

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

DIEGO BASSO

AUTOMATIZAÇÃO DE UMA BANCADA DIDÁTICA DE CONDICIONAMENTO DE AR

CAXIAS DO SUL
2020

DIEGO BASSO

AUTOMATIZAÇÃO DE UMA BANCADA DIDÁTICA DE CONDICIONAMENTO DE AR

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado como requisito parcial para a
conclusão do Curso de Engenharia Mecânica
pela Universidade de Caxias do Sul

Orientador: Prof. Me. Sérgio da Silva Kucera

CAXIAS DO SUL

2020

DIEGO BASSO

AUTOMATIZAÇÃO DE UMA BANCADA DIDÁTICA DE CONDICIONAMENTO DE AR

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado como requisito parcial para a
conclusão do Curso de Engenharia Mecânica
pela Universidade de Caxias do Sul

Aprovado em: 01 / 12 / 2020

Banca Examinadora

Prof. Me. Sérgio da Silva Kucera - Orientador
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeillman
Universidade de Caxias do Sul – UCS

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo propor a automatização de uma bancada didática de condicionamento de ar. Após avaliação da instalação original, foi proposto um conjunto de sensores termopares e transdutores analógicos referentes às 8 principais temperaturas do sistema: 2 de bulbo seco e 2 de bulbo úmido do sistema de ar condicionado; e 4 de entradas e saídas do evaporador e do condensador do ciclo de refrigeração; todos ligados a um controlador lógico programável. Após o processamento do código, esse controlador transmite os valores para uma interface homem-máquina, que mostra em tempo real, as temperaturas do sistema. Desta forma, obteve-se uma bancada didática com uma interface que centralizou as temperaturas, ao invés de serem lidas individualmente e dissociadas do *software* supervisor já instalado, facilitando o processