia teórica no ponto 1 (kJ/kg)

### 3.4 Componentes de um ciclo de refrigeração;

Um sistema de refrigeração por compressão a vapor é composto por alguns componentes básicos: como o compressor, condensador, dispositivo de expansão, evaporador e o fluido refrigerante (ADIERs et al, 2011).

#### 3.4.1 Compressor

Um dos principais equipamentos do sistema de refrigeração é o compressor, o qual tem a importante finalidade de manter o fluxo do fluido refrigerante e de elevação da pressão no sistema, os compressores podem ser dos tipos alternativos e rotativo (MENDES, 2012).

No processo de funcionamento do compressor, o fluido refrigerante que estava em estado de vapor superaquecido, ele é comprimido e assim ocorrendo a mudança de um estado, onde estava em baixa pressão e baixa temperatura para um estado de alta pressão e temperatura. Através da equação (6) pode-se calculado o trabalho de compressão do sistema (MENDES, 2012).

$$\dot{W}_{com} = \dot{W}_{12} = \dot{m}_f \cdot (h_2 - h_1) \quad (6)$$

Onde:

$\dot{W}_{com}$  : Potência no compressor;

$\dot{m}_f$  : Vazão mássica;

$h$  : Entalpia específica.

### 3.4.2 Condensador

Segundo Lauand (1999, p.14) “o condensador serve para liquefazer os vapores produzidos pela ebulição no evaporador” Apud (GARCIA, 2012). Ou seja, é um equipamento que tem a função de executar a troca térmica do sistema com o meio, assim possibilitando a rejeição de calor. Entretanto os condensadores podem utilizar de diversas formas de resfriamentos, podendo ser a ar, a água ou evaporativo, assim atendendo a sua aplicação (CUZZUOL, 2014).

Pode-se observar que Mendes (2012) exemplifica alguns modelos de condensadores dos tipos casco e tubo, casco e serpentina ou duplo tubo, são exemplos de resfriamento através de água. Já os resfriados a ar, são formados por vários seguimentos de tubos aletados, onde o ar é forçado a passar através de um ventilador, assim facilitando a troca térmica como é ilustrado na figura 3. Os modelos evaporativos, utilizam o ar e água como meio de resfriamento, onde o calor é expulso através da vaporização da água pulverizada sobre o condensador.



Figura 3-Condensador da bancada experimental da UFES – Fonte (CUZZUOL, 2014).

### 3.4.3 Dispositivo de expansão

Conforme foi descrito por Costa (2014), no sistema de refrigeração por compressão a vapor, o dispositivo de expansão tem como função, a regulação da vazão do fluxo de fluido refrigerante que entra no evaporador, e diminuir a pressão de condensação e a pressão de evaporação. Para que se tenha um bom funcionamento do ciclo de refrigeração, há necessidade que ocorra um equilíbrio entre a operação do dispositivo

de expansão e o compressor, ou seja, o compressor deve transmitir a mesma quantidade de fluido refrigerante que o dispositivo de expansão fornece ao evaporador.

Outro ponto a se ressaltar, seria que o dispositivo de expansão possibilita um fator muito importante no ciclo, pois realiza uma grande queda de pressão no sistema, tornando a temperatura do fluido refrigerante menor que a temperatura ambiente e assim possibilitando a absorção de calor na fonte quente (CUZZUOL, 2014). Dentre os tipos de dispositivos de expansão estão, o tubo capilar, válvula de expansão termostática, válvula boia, válvula de expansão de pressão constante.

#### **3.4.4 Evaporador**

Os evaporadores possuem o papel de retirar calor do ambiente, onde o fluido refrigerante passa pelo evaporador em estado líquido com baixa pressão e temperatura. Nesta etapa o calor é absorvido, assim promovendo a troca térmica do ambiente a ser refrigerado com o fluido refrigerante (Salvador, 1999, Apud SCARPATI et al., 2015).

São equipamentos que na sua construção, podem ser dos tipos, casco e tubos, duplo tubo e de placas que são utilizados para resfriamento de líquido, ou podem ser dos tipos de serpentinas aletadas, as quais são empregadas para o resfriamento a ar (TOIGO, 2013).

De acordo com Ferraz (2008, apud FLORENCIO et al., 2015), a eficiência de um evaporador está em função de três requisitos, os quais devem ser observados. Há necessidade de espaço para o fluido refrigerante líquido e espaço suficiente para que ocorra a separação do vapor e líquido. Ter uma área suficiente para absorver o calor necessário, assim não ocorrendo uma grande diferença de temperatura entre o fluido refrigerante e a região que se deseja resfriar. O último requisito a ser levado em consideração, é ter espaço para a circulação do refrigerante sem que ocorra queda de pressão excessiva entre a entrada e a saída do evaporador.

### 3.4.5 Fluido refrigerante

Os fluidos refrigerantes, são substâncias químicas, e quando submetidas a vaporização, possuem a capacidade de absorção do calor do ambiente a ser refrigerado. Eles podem ser classificados em hidrocarbonetos halogenados, misturas azeotrópicas, componentes inorgânicos e misturas não azeotrópicas (TOIGO, 2013).

Miller & Mark (2014), definem algumas as propriedades desejáveis de um bom fluido refrigerante para uso comercial as quais são seguintes:

- Baixo ponto de ebulição.
- Atóxico.
- Fácil de liquefazer em pressão e temperatura moderadas.
- Calor latente elevado.
- Operação em pressões positivas.
- Não afetado por umidade.
- Mistura bem com óleo.
- Não corrosivo para metais.

Dentre essas existem ainda outras qualidades que todos os fluidos refrigerantes possuem, tais como peso molecular, peso específico, razão de compressão, entalpia e temperatura de compressão, essas qualidades irão variar com os fluidos refrigerantes, além disto, o volume de deslocamento do compressor e o tipo ou projeto de compressor também influenciarão a escolha do fluido refrigerante (MILLER & MARK, R, 2014).

### Classificação dos fluidos refrigerantes

A maneira pela qual absorvem ou extraem calor das substâncias a serem refrigeradas são as responsáveis pela classificação dos fluidos refrigerantes. Basicamente são divididas em 3 classes (MILLER & MARK, R, 2014).

Os fluidos refrigerantes de Classe 1 são utilizados no tipo de compressor padrão dos sistemas de refrigeração, já os fluidos refrigerantes de Classe 2 são empregados como agentes de resfriamento intermediário entre a Classe 1 e a substância a ser refrigerada, eles realizam o mesmo trabalho para a Classe 3, por sua vez os fluidos refrigerantes de Classe 3 são utilizados nos sistemas-padrão de refrigeração por absorção (MILLER & MARK, R, 2014).

### ***Classe 1***

Esta é a classe que abrange aqueles fluidos refrigerantes que resfriam pela absorção ou extração de calor das substâncias a serem refrigeradas por meio da absorção de seus calores latentes. A Tabela 1 apresenta as características de alguns fluidos refrigerantes típicos.

### ***Classe 2***

Os fluidos refrigerantes pertencentes a esta classe são aqueles que resfriam as substâncias por meio da absorção de seus calores sensíveis. Eles são ar, salmoura de cloreto de cálcio, salmoura de cloreto de sódio (sal), álcool e soluções anticongelantes semelhantes.

### ***Classe 3***

Já este grupo consiste em soluções que contêm vapores absorvidos de agentes liquefificáveis ou meios refrigerantes. Estas soluções funcionam por meio de sua habilidade em carregar os vapores liquefificáveis. Os vapores produzem um efeito refrigerante por meio da absorção dos seus calores latentes. Um exemplo é a água amoniacal, que é uma solução composta por água destilada e amônia pura.

**Tabela 1 – Características dos fluidos refrigerantes típicos.**

NOME	PONTO DE EBULIÇÃO(°F)	CALOR DE VAPORIZAÇÃO NO PONTO DE EBULIÇÃO (BTU/LB 1ATM)
Dióxido de enxofre	14,0	172,30
Cloreto de metila	-10,6	177,80
Cloreto de etila	55,6	177,00
Amônia	-28,0	554,70
Dióxido de carbono	-110,5	116,00
Freezol (isobutano)	10,0	173,5
Freon 11	74,8	78,31
Freon 12	-21,7	71,04
Freon 13	-114,6	63,85
Freon 21	48,0	104,15
Freon 22	-41,4	100,45
Freon 113	117,6	63,12
Freon 114	38,4	58,53
Freon 115	-37,7	54,20
Freon 502	-50,1	76,46

Tabela 1 - Características dos fluidos refrigerantes típicos. (MILLER & MARK, R, 2014).

### 3.5 Indústria 4.0

#### 3.5.1 Surgimento da indústria 4.0

A crescente evolução do setor industrial teve início entre 1760 a 1840 na Inglaterra, onde conseqüentemente teve-se a substituição de alguns métodos rudimentares ou artesanais por máquinas e ferramentas desenvolvidas na época. Devido a exploração

de carvão a fim de substituir as fontes de biocombustíveis, e através da utilização da energia à vapor esse período ficou denominado como a primeira revolução industrial (COELHO, 2016).

Em seguida através da segunda revolução industrial, teve-se o melhoramento em algumas das indústrias, como a química, elétrica e do aço, o qual ocorreu entre período final da segunda guerra mundial por volta de 1945 (COELHO, 2016). Durante esta evolução teve o surgimento dos primeiros barcos de aço movidos a motores a vapor, e assim revolucionando a logística de transportes de cargas e mercadorias (MEGDA, 2018). A partir da automatização e robotização das linhas de produção, e surgimento dos computadores, semicondutores e a tecnologia da informação, este período ficou denominado como a revolução digital ou (Terceira revolução industrial), estes acontecimentos ocorreram nas décadas de 1950 e 1970 (COELHO, 2016).

No século XXI, através do aprimoramento e a evolução de forma natural dos sistemas industriais e com o avanço da tecnologia, passa-se a iniciar a quarta revolução industrial. Por meio da utilização de sistemas inteligentes no setor de produção, da internet das coisas, assim ocorrerá a integração das redes globais das empresas com suas máquinas, possibilitando um melhor controle dos processos industriais. (MEGDA, 2018).

### **3.5.2 Internet das coisas (IoT)**

Com o avanço exponencial da tecnologia, a internet das coisas IoT ( Internet of Things) possibilita a comunicação remota entre dispositivos eletrônicos, de forma online e totalmente interligada com o usuário e até entre máquinas, coletando analisando e transmitindo ou recebendo dados de sensores eletrônicos, termômetros, e convertendo esses dados em ação pré-determinadas por meio de uma lógica programável (OLIVEIRA, 2017).

Existem aplicações dessa tecnologia nas praças de pedágio, onde a cobrança é feita de forma automática, em sistemas de navegação via GPS que orienta o motorista de forma personalizada sugerindo destinos de acordo com o perfil das buscas realizadas, o reconhecimento biométrico que é utilizado em larga escala em celulares, fechaduras inteligentes, em sistemas de segurança é de extrema importância de ser totalmente

interligado de forma autônoma, ou seja, que transmita e tome decisões em tempo real, sobre os acontecimentos considerados suspeitos (OLIVEIRA, 2017).

### **3.5.3 Arduino**

O Arduino foi criado em 2005 por um grupo de 5 pesquisadores: Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe, Gianluca Martino e David Mellis (RIBEIRO et al., 2017). O objetivo era elaborar um dispositivo que fosse ao mesmo tempo econômico, funcional e fácil de programar, se tornando acessível a estudantes e projetistas amadores. Além disso, foi introduzida a ideia de hardware livre, o que significa que qualquer um pode montar, modificar, melhorar e personalizar o Arduino, partindo do mesmo hardware básico (RIBEIRO et al., 2017).

Segundo o fabricante Arduino.cc, ao longo dos anos, a placa arduino tem sido o cérebro de milhares de projetos, dos mais simples do dia a dia a complexos instrumentos científicos. Uma comunidade mundial de criadores da sua própria história, como estudantes, entusiastas, artistas, programadores e profissionais - se reúnem em torno dessa plataforma de código aberto. Suas contribuições adicionaram uma quantidade incrível de conhecimento acessível que pode ser de grande ajuda para iniciantes e especialistas.

De acordo com (RIBEIRO et al., 2017), foi criada uma placa composta por um microcontrolador, circuitos de entrada/saída e que pode ser facilmente conectada à um computador e programada via IDE (*Integrated Development Environment*, ou *Ambiente de Desenvolvimento Integrado*) utilizando uma linguagem baseada em C/C++, sem a necessidade de equipamentos extras além de um cabo USB.

### **3.5.4 Sensores e Transdutores**

#### **Sensores**

Em um processo monitorado onde tem-se a necessidade de captar valores de variáveis físicas que surgem ao longo do sistema, os sensores atuam enviando informações para o circuito eletrônico de acontecimentos externos, para que ele venha a comandar ou atuar em uma determinada ação. As variáveis de um sistema, são

acontecimentos físicos mensuráveis como por exemplo: temperatura, umidade, pressão, onde para cada aplicação é caracterizado pela sua função específica, e classificam-se em analógicas e digitais (THOMAZINI, 2005). Diferentemente de sensores, os atuadores atuam ativamente modificando as variáveis de controle, como exemplo de atuadores tem -se, os cilindros pneumáticos ou hidráulicos, relés estáticos ou eletromecânicos, solenoides, motores de passo, síncrono e servo motor (THOMAZINI, 2005).

Conforme Thomazini (2005) explica as seguintes características dos sensores, onde eles captam certas grandezas como, luz, calor, som, para efeitos mecânicos tem-se a posição, força e velocidade. Em caso de um sensor ser sensibilizado por um nível de tensão muito baixo, deve-se utilizar um amplificador de sinal que por sua vez tem como função, elevar o nível de saída, para que seja possível sua utilização. Os sensores analógicos tem a capacidade de assumir qualquer valor durante o tempo, limitado a sua faixa de medição, essa característica aplica-se apenas para variáveis analógicas, de pressão, vazão, umidade, temperatura, velocidade, ângulo distância, torque, luminosidade, força, e através de circuitos eletrônicos não digitais é possível ser mensuradas.

Diferentemente dos analógicos, os sensores digitais ao longo do tempo limitam-se a assumir apenas dois valores, para o seu sinal de saída, um sistema binário compreendido por zero ou um, contudo não existem grandezas reais com esses valores de saída, uma vez que o sistema converte para binário, apenas para ser compreendido pelo sistema de controle, esse tipo de sensor por exemplo é aplicado para detecção de objetos (THOMAZINI, 2005).

### **Transdutores**

Transdutor é um instrumento completo integrando o sensor na sua construção e, tem como função converter a informação através de uma grandeza física recebida pelo sensor, em uma mensurável, englobando a parte sensorial e, condicional do circuito nos dispositivos de controle (ALBERTAZZI, 2017). Na prática ele converte uma grandeza física em um sinal de tensão ou corrente elétrica, possibilitando a interpretação do circuito eletrônico.

Os transdutores com uma maior tecnologia empregada podem ser de vários estágios, onde ocorre várias mudanças de efeitos físicos, em que um sinal mecânico pode ser transformado em um óptico que por sua vez será elétrico. Os sensores e transdutores possuem uma faixa de medição ou range, que compõe um conjunto de valores da variável medida, compreendidos em um limite superior e inferior, de acordo com a capacidade do instrumento (ALBERTAZZI, 2017).

### 3.6 Modelos de bancadas didáticas de refrigeração de outros autores

Através da utilização de bancadas didáticas, podem ser simulados vários processos, com diversos modelos de bancadas, cada uma focada em uma área de atuação, é possível ensinar e adquirir conhecimento sem medo de estragar algum equipamento que em um ambiente normalmente causariam problemas. Exemplos destas aplicações, foram constatadas em diversas monografias e teses de trabalhos de conclusões de cursos específicos.

Toigo (2013), desenvolveu uma bancada didática de refrigeração por compressão de vapor que teve como proposta ser construída com os principais equipamentos que fazem parte do ciclo como mostrado na figura 4.

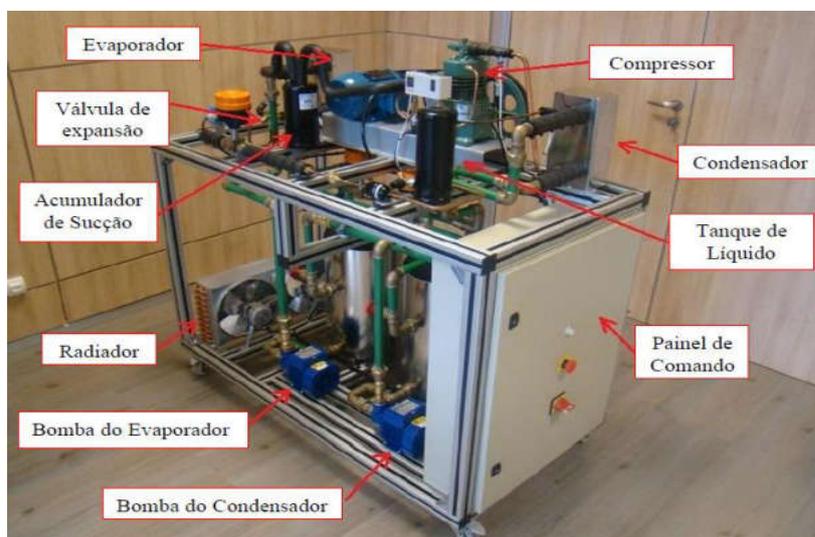


Figura 4– Bancada de refrigeração por compressão a vapor. (TOIGO, 2013)

O projeto prevê ainda a definição da instrumentação e automação da bancada, de modo a permitir que os dados de pressão, temperatura e vazão sejam facilmente coletados e os parâmetros de operação ajustados.

Já Goulart (2008), projetou uma bancada que fosse capaz de auxiliar os alunos no estudo de transferência de calor e massa, exemplificada na figura 5, onde pode proporcionar aos alunos uma visão mais ampla, assimilando a parte teórica vista em sala com a prática no laboratório.



Figura 5 – Bancada didática de um trocador de calor compacto aletado. Fonte (GOULART, 2008).

O mesmo aconteceu com Geronimo (2017), que realizou o aprimoramento de uma bancada didática portátil de refrigeração mostrada na figura 6.



Figura 6 - Bancada didática portátil de refrigeração. Fonte (GERONIMO, 2017).

O autor de a finalidade de realizar ensaios para a observar o comportamento do ciclo de refrigeração quando o condensador ou o evaporador são mantidos a uma temperatura constante, exemplificando o que pode ser estudado com a bancada.

#### 4. METODOLOGIA.

O trabalho teve ampla necessidade de obter e aprimorar os conhecimentos específicos, possibilitando a elaboração dele.

- O entendimento sobre a primeira lei da termodinâmica e energia interna;
- Balanço de energia;
- Transferência de calor;
- Compreender como funciona a segunda lei de termodinâmica;
- Os ciclos de refrigeração por compressão há vapor.

##### 4.1 Fluxograma

A metodologia do presente trabalho está baseada no fluxograma 1, o qual está listado as seguintes etapas do processo de elaboração.

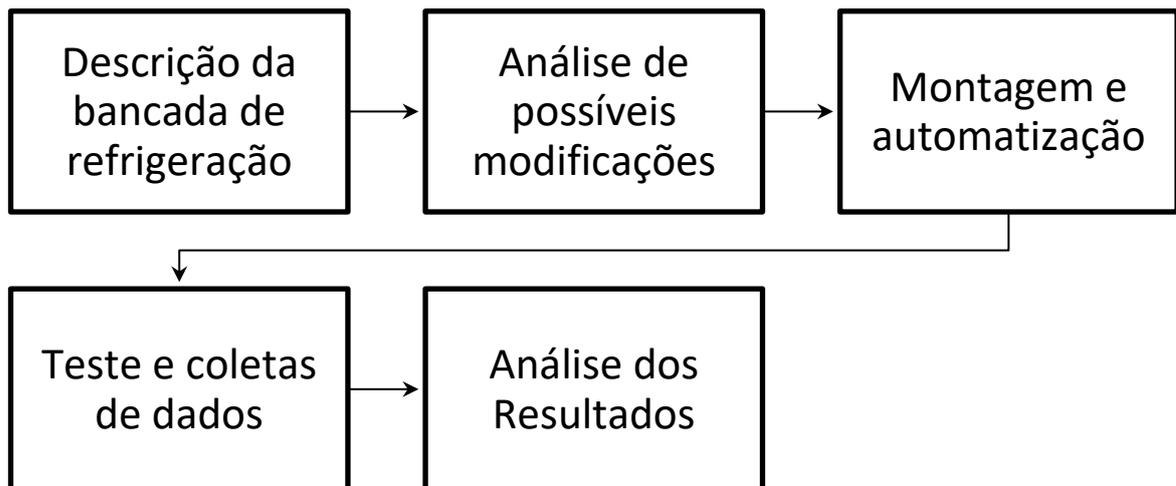


Figura 7 - Fluxograma metodológico da elaboração do trabalho - Fonte do autor (2020).

## 4.2 Descrição da bancada de refrigeração.

Partindo dos conhecimentos explorados nos capítulos anteriores, tornou-se possível identificar com clareza os componentes e o funcionamento da bancada de refrigeração, existente no laboratório das FAACZ e desenvolvida por (SCARPATI et al., 2015), a qual segue exemplificada na figura 8.



Figura 8 - Bancada de Didática de Refrigeração Por Compressão a Vapor - fonte do autor (2020).

A presente bancada didática é composta pelos seguintes equipamentos:

- Compressor rotativo de 12000 Btu/h, 1 $\phi$ -60Hz-115v;
- Condensador;
- Válvula de expansão;
- Evaporador;
- Sensores digitais de temperatura integrados a displays LCD's;
- Manômetros de alta pressão;
- Manômetro de baixa pressão.

## 4.3 Análise de possíveis modificações.

A pandemia do covid-19 trouxe com si algumas dificuldades, uma delas seria a impossibilidade do uso de equipamentos laboratoriais em aulas práticas e experimentais. Com isto e através de estudos realizados em trabalhos de outros autores, ficou claro a possibilidade de realizar a automatização da bancada de

refrigeração por compressão a vapor, a fim de auxiliar os professores em aulas práticas presenciais e remotas.

Portanto ao se automatizar o processo de acionamento, coleta e transmissão de dados da bancada didática de refrigeração por compressão a vapor, irar possibilitar uma maior dinâmica e didática das aulas ministradas remotamente na disciplina de Refrigeração e Ar-condicionado. Assim foi possível identificar as modificações e alterações no equipamento presente para atingir a automatização, tais como:

- Substituir os manômetros, por transdutores de pressão;
- Substituir os sensores de temperatura por sensores de temperatura de sinal digital;
- Instalar uma placa microcontroladora;
- Instalar conjunto de acionamento remoto;
- Instalar módulo WIFI;
- Programar e configurar a comunicação com o servidor online de monitoramento.

Por fim foi definido a lista de materiais necessários para automatizar o acionamento, coleta e transmissão de dados da bancada didática, conforme segue abaixo:

#### **Equipamentos substituídos:**

- Manômetros de alta pressão;
- Manômetros de baixa pressão;
- Sensores de temperatura;
- Displays de Lcd;

#### **Materiais utilizados para automatizar a bancada didática**

- Placa microcontrolador modelo (Arduino uno);
- Placas de circuito universal;
- Sensores de temperatura digitais (modelo DS18B20);
- Transdutores de pressão;
- Módulo microcontrolador WiFi (modelo ESP 01);
- Módulo Relé;

- Disjuntores;
- Chave contadora de acionamento magnético 220v;
- Carga de fluido refrigerante r22.

#### **4.4 Montagem e automatização.**

##### **4.4.1 Montagem e substituição de sensores.**

A etapa de montagem e automatização teve início ao se realizar a substituição dos sensores de temperatura pelos sensores de temperatura digital DS18B20, ilustrados na figura 9, o intuito em utilizar estes sensores está relacionado possibilidade de serem ligados em serie em uma única porta digital de sinal e possuem proteção contra agua e umidade. Estes sensores possuem um range de trabalho entre -55 a 125°C, sua alimentação pode ser com tensão entre 3,5 a 5v.



Figura 9 - Sensor de temperatura Ds18b20- Fonte do autor (2020).

Após a instalação dos sensores de temperatura, foram instalados os transdutores de pressão, foram utilizados três transdutores de pressão, conforme figura 10, onde dois apresentam um range de 0 a 1600 Psi e outro com range de 0 a 174 Psi, essa diferença de range esta relacionado aos pontos de alta e baixa pressão, conseguintemente a disponibilidade encontrada no mercado. Ambos os transdutores possuem um sinal analógico de informação, onde variam entre 0,5 a 4,5v, eles devem ser alimentados com uma tensão de 5v.



Figura 10 - Transdutores de pressão - Fonte do autor (2020).

#### 4.4.2 Acionamento remoto.

Para o acionamento do equipamento foi montado um conjunto de disjuntores e chave de contator magnético, conforme segue na figura 11, cujo acionamento é realizado de forma remota, através de um módulo relé após ter recebido o sinal do servidor online.

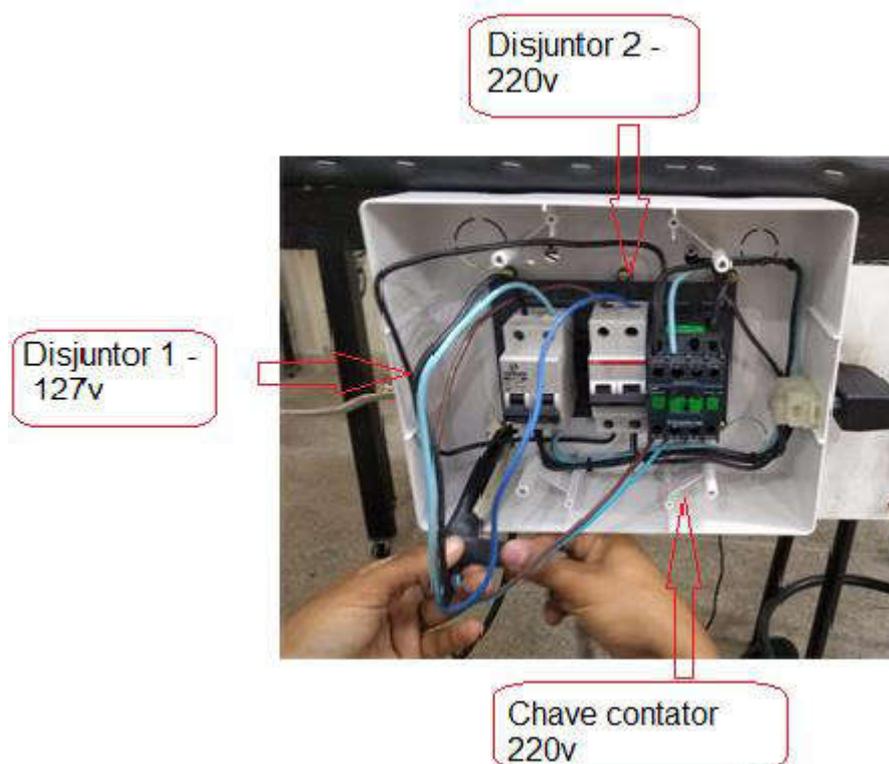


Figura 11 - Conjunto de Acionamento remoto - Fonte do autor, 2020.

Como os módulos relés disponíveis para placas Arduino não costumam suportar as cargas indutivas de equipamentos como motores elétricos, foi utilizado o conjunto de disjuntores e chave contadora para acionar e desligar a bancada didática.

#### 4.4.3 Coleta de dados.

Para a coleta, acionamento, armazenamento, transmissão e recebimento de dados, foi montado o conjunto de placa Arduino uno, módulo WIFI de modelo esp01 juntamente com o módulo relé, como segue abaixo na figura 12.

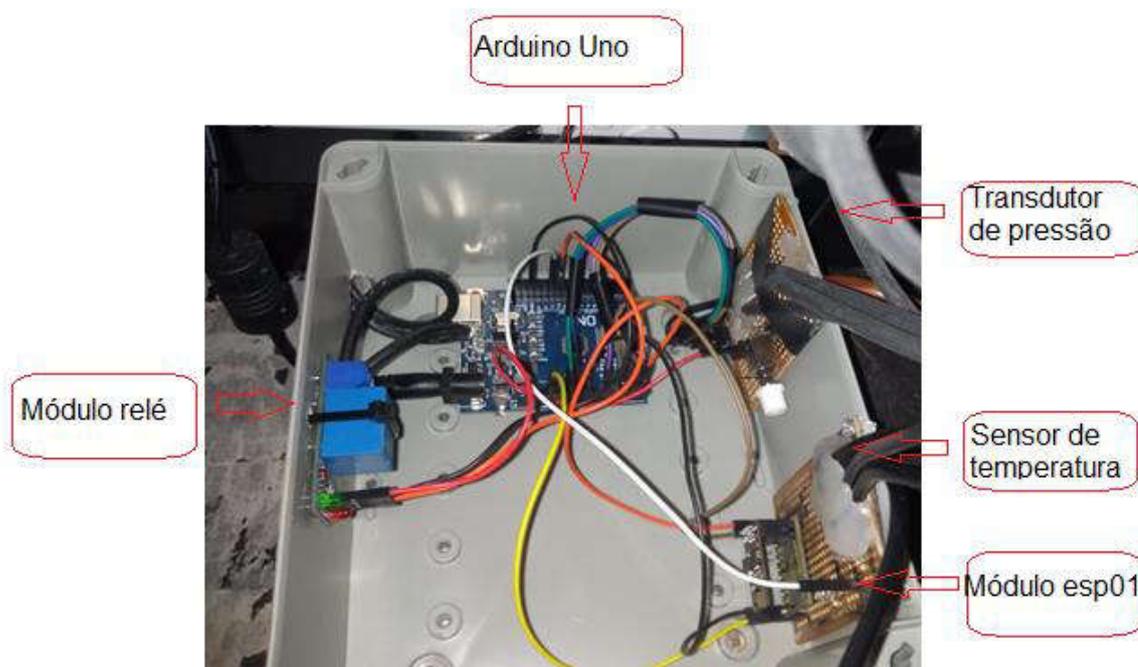


Figura 12 - Conjunto de sensores e módulos – Fonte do autor, 2020.

#### 4.4.4 Bancada didática automatizada e finalizada.

Após toda montagem e instalações dos módulos e sensores foi compilado para o Arduino e o modulo WIFI a programação em base c++, cuja foi confeccionada e carregada através da IDE do desenvolvedor Arduino.cc. A mesma pode ser localizadas nos apêndices A e B, segue logo abaixo na figura 13 a bancada didática finalizada.

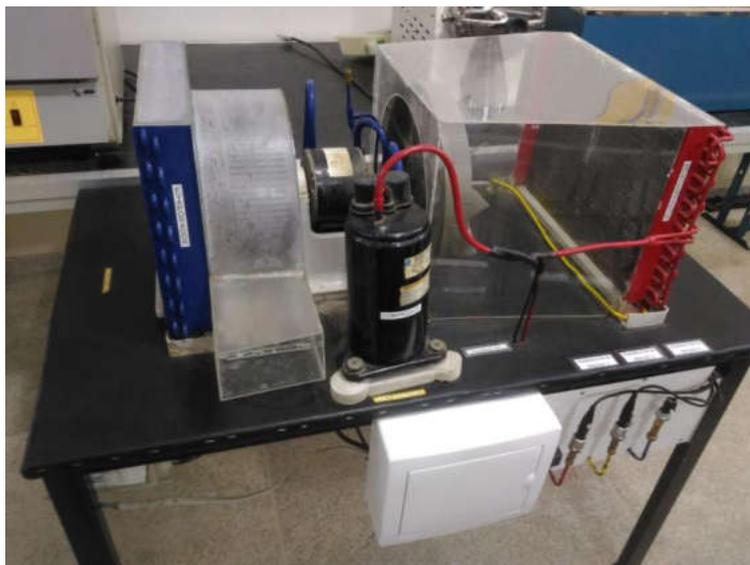


Figura 13 - Bancada Didática De refrigeração por compressão a vapor automatizada.

#### **4.5 Teste e coletas de dados**

Após a finalização do processo de montagem e automatização da bancada didática de refrigeração, foi coletado os dados com o intuito de realizar a validação do equipamento. Entretanto, a coleta de dados ocorreu de duas formas, através da porta serial utilizando um cabo usb e a IDE do Arduino, a fim de realizar a média e desvios padrões e, por meio da coleta realizada através do servidor online, ambas as formas estão descritas os procedimentos nos apêndices C e D.

Utilizando a porta serial para coletar os dados a placa Arduino uno, irar fazer a leitura dos sensores de temperatura e dos transdutores de pressão, assim, os dados serão impressos na tela do programa, conforme a figura 14, entretanto os valores são apenas ilustrativos pois estava em período de testes.

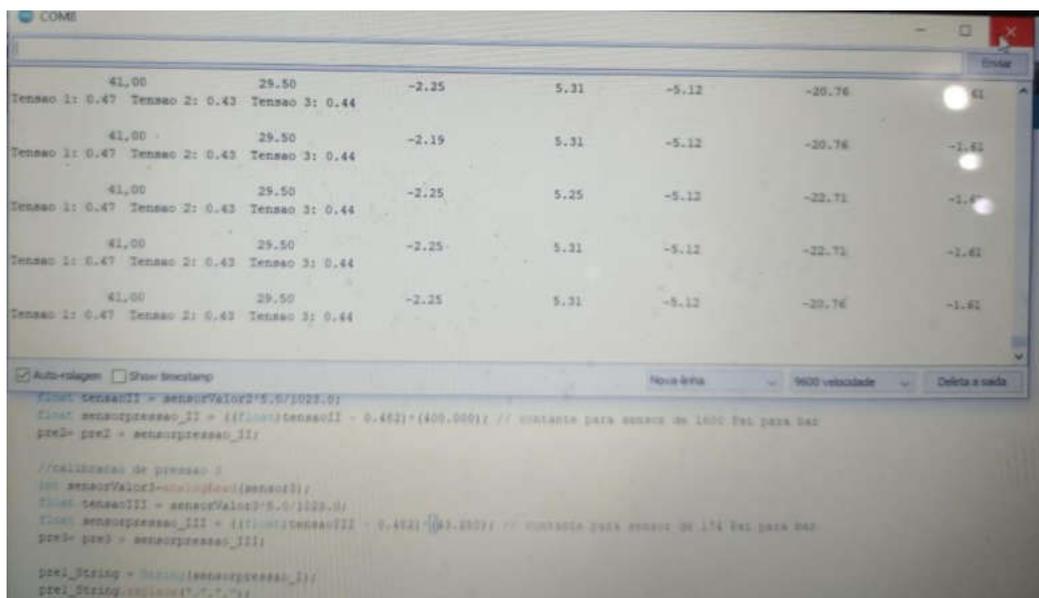


Figura 14 - Dados através da porta serial usb – Fonte do autor, 2020.

Já a coleta de dados remota, foi realizada através do servidor online de monitoramento, o qual é disponibilizado de forma gratuita pelo fabricante de componentes eletrônicos Adafruit. No processo a placa Arduino uno realiza o armazenamento e a média de 15 leituras dos sensores conectados, em seguida esses dados são transmitidos a cada 15 segundos para a plataforma através do módulo Wifi ESP 01, exemplificado na figura 12.

Por fim segue a ilustração na figura 15, onde está sendo realizada a coleta e transmissão dos dados para a plataforma online.

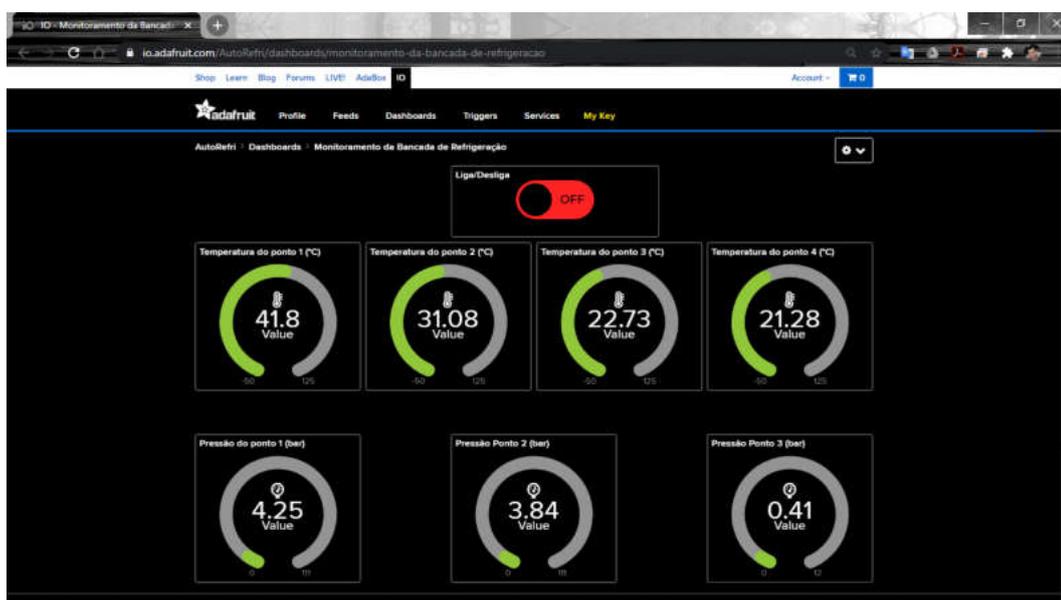


Figura 15 - Layout da coleta de dados online - Fonte do autor, 2020.

#### 4.6 Análise dos resultados.

Para a análise dos resultados foram adotados os alguns procedimentos com intuito de se obter a variação dados coletados e validar a automatização da bancada de refrigeração. Portanto os dados coletados obedeceram ao diagrama do ciclo de refrigeração, conforme segue na figura 16, assim se obtendo os valores de cada ponto termodinâmico do ciclo.

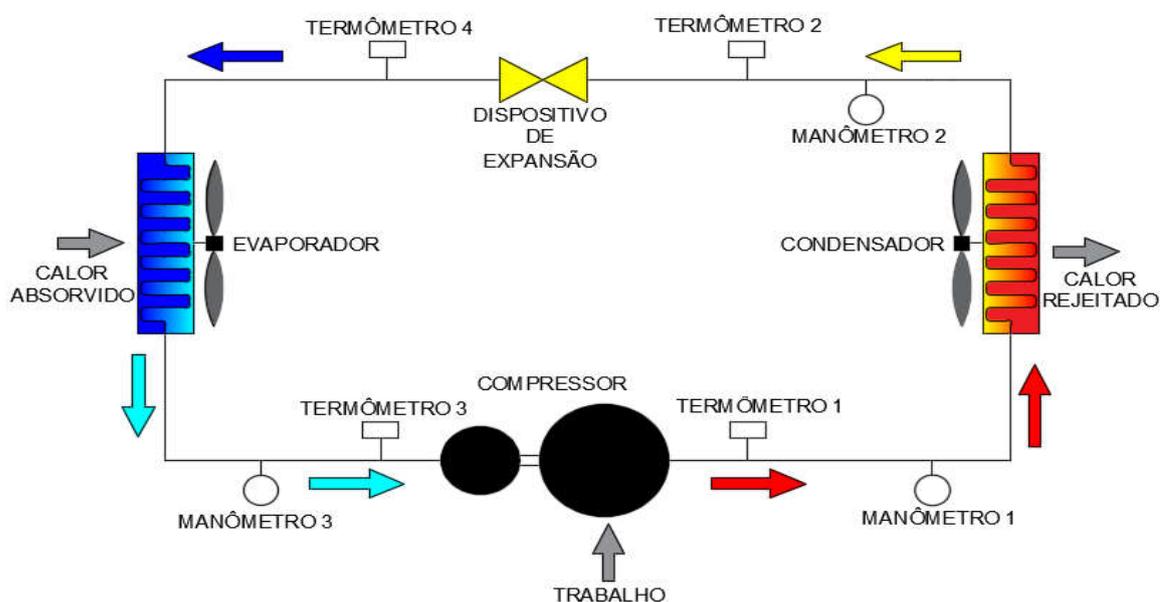


Figura 16 - Diagrama do ciclo de refrigeração da bancada automatizada - Fonte do autor, 2020.

Os dados coletados seguiram os parâmetros descritos na tabela 2, onde foi realizado o cálculo das medias e respectivos desvios padrões e em seguida foi obtido os valores das propriedades termodinâmicas do fluido R22, a qual está inserida na seção de anexos.

**Tabela 2 - Procedimentos das simulações.**

Potência do equipamento	Procedimento
Estágio 3	Visando que as leituras de temperatura e pressão de cada ponto do equipamento alcança-se uma certa estabilização, aguardou – se 5 minutos de operação do sistema e em seguida coletou os dados.
Estágio 2	Após a primeira simulação aguardou-se 10 minutos, cuja finalidade era de estabilizar o fluido refrigerante no sistema, por fim se reiniciou-se o sistema e aguardou – se novamente 5 minutos.
Estágio 1	Na última simulação repetiu-se o mesmo procedimento do estágio 2.

Tabela 2 – Procedimentos das simulações – Fonte do autor, 2020.

## 5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O processo de obtenção de dados se deu após a bancada estar ligada por 5 minutos, o Arduino foi o responsável por imprimir os valores indicados pelos transdutores e termômetros, a cada segundo era enviado o valor indicado por cada sensor, como havia uma diferença de temperatura no ambiente foi realizado várias leituras. Para realizar o cálculo do coeficiente de performance, foi adotado a média dos valores obtidos após 15 medições.

Como a bancada possui 3 estágios de funcionamento foram realizados três diferentes testes, as tabelas 3, 4 e 5 a seguir mostram os valores obtidos por cada teste.

**Tabela 3 - Simulações realizadas no estágio 3**

<b>Estágio 3</b>							
	<b>T<sub>1</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>2</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>3</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>4</sub> (°C)</b>	<b>P<sub>1</sub>(bar)</b>	<b>P<sub>2</sub>(bar)</b>	<b>P<sub>3</sub>(bar)</b>
	53,00	31,44	6,25	5,06	4,28	3,82	0,42
	53,00	31,44	6,25	5,06	4,28	3,82	0,44
	53,00	31,44	6,25	5,00	4,30	3,82	0,42
	53,00	31,44	6,19	5,00	4,28	3,84	0,42
	53,00	31,50	6,13	5,00	4,30	3,84	0,41
	53,00	31,44	6,13	5,00	4,30	3,84	0,41
	53,00	31,44	6,13	4,94	4,28	3,82	0,42
	53,00	31,50	6,19	4,88	4,28	3,84	0,42
	53,00	31,44	6,19	4,88	4,30	3,82	0,41
	53,00	31,44	6,19	4,88	4,30	3,84	0,44
	53,00	31,44	6,19	4,88	4,30	3,82	0,42
	53,00	31,44	6,13	4,88	4,28	3,82	0,42
	53,00	31,44	6,19	4,88	4,26	3,84	0,41
	53,00	31,44	6,19	4,81	4,25	3,84	0,40
	53,00	31,44	6,13	4,81	4,30	3,82	0,42
MÉDIA	53,00	31,45	6,18	4,93	4,29	3,83	0,42
DESVIO	0	0,02	0,04	0,08	0,02	0,01	0,01

**Tabela 4 - Simulações realizadas no estágio 2**

<b>Estágio 2</b>							
	<b>T<sub>1</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>2</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>3</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>4</sub> (°C)</b>	<b>P<sub>1</sub>(bar)</b>	<b>P<sub>2</sub>(bar)</b>	<b>P<sub>3</sub>(bar)</b>
	50,50	31,12	5,06	3,44	4,26	3,80	0,44
	50,50	31,19	5,00	3,44	4,26	3,80	0,44
	50,50	31,12	5,00	3,44	4,26	3,60	0,44
	50,50	31,12	5,06	3,44	4,28	3,80	0,44
	50,50	31,12	5,00	3,38	4,28	3,80	0,42
	50,50	31,12	5,06	3,38	4,28	3,60	0,44
	50,50	31,12	5,00	3,31	4,28	3,80	0,44
	50,50	31,12	5,06	3,25	4,28	3,80	0,44
	50,50	31,12	5,06	3,19	4,26	3,80	0,42
	50,50	31,19	5,06	3,25	4,26	3,60	0,44
	50,50	31,12	5,06	3,31	4,26	3,80	0,44
	50,50	31,12	5,06	3,19	4,26	3,60	0,44
	50,50	31,12	5,06	3,13	4,28	3,80	0,42
	50,50	31,19	5,06	3,13	4,28	3,80	0,44
	50,50	31,12	5,00	3,06	4,30	3,80	0,45
<b>MÉDIA</b>	50,50	31,13	5,04	3,29	4,27	3,75	0,44
<b>DESVIO</b>	0	0,03	0,03	0,13	0,01	0,09	0,01

**Tabela 5 - Simulações realizadas no estágio 1**

<b>Estágio 1</b>							
	<b>T<sub>1</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>2</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>3</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>4</sub> (°C)</b>	<b>P<sub>1</sub> (bar)</b>	<b>P<sub>2</sub> (bar)</b>	<b>P<sub>3</sub> (bar)</b>
	50,00	31,62	3,50	0,88	4,26	3,86	0,42
	50,00	31,62	3,44	0,88	4,26	3,88	0,42
	50,00	31,62	3,44	0,81	4,28	3,86	0,42
	50,00	31,62	3,44	0,81	4,28	3,84	0,42
	50,00	31,62	3,38	0,81	4,26	3,86	0,42
	50,00	31,62	3,31	0,88	4,26	3,86	0,42
	50,00	31,62	3,38	0,88	4,28	3,86	0,42
	50,00	31,62	3,44	0,81	4,30	3,86	0,42
	50,00	31,62	3,38	0,81	4,28	3,88	0,42
	50,00	31,62	3,38	0,88	4,30	3,86	0,42
	50,00	31,62	3,44	0,81	4,28	3,85	0,44
	50,00	31,62	3,38	0,88	4,30	3,85	0,42
	50,00	31,62	3,38	0,88	4,30	3,86	0,42
	50,00	31,62	3,38	0,88	4,28	3,86	0,42
	50,00	31,62	3,38	0,88	4,28	3,86	0,44
<b>MÉDIA</b>	50,00	31,62	3,40	0,85	4,28	3,86	0,42
<b>DESVIO</b>	0	0,00	0,05	0,04	0,02	0,01	0,01

**Cop teórico do ciclo no estágio 1**

Foram desconsideradas todas as perdas de carga nas tubulações assim como a perda de pressão ocorrida no condensador ( $P_2=P_3$ ). O compressor foi considerado com uma eficiência isentrópica de 100%. Para encontrar as temperaturas na linha de saturação foram utilizados os valores de pressão contidos na tabela termodinâmica do R 22.

A figura 17 mostra o diagrama de Mollier do ciclo de refrigeração por compressão a vapor.

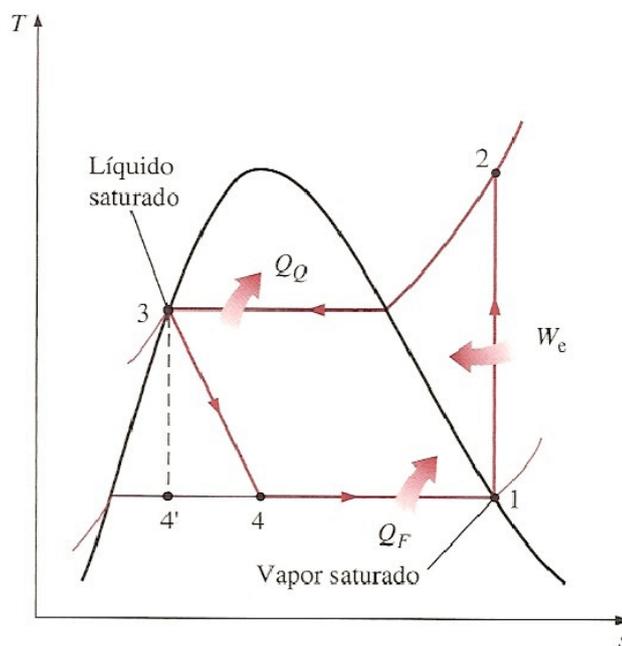


Figura 17 - Diagrama T-s - Fonte (ÇENGEL & BOLES, 2013).

O ponto 1 é o ponto de baixa pressão, sua entalpia é obtida analisando a tabela termodinâmica do R22, por se tratar da entrada do compressor e possuir pressão e temperatura de 0,42 bar e 3,4°C respectivamente, é determinado seu estado de vapor saturado. A entalpia do ponto 1 é obtida após a realização de uma interpolação, chegando ao valor de  $h_1 = 224,78 \text{ kJ/kg}$ .

O ponto 2 é a saída do compressor, o compressor acrescenta trabalho no ciclo aumentando assim sua pressão, o processo que ocorre do ponto 1 para o ponto dois é um processo isentrópico, ou seja, os dois pontos possuem a mesma entropia, como o ponto 2 está à direita do diagrama  $t \times s$  ele está no estado de vapor superaquecido. Sua temperatura é de 50°C e a pressão de 4,28 bar, seria necessária uma interpolação entre duas tabelas de superaquecimento, 4 e 4,5 bar, porém a temperatura máxima na tabela de 4 bar é de 45°C, portanto foi considerado a pressão de 4,5 bar. O Resultado obtido foi  $h_2 = 286,76 \text{ kJ/kg}$ .

O ponto 3 é a saída do condensador, o objetivo do condensador é transformar o fluido de vapor para líquido, ou seja, após passar pelo condensador o estado do ponto 3 é líquido saturado, e isso ocorre a pressão constante. Para obter suas propriedades basta fazer uma interpolação na tabela termodinâmica de pressão entre as pressões de 4,25 e 4,5 bar. A entalpia a pressão de 4,3 bar para líquido saturado é de  $h_3 = 39,94$  kJ/kg.

O ponto 4 é a saída da válvula de expansão, após passar pela válvula o fluido é expandido aumentando o volume e diminuindo a pressão, esse é um processo isoentálpico, sendo assim, a entalpia do ponto 4 é igual a entalpia do ponto 3. Portanto  $h_4 = 39,94$  kJ/kg.

### **Trabalho do compressor**

O valor do trabalho realizado pelo compressor é dado pela diferença da entalpia de saída e entrada do compressor logo,

$$W_c = h_2 - h_1$$

$$W_c = 61,98 \text{ kJ/kg}$$

Calor trocado dentro do condensador é dado pela diferença de entalpia na entrada e saída do condensador, portanto é representada por:

$$Q_f = h_2 - h_3$$

$$Q_f = 246,82 \text{ kJ/kg.}$$

O valor do coeficiente de performance no estágio 1 é obtido pela divisão do calor trocado no condensador pelo trabalho do compressor, o resultado é de 3,98.

O mesmo procedimento aplicado no estágio 1 foi adotado para o cálculo do COP no estágio 2 e 3 da bancada didática de refrigeração por compressão a vapor, a tabela 6 e 7 mostra os valores de entalpia em kJ/kg obtidos através de análises e interpolações da tabela termodinâmica.

**Tabela 6 - Entalpias do estágio 2.**

Entalpia 1	Entalpia 2	Entalpia 3	Entalpia 4
225,14	287,12	39,71	39,71

**Tabela 7 - Entalpias do estágio 3.**

Entalpia 1	Entalpia 2	Entalpia 3	Entalpia 4
224,75	288,92	39,86	39,86

O resultado do cop obtido no estágio 2 foi de 3,99 e no estágio 3 foi de 3,88.

### **5.1 Comparação dos resultados obtidos antes e após a automação da bancada didática.**

Com intuito de se verificar e analisar a veracidade das medidas de temperatura e pressão coletadas após a automação da bancada didática de refrigeração a vapor, foi extraído os respectivos valores encontrados na tabela 8 do trabalho de Scarpati et al (2015). Os valores de pressão apenas foram convertidos de kPa para bar.

**Tabela 8 - Dados obtidos pelos autores que construíram a bancada.**

T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	T <sub>4</sub> (°C)	P <sub>1</sub> (bar)	P <sub>2</sub> (bar)	P <sub>3</sub> (bar)
76,00	34,82	6,33	-0,93	16,47	15,97	3,14

Fonte – (SCARPATI et al., 2015).

O grupo utilizou um software para calcular o cop, chegando a um resultado de 3,59. Passaram-se 5 anos desde a última vez que a bancada foi ligada, no processo de análise para possíveis melhorias foi ligado o equipamento e os valores de temperatura e pressão coletados de são representados na tabela 9.

**Tabela 9 - Dados coletados antes da automação.**

	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	T <sub>4</sub> (°C)	P <sub>1</sub> (bar)	P <sub>2</sub> (bar)	P <sub>3</sub> (bar)
<b>DADOS</b>	54,70	35,80	18,70	-8,60	14,00	13,65	2,20
	54,90	35,90	18,74	-8,90	13,90	13,60	2,18
	55,20	36,00	18,90	-8,50	14,10	13,55	2,15
	54,50	35,40	19,00	-8,30	14,05	13,70	2,25
	54,30	35,90	19,10	-8,70	14,00	13,65	2,30
	54,00	36,00	18,50	-8,10	14,15	13,69	2,14
<b>Média</b>	54,60	35,83	18,82	-8,52	14,03	13,64	2,20
<b>Desvio padrão</b>	0,43	0,23	0,22	0,29	0,09	0,06	0,06

Foi detectado que era necessário a troca do fluido refrigerante, pois o equipamento estava muito tempo parado e sem manutenção, o líquido refrigerante foi perdendo suas propriedades e sua eficiência de climatização. Um técnico em refrigeração foi chamado para a troca do mesmo. No processo de troca o profissional instruiu que era importante o equipamento funcionar na faixa de 60 a 65 psi. Após realizada a recarga de gás do equipamento a bancada passou a operar entre 60 a 65 psi que vale aproximadamente 4,5 bar.

Ao analisar e comparar os dados de temperatura e pressão do sistema, os quais foram coletados anteriormente e posteriormente a automação, assim, considerando que os valores coletados em cada situação foram em dias diferentes, como a temperatura ambiente provavelmente não foi a mesma, logo, constatou-se a veracidade dos valores coletados após a automação.

Uma forma de verificar essa veracidade seria que os valores dos sensores de temperatura T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> e T<sub>4</sub> ocorrem de forma decrescente, ou seja, a Temperatura 1 é maior que a temperatura 2, assim sucessivamente para os outros sensores de temperatura e para todas as coletas de dados realizadas. Isto também pode ser observado para os valores coletados dos transdutores de pressão, onde a mudança de pressão ocorre da mesma forma decrescente. Outro ponto a se ressaltar, é que a pressão do ponto 1 (P<sub>1</sub>) deve ser maior do que a do ponto 2 (P<sub>2</sub>), pois após o

deslocamento do fluido refrigerante pelo condensador existe perda de carga, ou seja a pressão vai ser menor. Pode-se observar estas ocorrências na tabela 10, onde está sendo realizada a comparação dos valores anteriores e posterior ao processo de automatização.

**Tabela 10 - Comparação dos dados antes e após a automação.**

	<b>T<sub>1</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>2</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>3</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>4</sub> (°C)</b>	<b>P<sub>1</sub> (bar)</b>	<b>P<sub>2</sub> (bar)</b>	<b>P<sub>3</sub>(bar)</b>
<b>Tabela 8</b>	76	34,82	6,33	-0,93	16,47	15,97	3,14
<b>Tabela 9</b>	54,60	35,83	18,82	-8,52	14,03	13,64	2,20
<b>Simulação 1</b>	53,00	31,45	6,18	4,93	4,29	3,83	0,42
<b>Simulação 2</b>	50,50	31,13	5,04	3,29	4,27	3,75	0,44
<b>Simulação 3</b>	50,00	31,62	3,40	0,85	4,28	3,86	0,42

Percebe-se que os valores encontrados após a automação não são os mesmo que os valores coletados anterior ao processo, isto ocorreu devido a carga de fluido refrigerante R22 instalada. Mesmo trabalhando com uma pressão inferior, o coeficiente de performance encontrado após realizado todas as melhorias na bancada foi de 3,88, um valor bem próximo dos 3,59 encontrados pelo grupo que construiu a bancada.

Portanto a automação da bancada didática foi validada, pois cada ponto de temperatura e pressão ocorre o decréscimo em relação ao ponto anterior e o COP (coeficiente de performance) encontrado após a automação esta próximo ao encontrado quando a bancada foi construída.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.

Quando se iniciou o trabalho de pesquisas, contatou-se que em meio a pandemia do covid-19, a dificuldade de realização de aulas práticas, dificulta o aprendizado de alunos da graduação de engenharia mecânica, onde a necessidade de realização de aulas práticas é presente para que o entendimento e absorção do conteúdo teórico seja efetivo.

Diante disso a pesquisa teve como objetivo geral a construção de uma bancada didática automatizada, que possibilite de maneira remota a simulação de um ciclo termodinâmico de refrigeração. Constata-se que o objetivo geral foi atendido porque efetivamente o trabalho conseguiu demonstrar funcionamento do ciclo através da fabricação da bancada.

O primeiro objetivo específico era estudar os sistemas termodinâmicos e os ciclos de refrigeração, que foi atendido ao realizar a análise dos dados coletados em estudo da bancada.

O segundo foi estudar e levantar dados necessários para realizar a lógica de programação, que foi atendido aplicando e modificando a lógica de programação no Arduino.

O terceiro era levantar os materiais necessários para automatizar o processo da bancada didática, objetivo concluído através de pesquisa por dispositivos capazes de atender a demanda, atendendo as particularidades de cada instrumento de medição.

O quarto era a montagem da bancada e realização de testes, objetivo este cumprido por meio da validação da bancada antes e depois da automatização, instalação de dispositivos elétricos e eletrônicos e interligações por meio de condutores elétricos.

A pesquisa partiu da hipótese de que para uma melhor absorção do conteúdo teórico aprendido em sala, as aulas práticas remotas são necessárias para a qualidade e segurança do ensino acadêmico, e partir de então testou-se, validou e confirmou a hipótese no final da automatização.

O problema inicialmente era proporcionar de maneira segura, um ensino dinâmico e de maior qualidade, voltado para a matéria de termodinâmica, com o conteúdo de

refrigeração por compressão a vapor, onde foi solucionado com a substituição dos equipamentos e aplicação da nova interface de hardware e software.

A metodologia partiu do princípio do entendimento dos processos termodinâmicos envolvidos, onde cada integrante do grupo buscou os conhecimentos necessários para em analisar as possíveis modificações e melhorias aplicáveis, em seguida realizou a validação inicialmente da bancada, para a montagem dos componentes, e coleta dados através da porta serial com auxílio de um cabo USB, e a IDE do Arduino, a fim de realizar a média e desvios padrões e, por meio da coleta realizada através do servidor online. E com os dados a partir de um procedimento foi possível realizar a análise.

Diante da metodologia proposta percebe-se que o trabalho poderia ter sido realizado com uma pesquisa mais ampla na bibliografia para analisar os aspectos de diferentes fluidos termodinâmicos expostos às mesmas condições de temperatura e pressão.

As recomendações para pesquisas futuras sugerem integrar o sistema a um servidor my SQL juntamente com a sincronização do Excel. Abordar a aplicação de um display mostrando alguns dados em tempo real com gráficos, ou até mesmo mostrando uma simulação para o comportamento de diferentes fluidos sujeitos as mesmas condições. Instalação de vídeo monitoramento para acompanhamento e desativação da bancada em emergência.

## 7. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO.

- ADIERS, A.; A. REOLON., E.; G. MARCANTE, L. BANCADA DIDÁTICA PARA COMPARAR OS EFEITOS DE DIFERENTES COMPRESSORES E DISPOSITIVOS DE EXPANSÃO EM UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO. **UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**, 2011.
- ALBERTAZZI, ARMANDO; SOUSA ANDRE; - Fundamentos da Metrologia Científica e Industrial 2 Ed. 2017
- AMORIM, M. J. Desenvolvimento de Bancada Didático-Experimental de Baixo Custo para Aplicações em Controle Ativo de Vibrações. **Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Mecânica**, p. 110, 2006.
- ARDUINO.CC. **O que é o Arduino**. 2020. Acessado em abril 2020. Disponível em<<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>.
- BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. **Fundamentos da termodinâmica**. 8° Ed, 2013.
- ÇENGEL, A. YUNUS; BOLES, A. MICHAEL. **Termodinâmica**. ANGH Editora Ltda, 7ª Ed, São Paulo, 2013.
- COELHO, P. M. N. Rumo à Indústria 4.0. **Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade de Coimbra**, p. 65, 2016.
- COSTA, F. N. Análise Comparativa da Válvula de Expansão Eletrônica e do Tubo Capilar em Sistemas de Refrigeração Análise Comparativa da Válvula de Expansão Eletrônica e do Tubo Capilar em Sistemas de Refrigeração. **Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Mecânica**, p. 99, 2014. Disponível em: <[http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/265902/1/Costa\\_FernandoNascimento\\_M.pdf](http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/265902/1/Costa_FernandoNascimento_M.pdf)>.
- CUZZUOL, J. P. P. Sistema de detecção e diagnóstico de falha aplicado a instalações de refrigeração por compressão de vapor. **UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO TECNOLÓGICO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**, p. 130, 2014. Disponível em: <<http://livrozilla.com/doc/442185/sistema-de-deteccao-e-diagnostico-de-falha-aplicado-a-ins...>>.
- FLORENCIO, J. S. et al. Desenvolvimento de uma Bancada Didática de

- Refrigeração. **FACULDADES INTEGRADAS DE ARACRUZ - FAACZ**, p. 101, 2015.
- GARCIA, A. V. L. A. dos S. M. E. BANCADA DIDÁTICA PARA TESTES DE FALHAS DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO. **UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**, 2012. Disponível em: <<https://www.rics.org/south-asia/upholding-professional-standards/standards-of-conduct/ethics/>>.
  - GERONIMO, A. Aprimoramento da bancada didática portátil de refrigeração. **UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**, p. 76, 2017.
  - GOULART, H. S. Desenvolvimento de Bancada Didática para Estudos de Desempenho Térmico de um Trocador de Calor Compacto Aletado. **Universidade Sao Francisco**, p. 33, 2008.
  - MEGDA, R. G. INDÚSTRIA 4.0: aplicação dos conceitos para identificar falhas de lubrificação. **CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS UNIS**, p. 1–59, 2018.
  - MENDES, T. DIAGNÓSTICO TERMODINÂMICO APLICADO A UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR. **UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÃ**, p. 204, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/1292>>.
  - MOURA, M.; AGUIAR, C. E. Entropia e a Segunda Lei da Termodinâmica Manual para o Professor. **Universidade Federal do Rio de Janeiro**, 2016. Disponível em: <[https://www.if.ufrj.br/~pef/producao\\_academica/dissertacoes/2016\\_Marcos\\_Moura/modulo0.pdf](https://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/dissertacoes/2016_Marcos_Moura/modulo0.pdf)>.
  - MILLER; MARK,R. **Ar- Condicionado e Refrigeração**. LTC Editora Ltda, 2º ed, Rio de Janeiro, 2014.
  - MORAN, M; SHAPIRO, H. **Princípios de Termodinâmica Para Engenharia**. . LTC Editora Ltda, 8º ed, Rio de Janeiro, 2018.
  - OLIVEIRA, I. R. de. Indústria 4.0: um novo paradigma técnico-económico. **“FEP” Faculdade de Economia do Porto**, p. 50, 2017. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/111202/2/256922.pdf>>.
  - PEREIRA, E. J. DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA MODELO DE REFRIGERAÇÃO. **UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO**,

2018.

- REIS, M. R. F. L. P. F. J. P. dos. Construção e validação de uma bancada didática de impulso hidrostático. **Cobenge**, 2014.
- RIBEIRO, I. S. et al. A plataforma arduino: princípios de funcionamento e demonstração prática com um controlador de ventiladores. **VII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção**, 2017. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/arduino/>>.
- SALVADOR, F. Projeto De Um Sistema De Refrigeração Industrial Com 'Set-Point' Variável. **Usp**, p. 123, 1999. Disponível em: <[http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3139/tde-05102010-112239/publico/Dissertacao\\_Francisco\\_Salvador.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3139/tde-05102010-112239/publico/Dissertacao_Francisco_Salvador.pdf)>.
- SCARPATI, A. de L. et al. Bancada didática de um sistema de refrigeração por compressão a vapor. **FAACZ "Faculdades Integradas de Aracruz"**, v. 53, n. 9, p. 72, 2015.
- TOIGO, É. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DE UMA BANCADA DIDÁTICA DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR. **UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA**, v. 13, n. 3, 2013.
- THOMAZINI, DANIEL; ALBUQUERQUE, PEDRO – **Sensores Industriais Fundamentos e Aplicações** 8 Ed. 2005.

## 8. APÊNDICES.

### 8.1 Apêndice A.

#### Programação do Arduino uno.

```

/ INCLUSÃO DE BIBLIOTECAS
#include <A2a.h>
#include <DallasTemperature.h>
// DEFINIÇÃO DO ENDEREÇO DO SLAVE
#define endereco 0x08 // ENDEREÇO HEXADECIMAL
#define DS18B20 11 //DEFINE O PINO DIGITAL UTILIZADO PELO SENSOR
// INSTANCIANDO OBJETOS
A2a arduinoMaster;
OneWire ourWire(DS18B20); //CONFIGURA UMA INSTÂNCIA ONEWIRE PARA SE COMUNICAR
COM O SENSOR
DallasTemperature sensors(&ourWire); //BIBLIOTECA DallasTemperature UTILIZA A OneWire
// DECLARAÇÃO DE VARIÁVEIS TEMPERATURA
int Temperatura1;
int Temperatura2;
int Temperatura3;
int Temperatura4;
float Temp1;
float Temp2;
float Temp3;
float Temp4;
// DECLARAÇÃO DE VARIÁVEIS PRESSÃO
// sensores de pressao
int sensor1=A1;
int sensor2=A0;
int sensor3=A3;
int pressao_I;
int pressao_II;
int pressao_III;
// variaveis para médias para o servidor online.
float pre1;
float pre2;
float pre3;
float t1;
float t2;
float t3;
float t4;
int x=0;
int i1=0;
int i2=0;
String pre1_String;
String pre2_String;
String pre3_String;
String t1_String;
String t2_String;
String t3_String;
String t4_String;
void setup() {
// INICIA A COMUNICAÇÃO SERIAL
pinMode(sensor1, INPUT);
pinMode(sensor2, INPUT);
pinMode(sensor3, INPUT);

```

```

Serial.begin(9600);
// INICIA A COMUNICAÇÃO ENTRE ARDUINOS COMO SLAVE NO ENDEREÇO DEFINIDO
arduinoMaster.begin(endereco);
// FUNÇÕES PARA COMUNICAÇÃO
arduinoMaster.onReceive(receberDados);
arduinoMaster.onRequest(enviarDados);
// INICIA O SENSORORES DE TEMPERATURA
sensors.begin();
int n = sensors.getDeviceCount(); // localiza os quantidades de sensores de temperatura.
delay(1000);
//ESCREVE NA SERIAL O MENU DE SENSORES DE TEMPERATURA E PRESSÃO
Serial.print("Sensores de temperatura encontrados: ");
Serial.println(n);
Serial.print("Temperatura 1 (°C)"); //IMPRIME O TEXTO NA SERIAL
Serial.print(" ");
Serial.print("Temperatura 2 (°C)");
Serial.print(" ");
Serial.print("Temperatura 3 (°C)");
Serial.print(" ");
Serial.print("Temperatura 4 (°C)");
Serial.print(" ");
Serial.print("Pressão 1 (bar)");
Serial.print(" ");
Serial.print("Pressão 2 (bar)");
Serial.print(" ");
Serial.println("Pressão 3 (bar)");
}
void loop() {
for(x=0;x<15;x++){
sensors.requestTemperatures();//SOLICITA QUE A FUNÇÃO INFORME A TEMPERATURA DO
SENSOR
t1= sensors.getTempCByIndex(0);
t2= sensors.getTempCByIndex(1);
t3= sensors.getTempCByIndex(2);
t4= sensors.getTempCByIndex(3);
Temp1=Temp1 + t1;
Temp2=Temp2 + t2;
Temp3=Temp3 + t3;
Temp4=Temp4 + t4;
t1_String = String(t1);
t1_String.replace(".",",");
Serial.print(" ");
Serial.print(t1_String);
t2_String = String(t2);
t2_String.replace(".",",");
Serial.print(" ");
Serial.print(t2);
t3_String = String(t3);
t3_String.replace(".",",");
Serial.print(" ");
Serial.print(t3);
t4_String = String(t4);
t4_String.replace(".",",");
Serial.print(" ");
Serial.print(t4);
//calibracao de pressao 1
int sensorValor1=analogRead(sensor1);
float tensaol = sensorValor1*5.0/1023.0;
float sensorpressao_l = ((float)tensaol - 0.482)*(400.000*0.0689); // constante para sensor de 1600 Psi
para bar

```

```

pre1= pre1 + sensorpressao_I;
//calibracao de pressao 2
int sensorValor2=analogRead(sensor2);
float tensaoII = sensorValor2*5.0/1023.0;
float sensorpressao_II = ((float)tensaoII - 0.482)*(400.000*0.0689); // constante para sensor de 1600
Psi para bar
pre2= pre2 + sensorpressao_II;
//calibracao de pressao 3
int sensorValor3=analogRead(sensor3);
float tensaoIII = sensorValor3*5.0/1023.0;
float sensorpressao_III = ((float)tensaoIII - 0.482)*(43.280*0.0689); // constante para sensor de 174 Psi
para bar
pre3= pre3 + sensorpressao_III;
pre1_String = String(sensorpressao_I);
pre1_String.replace(".",",");
Serial.print("          ");
Serial.print(sensorpressao_I);
pre2_String = String(sensorpressao_II);
pre2_String.replace(".",",");
Serial.print("          ");
Serial.print(sensorpressao_II);
pre3_String = String(sensorpressao_III);
pre3_String.replace(".",",");
Serial.print("          ");
Serial.println(sensorpressao_III);
if(x==14){
// médias das temperaturas e salvamento na variável inteira.
Temp1=Temp1/15;
Temperatura1=int(100*Temp1);
Temp1=0;
Temp2=Temp2/15;
Temperatura2=int(100*Temp2);
Temp2=0;
Temp3=Temp3/15;
Temperatura3=int(100*Temp3);
Temp3=0;
Temp4=Temp4/15;
Temperatura4=int(100*Temp4);
Temp4=0;
if(Temperatura3<0){
Temperatura3= (Temperatura3 *(-1));
i1=1;
}
if(Temperatura4<0){//para facilitar a conversão do número negativo para byte
Temperatura4= (Temperatura4 *(-1));
i2=1;
}
// médias das pressões e salvamento na variável inteira
pre1= pre1/15;
pressao_I = int(100*pre1);
pre1=0;
pre2= pre2/15;
pressao_II = int(100*pre2);
pre2=0;
pre3= pre3/15;
pressao_III = int(100*pre3);
pre3=0;
// transmite os valores das médias de temperatura e pressão para o esp01.
arduinoMaster.varWireWrite(0,highByte(Temperatura1));
arduinoMaster.varWireWrite(1,lowByte(Temperatura1));

```

```

arduinoMaster.varWireWrite(2,highByte(Temperatura2));
arduinoMaster.varWireWrite(3,lowByte(Temperatura2));
arduinoMaster.varWireWrite(4,highByte(Temperatura3));
arduinoMaster.varWireWrite(5,lowByte(Temperatura3));
arduinoMaster.varWireWrite(6,highByte(Temperatura4));
arduinoMaster.varWireWrite(7,lowByte(Temperatura4));
arduinoMaster.varWireWrite(8,highByte(pressao_I));
arduinoMaster.varWireWrite(9,lowByte(pressao_I));
arduinoMaster.varWireWrite(10,highByte(pressao_II));
arduinoMaster.varWireWrite(11,lowByte(pressao_II));
arduinoMaster.varWireWrite(12,highByte(pressao_III));
arduinoMaster.varWireWrite(13,lowByte(pressao_III));
arduinoMaster.varWireWrite(14,highByte(i1));
arduinoMaster.varWireWrite(15,lowByte(i1));
arduinoMaster.varWireWrite(16,highByte(i2));
arduinoMaster.varWireWrite(17,lowByte(i2));
}
}
x=0;
i1=0;
i2=0;

```

## 8.2 Apêndice B.

### Programação do Módulo esp 01.

```

// INCLUSÃO DE BIBLIOTECAS
#include <A2a.h>
#include "config.h"
// DEFINIÇÃO DO ENDEREÇO DO SLAVE
#define endereco 0x08 // ENDEREÇO HEXADECIMAL
// DEFINIÇÕES
#define tempoAtualizacao 15000
#define ligar HIGH
#define desligar LOW
// DEFINIÇÕES DE PINOS DO SLAVE
#define pinRele 10
// INSTANCIANDO OBJETOS
A2a arduinoSlave;
AdafruitIO_Feed *Temperatura1 = io.feed("Temperatura1");
AdafruitIO_Feed *Temperatura2 = io.feed("Temperatura2");
AdafruitIO_Feed *Temperatura3 = io.feed("Temperatura3");
AdafruitIO_Feed *Temperatura4 = io.feed("Temperatura4");
AdafruitIO_Feed *pressao_I = io.feed("pressao_I ");
AdafruitIO_Feed *pressao_II = io.feed("pressao_II ");
AdafruitIO_Feed *pressao_III = io.feed("pressao_III ");
AdafruitIO_Feed *rele = io.feed("rele");
// DECLARAÇÃO DE FUNÇÕES
void configuraMQTT();
void retornoRele(AdafruitIO_Data *data);
bool monitoraSensorTemp1();
bool monitoraSensorTemp2();
bool monitoraSensorTemp3();
bool monitoraSensorTemp4();
bool monitoraSensorPressao1();
bool monitoraSensorPressao2();
bool monitoraSensorPressao3();
// DECLARAÇÃO DE VARIÁVEIS

```

```

unsigned long controleTempo = 0;
bool comandoRecebido = false;
float _Temperatura1;
float _Temperatura2;
float _Temperatura3;
float _Temperatura4;
float _pressao1;
float _pressao2;
float _pressao3;
void setup() {
  // INICIA A COMUNICAÇÃO SERIAL
  Serial.begin(9600);
  while (! Serial);
  // INICIA A COMUNICAÇÃO ENTRE ARDUINOS COMO SLAVE NO ENDEREÇO DEFINIDO
  arduinoSlave.begin(0, 2);
  // ENVIA O pinMode PARA O SLAVE
  arduinoSlave.pinWireMode(endereco, pinRele, OUTPUT);
  configuraMQTT();
  Serial.println("Atualizando estado do Rele");
  rele->get();
  io.run();
  Serial.println("Fim setup()");
}
void loop() {
  io.run();
  if (millis() > controleTempo + tempoAtualizacao) {
    if (monitoraSensorTemp1()) {
      controleTempo = millis();
      Temperatura1->save(_Temperatura1);
    }
    if (monitoraSensorTemp2()) {
      controleTempo = millis();
      Temperatura2->save(_Temperatura2);
    }
    if (monitoraSensorTemp3()) {
      controleTempo = millis();
      Temperatura3->save(_Temperatura3);
    }
    if (monitoraSensorTemp4()) {
      controleTempo = millis();
      Temperatura4->save(_Temperatura4);
    }
    if (monitoraSensorPressao1()) {
      controleTempo = millis();
      pressao_I->save(_pressao1);
    }
    if (monitoraSensorPressao2()) {
      controleTempo = millis();
      pressao_II->save(_pressao2);
    }
    if (monitoraSensorPressao3()) {
      controleTempo = millis();
      pressao_III->save(_pressao3);
    }
  }
}
// IMPLEMENTO DE FUNÇÕES
void configuraMQTT() {
  Serial.print("Conectando ao Adafruit IO");
  io.connect();
}

```

```

    rele->onMessage(retornoRele);
    while (io.status() < AIO_CONNECTED) {
        Serial.print(".");
        delay(500);
    }
    Serial.println();
    Serial.println(io.statusText());
}
void retornoRele(AdafruitIO_Data *data) {
    Serial.print("Controle Recebido <- ");
    Serial.println(data->value());
    String estadoRele = data->value();
    if (estadoRele == "ON") {
        arduinoSlave.digitalWireWrite(endereco, pinRele, desligar );
        Serial.println("Desligando Rele");
    } else
    if (estadoRele == "OFF") {
        arduinoSlave.digitalWireWrite(endereco, pinRele, ligar);
        Serial.println("Acionando réle")
    }
}
bool monitoraSensorTemp1() {
    static int leituraAnt;
    byte byte1 = arduinoSlave.varWireRead(endereco, 0);
    byte byte2 = arduinoSlave.varWireRead(endereco, 1);
    unsigned int leitura = byte1 << 8 | byte2;
    if (leitura != leituraAnt) {
        _Temperatura1 = ( float(leitura) ) / 100;
        Serial.print("Temp: ");
        Serial.println(_Temperatura1);
        leituraAnt = leitura;
        return true;
    } else {
        return false;
    }
}
bool monitoraSensorTemp2() {
    static int leituraAnt2;
    byte byte1 = arduinoSlave.varWireRead(endereco, 2);
    byte byte2 = arduinoSlave.varWireRead(endereco, 3);
    unsigned int leitura2 = byte1 << 8 | byte2;
    if (leitura2 != leituraAnt2) {
        _Temperatura2 = ( float(leitura2) ) / 100;
        Serial.print("Temp: ");
        Serial.println(_Temperatura2);
        leituraAnt2 = leitura2;
        return true;
    } else {
        return false;
    }
}
bool monitoraSensorTemp3() {
    static int leituraAnt;
    byte byte1 = arduinoSlave.varWireRead(endereco, 4);
    byte byte2 = arduinoSlave.varWireRead(endereco, 5);
    unsigned int leitura = byte1 << 8 | byte2;
    if (leitura != leituraAnt) {
        byte byte1 = arduinoSlave.varWireRead(endereco, 15);
        byte byte2 = arduinoSlave.varWireRead(endereco, 16);
        unsigned int i1 = byte1 << 8 | byte2;

```

```

if(i1==1){
  _Temperatura3 = ( float(leitura)* (-1) ) / 100;
  Serial.print("Temp: ");
  Serial.println(_Temperatura3);
  leituraAnt = leitura;
  return true;
}
else{
  _Temperatura3 = ( float(leitura) ) / 100;
  Serial.print("Temp: ");
  Serial.println(_Temperatura3);
  leituraAnt = leitura;
  return true;
}
} else {
  return false;
}
}
}
bool monitoraSensorTemp4() {
  static int leituraAnt;
  byte byte1 = arduinoSlave.varWireRead(endereco, 6);
  byte byte2 = arduinoSlave.varWireRead(endereco, 7);
  unsigned int leitura = byte1 << 8 | byte2;
  if (leitura != leituraAnt) {
    byte byte1 = arduinoSlave.varWireRead(endereco, 16);
    byte byte2 = arduinoSlave.varWireRead(endereco, 17);
    unsigned int i2 = byte1 << 8 | byte2;
    if(i2==1){
      _Temperatura4 = ( float(leitura)* (-1) ) / 100;
      Serial.print("Temp: ");
      Serial.println(_Temperatura4);
      leituraAnt = leitura;
      return true;
    }
    else{
      _Temperatura4 = ( float(leitura) ) / 100;
      Serial.print("Temp: ");
      Serial.println(_Temperatura4);
      leituraAnt = leitura;
      return true;
    }
  } else {
    return false;
  }
}
}
bool monitoraSensorPressao1() {
  static int leituraAnt;
  byte byte1 = arduinoSlave.varWireRead(endereco, 8);
  byte byte2 = arduinoSlave.varWireRead(endereco, 9);
  unsigned int leitura = byte1 << 8 | byte2;
  if (leitura != leituraAnt) {
    _pressao1 = ( float(leitura) ) / 100;
    Serial.print("Press1: ");
    Serial.println(_pressao1);
    leituraAnt = leitura;
    return true;
  } else {
    return false;
  }
}
}
}

```

```
bool monitoraSensorPressao2() {
    static int leituraAnt;
    byte byte1 = arduinoSlave.varWireRead(endereco, 10);
    byte byte2 = arduinoSlave.varWireRead(endereco, 11);
    unsigned int leitura = byte1 << 8 | byte2;
    if (leitura != leituraAnt) {
        _pressao2 = ( float(leitura) ) / 100;
        Serial.print("Press2: ");
        Serial.println(_pressao2);
        leituraAnt = leitura;
        return true;
    } else {
        return false;
    }
}

bool monitoraSensorPressao3() {
    static int leituraAnt;
    byte byte1 = arduinoSlave.varWireRead(endereco, 12);
    byte byte2 = arduinoSlave.varWireRead(endereco, 13);
    unsigned int leitura = byte1 << 8 | byte2;
    if (leitura != leituraAnt) {
        _pressao3 = ( float(leitura) ) / 100;
        Serial.print("Pres3: ");
        Serial.println(_pressao3);
        leituraAnt = leitura;
        return true;
    } else {
        return false;
    }
}
```

### 8.3 Apêndice C.

#### Coleta de dados utilizando a porta Serial.

O usuário deverá seguir os seguintes passos para prosseguir com a coleta de dados via cabo USB:

- Instalar a IDE do Arduino no notebook;
- Abrir a IDE;

Logo em seguida deve-se abrir o monitor serial conforme esta exemplificado na figura 18, após aberto o monitor os valores correspondentes a temperatura (°C) e pressão (bar).



Figura 18 - Indicação do monitor serial – Fonte do autor, (2020).

### 8.4 Apêndice D.

#### Coleta de dados utilizando o servidor online Adafruit. io.

O usuário deverá prosseguir com os seguintes passos, afim de realizar o acionamento, monitoramento e coleta de dados da Bancada de Refrigeração por Compressão a Vapor Automatizada.

Inserir o nome de usuário e senha conforme a figura 19 e 20, o nome de usuário e login de acesso está descrito no apêndice E.

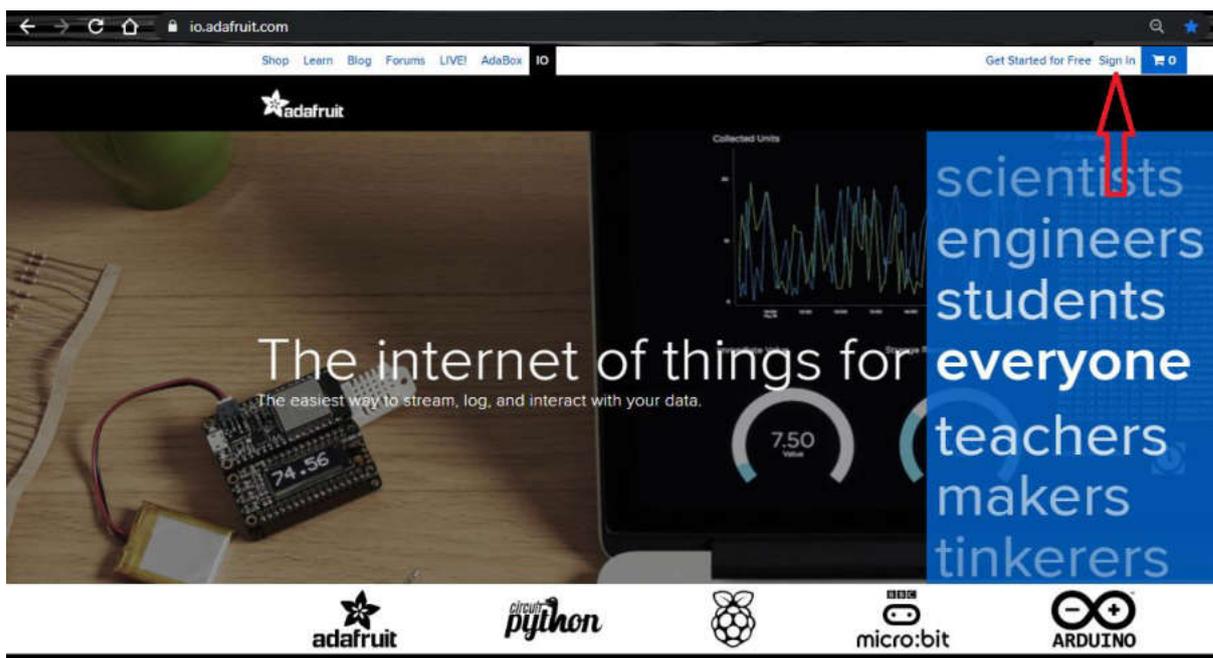


Figura 19 - Acesso ao portal adafruit.io. Fonte Adafruit.io (2020).

Adafruit is **open** and dispatched! Let's rebuild better, together!

[shopping](#) [Learn](#) [Blog](#) [Forums](#) [TO LIVE!](#) [AdaBox](#) [I](#)

**ADAFRUIT**

### SIGN IN

Your Adafruit account gives you access to all Adafruit, including the store, learning system and forums.

**EMAIL OR USERNAME**

**PASSWORD** [Forgot your password?](#)

**SIGN IN**

### ORDER STATUS

Did you check out as a guest? Or do you just want to check your order status without logging in?

**EMAIL ADDRESS**

**REQUEST NUMBER** [Where can I find this?](#)

**ORDER STATUS**

Figura 20 – Login ao portal. Fonte Adafruit.io (2020).

Após ter efetuado o acesso ao portal, deve-se prosseguir abrindo o Dashboard conforme a figura 21, a partir desse ponto o monitoramento remoto da bancada estará em funcionamento.

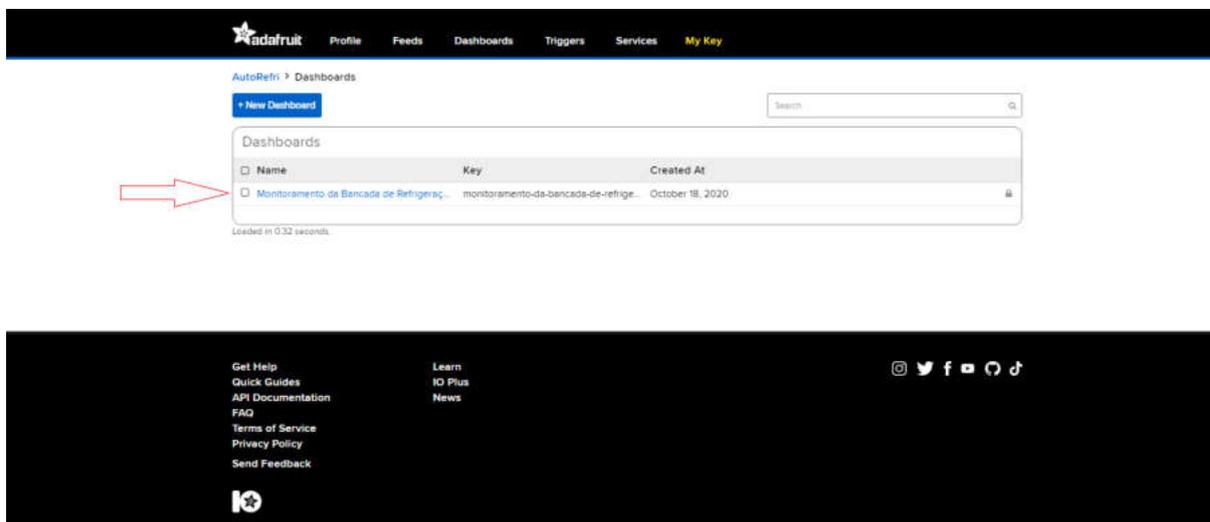


Figura 21 - Dashboard de monitoramento. Fonte Adafruit.io (2020).

## 8.5 Apêndice E.

### Login e senha de acesso do servidor online.

Para prosseguir com o acesso do portal da adafruit basta entrar com o login e a senha:

Login: AutoRefri

Senha: @acessotcc2020

Link do portal <https://io.adafruit.com/>.

## 8.6 Apêndice F.

- **CÁLCULOS E EQUAÇÕES UTILIZADAS.**

### Interpolações no estágio 3

Para cálculo de algumas entalpias foram necessárias a realização de algumas interpolações, as informações foram retiradas de tabelas termodinâmicas e inseridas na tabela a seguir. A pressão está representada em bar e a temperatura em °C.

---

Propriedades termodinâmicas do  
R22

Pressão	Entalpia
0,40	224,36
0,42	$h_1$
0,50	226,30

---

Fonte: Acervo pessoal (2020)

$$\frac{0,42 - 0,4}{0,5 - 0,4} = \frac{h_1 - 224,36}{226,30 - 224,36}$$

$$0,0388 = 0,1h_1 - 22,436$$

Após manipulações matemáticas o resultado obtido foi de  $h_1 = 224,748$  kJ/kg

O processo para obtenção do  $h_3$  foi basicamente o mesmo, as informações referentes as propriedades termodinâmicas constam na tabela a seguir. A pressão está representada em bar e a temperatura em °C.

---

Propriedades termodinâmicas do R22

---

Pressão	Entalpia
4,25	39,55
4,3	$h_3$
4,5	41,52

---

Fonte: Acervo pessoal (2020)

$$\frac{4,3 - 4,25}{4,5 - 4,25} = \frac{h_3 - 39,55}{41,52 - 39,55}$$

$$0,0985 = 0,25h_3 - 9,8875$$

A entalpia para a pressão de 4,3 bar é  $h_3 = 39,944$  kJ/kg.

O trabalho do compressor, a troca de calor no condensador e o COP do ciclo são:

$$W_c = h_2 - h_1$$

$$W_c = 286,76 - 224,78$$

$$W_c = 61,98 \frac{kJ}{kg}$$

$$q_f = h_2 - h_3$$

$$q_f = 286,76 - 39,944$$

$$q_f = 246,816 \text{ kJ/kg}$$

$$COP = \frac{qf}{Wc} = \frac{246,816}{61,98} = 3,98$$

### Interpolações no estágio 2

O procedimento adotado no estágio 2 foi idêntico ao anterior, a tabela a seguir mostra as informações referentes as propriedades termodinâmicas

---

Propriedades termodinâmicas do R22

Pressão	Entalpia
0,4	224,36
0,44	$h_1$
0,5	226,3

---

Fonte: Acervo pessoal (2020)

$$\frac{0,44 - 0,4}{0,5 - 0,4} = \frac{h_1 - 224,36}{226,30 - 224,36}$$

$$0,0776 = 0,1h_1 - 22,436$$

O valor de  $h_1=225,136$  KJ/Kg

### Determinando h2

As informações referentes a  $h_2$  estão na tabela termodinâmica de vapor superaquecido a pressão de 4,5 bar, informações essas que foram transpostas para a tabela a seguir.

---

Propriedades termodinâmicas do R22

---

Temperatura	Entalpia
-------------	----------

---

50	286,76
----	--------

50,5	$h_2$
------	-------

55	290,36
----	--------

---

Fonte: Acervo pessoal (2020)

$$\frac{50,5 - 50}{55 - 50} = \frac{h_2 - 286,76}{290,36 - 286,76}$$

$$1,8 = 5x - 287,12$$

O valor da entalpia 2 é de  $h_2=287,12$  kJ/kg

### Determinando $h_3$

---

Propriedades termodinâmicas do R22

---

Pressão	Entalpia
---------	----------

---

4,25	39,55
------	-------

4,27	$h_3$
------	-------

4,5	41,52
-----	-------

---

Fonte: Acervo pessoal (2020)

$$\frac{4,27 - 4,25}{4,5 - 4,25} = \frac{h_3 - 39,55}{41,52 - 39,55}$$

$$0,0394 = 0,25h_3 - 9,8875$$

O valor de  $h_3= 39,7076$

O trabalho do compressor, a troca de calor no condensador e o COP do ciclo são:

$$W_c = h_2 - h_1$$

$$W_c = 287,12 - 225,136$$

$$W_c = 61,984 \frac{kJ}{kg}$$

$$q_f = h_2 - h_3$$

$$q_f = 287,12 - 39,7076$$

$$q_f = 247,4124 \text{ kJ/kg}$$

$$COP = \frac{q_f}{W_c} = \frac{247,4124}{61,984} = 3,99$$

### Interpolações no estágio 1

---

Propriedades termodinâmicas do R22

---

Temperatura	Entalpia
-------------	----------

---

50	286,76
----	--------

---

53	$h_2$
----	-------

---

55	290,36
----	--------

---

Fonte: Acervo pessoal (2020)

$$\frac{53 - 50}{55 - 50} = \frac{h_2 - 286,76}{290,36 - 286,76}$$

$$10,8 = 5h_2 - 1433,8$$

O Valor de  $h_2 = 288,92 \text{ kJ/kg}$

**Determinando  $h_3$** 


---

Propriedades termodinâmicas do R22

Pressão	Entalpia
4,25	39,55
4,29	$h_3$
4,5	41,52

---

Fonte: Acervo pessoal (2020)

$$\frac{4,29 - 4,25}{4,5 - 4,25} = \frac{h_3 - 39,55}{41,55 - 39,55}$$

$$0,0788 = 0,25h_3 - 9,8875$$

O valor de  $h_3 = 39,86$  kJ/kg.

O trabalho do compressor, a troca de calor no condensador e o COP do ciclo são:

$$W_c = h_2 - h_1$$

$$W_c = 288,92 - 224,748$$

$$W_c = 64,172 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q_f = h_2 - h_3$$

$$q_f = 288,92 - 39,86$$

$$q_f = 249,06 \text{ kJ/kg}$$

$$COP = \frac{q_f}{W_c} = \frac{249,06}{64,172} = 3,88$$

## 8 ANEXOS.

## ANEXO A.

Tabela 11 - Propriedades Termodinâmicas do Refrigerante 22 (Temperatura – Líquido Vapor)

Temp. °C	Press. bar	Specific Volume m <sup>3</sup> /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Temp. °C
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor $v_g$	Sat. Liquid $u_f$	Sat. Vapor $u_g$	Sat. Liquid $h_f$	Evap. $h_{fg}$	Sat. Vapor $h_g$	Sat. Liquid $s_f$	Sat. Vapor $s_g$	
-60	0.3749	0.6833	0.5370	-21.57	203.67	-21.55	245.35	223.81	-0.0964	1.0547	-60
-50	0.6451	0.6966	0.3239	-10.89	207.70	-10.85	239.44	228.60	-0.0474	1.0256	-50
-45	0.8290	0.7037	0.2564	-5.50	209.70	-5.44	236.39	230.95	-0.0235	1.0126	-45
-40	1.0522	0.7109	0.2052	-0.07	211.68	0.00	233.27	233.27	0.0000	1.0005	-40
-36	1.2627	0.7169	0.1730	4.29	213.25	4.38	230.71	235.09	0.0186	0.9914	-36
-32	1.5049	0.7231	0.1468	8.68	214.80	8.79	228.10	236.89	0.0369	0.9828	-32
-30	1.6389	0.7262	0.1355	10.88	215.58	11.00	226.77	237.78	0.0460	0.9787	-30
-28	1.7819	0.7294	0.1252	13.09	216.34	13.22	225.43	238.66	0.0551	0.9746	-28
-26	1.9345	0.7327	0.1159	15.31	217.11	15.45	224.08	239.53	0.0641	0.9707	-26
-22	2.2698	0.7393	0.0997	19.76	218.62	19.92	221.32	241.24	0.0819	0.9631	-22
-20	2.4534	0.7427	0.0926	21.99	219.37	22.17	219.91	242.09	0.0908	0.9595	-20
-18	2.6482	0.7462	0.0861	24.23	220.11	24.43	218.49	242.92	0.0996	0.9559	-18
-16	2.8547	0.7497	0.0802	26.48	220.85	26.69	217.05	243.74	0.1084	0.9525	-16
-14	3.0733	0.7533	0.0748	28.73	221.58	28.97	215.59	244.56	0.1171	0.9490	-14
-12	3.3044	0.7569	0.0698	31.00	222.30	31.25	214.11	245.36	0.1258	0.9457	-12
-10	3.5485	0.7606	0.0652	33.27	223.02	33.54	212.62	246.15	0.1345	0.9424	-10
-8	3.8062	0.7644	0.0610	35.54	223.73	35.83	211.10	246.93	0.1431	0.9392	-8
-6	4.0777	0.7683	0.0571	37.83	224.43	38.14	209.56	247.70	0.1517	0.9361	-6
-4	4.3638	0.7722	0.0535	40.12	225.13	40.46	208.00	248.45	0.1602	0.9330	-4
-2	4.6647	0.7762	0.0501	42.42	225.82	42.78	206.41	249.20	0.1688	0.9300	-2
0	4.9811	0.7803	0.0470	44.73	226.50	45.12	204.81	249.92	0.1773	0.9271	0
2	5.3133	0.7844	0.0442	47.04	227.17	47.46	203.18	250.64	0.1857	0.9241	2
4	5.6619	0.7887	0.0415	49.37	227.83	49.82	201.52	251.34	0.1941	0.9213	4
6	6.0275	0.7930	0.0391	51.71	228.48	52.18	199.84	252.03	0.2025	0.9184	6
8	6.4105	0.7974	0.0368	54.05	229.13	54.56	198.14	252.70	0.2109	0.9157	8
10	6.8113	0.8020	0.0346	56.40	229.76	56.95	196.40	253.35	0.2193	0.9129	10
12	7.2307	0.8066	0.0326	58.77	230.38	59.35	194.64	253.99	0.2276	0.9102	12
16	8.1268	0.8162	0.0291	63.53	231.59	64.19	191.02	255.21	0.2442	0.9048	16
20	9.1030	0.8263	0.0259	68.33	232.76	69.09	187.28	256.37	0.2607	0.8996	20
24	10.164	0.8369	0.0232	73.19	233.87	74.04	183.40	257.44	0.2772	0.8944	24
28	11.313	0.8480	0.0208	78.09	234.92	79.05	179.37	258.43	0.2936	0.8893	28
32	12.556	0.8599	0.0186	83.06	235.91	84.14	175.18	259.32	0.3101	0.8842	32
36	13.897	0.8724	0.0168	88.08	236.83	89.29	170.82	260.11	0.3265	0.8790	36
40	15.341	0.8858	0.0151	93.18	237.66	94.53	166.25	260.79	0.3429	0.8738	40
45	17.298	0.9039	0.0132	99.65	238.59	101.21	160.24	261.46	0.3635	0.8672	45
50	19.433	0.9238	0.0116	106.26	239.34	108.06	153.84	261.90	0.3842	0.8603	50
60	24.281	0.9705	0.0089	120.00	240.24	122.35	139.61	261.96	0.4264	0.8455	60

Fonte - MORAN &amp; SHAPIRO (2018).

## ANEXO B

Tabela 12 - Propriedades do Refrigerante 22 Saturado (Pressão - Líquido Vapor)

Press. bar	Temp. °C	Specific Volume m <sup>3</sup> /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Press. bar
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor $v_g$	Sat. Liquid $u_f$	Sat. Vapor $u_g$	Sat. Liquid $h_f$	Evap. $h_{fg}$	Sat. Vapor $h_g$	Sat. Liquid $s_f$	Sat. Vapor $s_g$	
0.40	-58.86	0.6847	0.5056	-20.36	204.13	-20.34	244.69	224.36	-0.0907	1.0512	0.40
0.50	-54.83	0.6901	0.4107	-16.07	205.76	-16.03	242.33	226.30	-0.0709	1.0391	0.50
0.60	-51.40	0.6947	0.3466	-12.39	207.14	-12.35	240.28	227.93	-0.0542	1.0294	0.60
0.70	-48.40	0.6989	0.3002	-9.17	208.34	-9.12	238.47	229.35	-0.0397	1.0213	0.70
0.80	-45.73	0.7026	0.2650	-6.28	209.41	-6.23	236.84	230.61	-0.0270	1.0144	0.80
0.90	-43.30	0.7061	0.2374	-3.66	210.37	-3.60	235.34	231.74	-0.0155	1.0084	0.90
1.00	-41.09	0.7093	0.2152	-1.26	211.25	-1.19	233.95	232.77	-0.0051	1.0031	1.00
1.25	-36.23	0.7166	0.1746	4.04	213.16	4.13	230.86	234.99	0.0175	0.9919	1.25
1.50	-32.08	0.7230	0.1472	8.60	214.77	8.70	228.15	236.86	0.0366	0.9830	1.50
1.75	-28.44	0.7287	0.1274	12.61	216.18	12.74	225.73	238.47	0.0531	0.9755	1.75
2.00	-25.18	0.7340	0.1123	16.22	217.42	16.37	223.52	239.88	0.0678	0.9691	2.00
2.25	-22.22	0.7389	0.1005	19.51	218.53	19.67	221.47	241.15	0.0809	0.9636	2.25
2.50	-19.51	0.7436	0.0910	22.54	219.55	22.72	219.57	242.29	0.0930	0.9586	2.50
2.75	-17.00	0.7479	0.0831	25.36	220.48	25.56	217.77	243.33	0.1040	0.9542	2.75
3.00	-14.66	0.7521	0.0765	27.99	221.34	28.22	216.07	244.29	0.1143	0.9502	3.00
3.25	-12.46	0.7561	0.0709	30.47	222.13	30.72	214.46	245.18	0.1238	0.9465	3.25
3.50	-10.39	0.7599	0.0661	32.82	222.88	33.09	212.91	246.00	0.1328	0.9431	3.50
3.75	-8.43	0.7636	0.0618	35.06	223.58	35.34	211.42	246.77	0.1413	0.9399	3.75
4.00	-6.56	0.7672	0.0581	37.18	224.24	37.49	209.99	247.48	0.1493	0.9370	4.00
4.25	-4.78	0.7706	0.0548	39.22	224.86	39.55	208.61	248.16	0.1569	0.9342	4.25
4.50	-3.08	0.7740	0.0519	41.17	225.45	41.52	207.27	248.80	0.1642	0.9316	4.50
4.75	-1.45	0.7773	0.0492	43.05	226.00	43.42	205.98	249.40	0.1711	0.9292	4.75
5.00	0.12	0.7805	0.0469	44.86	226.54	45.25	204.71	249.97	0.1777	0.9269	5.00
5.25	1.63	0.7836	0.0447	46.61	227.04	47.02	203.48	250.51	0.1841	0.9247	5.25
5.50	3.08	0.7867	0.0427	48.30	227.53	48.74	202.28	251.02	0.1903	0.9226	5.50
5.75	4.49	0.7897	0.0409	49.94	227.99	50.40	201.11	251.51	0.1962	0.9206	5.75
6.00	5.85	0.7927	0.0392	51.53	228.44	52.01	199.97	251.98	0.2019	0.9186	6.00
7.00	10.91	0.8041	0.0337	57.48	230.04	58.04	195.60	253.64	0.2231	0.9117	7.00
8.00	15.45	0.8149	0.0295	62.88	231.43	63.53	191.52	255.05	0.2419	0.9056	8.00
9.00	19.59	0.8252	0.0262	67.84	232.64	68.59	187.67	256.25	0.2591	0.9001	9.00
10.00	23.40	0.8352	0.0236	72.46	233.71	73.30	183.99	257.28	0.2748	0.8952	10.00
12.00	30.25	0.8546	0.0195	80.87	235.48	81.90	177.04	258.94	0.3029	0.8864	12.00
14.00	36.29	0.8734	0.0166	88.45	236.89	89.68	170.49	260.16	0.3277	0.8786	14.00
16.00	41.73	0.8919	0.0144	95.41	238.00	96.83	164.21	261.04	0.3500	0.8715	16.00
18.00	46.69	0.9104	0.0127	101.87	238.86	103.51	158.13	261.64	0.3705	0.8649	18.00
20.00	51.26	0.9291	0.0112	107.95	239.51	109.81	152.17	261.98	0.3895	0.8586	20.00
24.00	59.46	0.9677	0.0091	119.24	240.22	121.56	140.43	261.99	0.4241	0.8463	24.00

Fonte - MORAN &amp; SHAPIRO (2018).

## ANEXO C

Tabela 13 - Propriedades do Vapor de Refrigerante 22 Superaquecido

$T$ °C	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg K	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg K
$p = 2.5 \text{ bar} = 0.25 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = -19.51^\circ\text{C}$ )				$p = 3.0 \text{ bar} = 0.30 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = -14.66^\circ\text{C}$ )				
Sat.	0.09097	219.55	242.29	0.9586	0.07651	221.34	244.29	0.9502
-15	0.09303	222.03	245.29	0.9703				
-10	0.09528	224.79	248.61	0.9831	0.07833	223.96	247.46	0.9623
-5	0.09751	227.55	251.93	0.9956	0.08025	226.78	250.86	0.9751
0	0.09971	230.33	255.26	1.0078	0.08214	229.61	254.25	0.9876
5	0.10189	233.12	258.59	1.0199	0.08400	232.44	257.64	0.9999
10	0.10405	235.92	261.93	1.0318	0.08585	235.28	261.04	1.0120
15	0.10619	238.74	265.29	1.0436	0.08767	238.14	264.44	1.0239
20	0.10831	241.58	268.66	1.0552	0.08949	241.01	267.85	1.0357
25	0.11043	244.44	272.04	1.0666	0.09128	243.89	271.28	1.0472
30	0.11253	247.31	275.44	1.0779	0.09307	246.80	274.72	1.0587
35	0.11461	250.21	278.86	1.0891	0.09484	249.72	278.17	1.0700
40	0.11669	253.13	282.30	1.1002	0.09660	252.66	281.64	1.0811
$p = 3.5 \text{ bar} = 0.35 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = -10.39^\circ\text{C}$ )				$p = 4.0 \text{ bar} = 0.40 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = -6.56^\circ\text{C}$ )				
Sat.	0.06605	222.88	246.00	0.9431	0.05812	224.24	247.48	0.9370
-10	0.06619	223.10	246.27	0.9441				
-5	0.06789	225.99	249.75	0.9572	0.05860	225.16	248.60	0.9411
0	0.06956	228.86	253.21	0.9700	0.06011	228.09	252.14	0.9542
5	0.07121	231.74	256.67	0.9825	0.06160	231.02	255.66	0.9670
10	0.07284	234.63	260.12	0.9948	0.06306	233.95	259.18	0.9795
15	0.07444	237.52	263.57	1.0069	0.06450	236.89	262.69	0.9918
20	0.07603	240.42	267.03	1.0188	0.06592	239.83	266.19	1.0039
25	0.07760	243.34	270.50	1.0305	0.06733	242.77	269.71	1.0158
30	0.07916	246.27	273.97	1.0421	0.06872	245.73	273.22	1.0274
35	0.08070	249.22	227.46	1.0535	0.07010	248.71	276.75	1.0390
40	0.08224	252.18	280.97	1.0648	0.07146	251.70	280.28	1.0504
45	0.08376	255.17	284.48	1.0759	0.07282	254.70	283.83	1.0616
$p = 4.5 \text{ bar} = 0.45 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = -3.08^\circ\text{C}$ )				$p = 5.0 \text{ bar} = 0.50 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 0.12^\circ\text{C}$ )				
Sat.	0.05189	225.45	248.80	0.9316	0.04686	226.54	249.97	0.9269
0	0.05275	227.29	251.03	0.9399				
5	0.05411	230.28	254.63	0.9529	0.04810	229.52	253.57	0.9399
10	0.05545	233.26	258.21	0.9657	0.04934	232.55	257.22	0.9530
15	0.05676	236.24	261.78	0.9782	0.05056	235.57	260.85	0.9657
20	0.05805	239.22	265.34	0.9904	0.05175	238.59	264.47	0.9781
25	0.05933	242.20	268.90	1.0025	0.05293	241.61	268.07	0.9903
30	0.06059	245.19	272.46	1.0143	0.05409	244.63	271.68	1.0023
35	0.06184	248.19	276.02	1.0259	0.05523	247.66	275.28	1.0141
40	0.06308	251.20	279.59	1.0374	0.05636	250.70	278.89	1.0257
45	0.06430	254.23	283.17	1.0488	0.05748	253.76	282.50	1.0371
50	0.06552	257.28	286.76	1.0600	0.05859	256.82	286.12	1.0484
55	0.06672	260.34	290.36	1.0710	0.05969	259.90	289.75	1.0595

Fonte - MORAN &amp; SHAPIRO (2018).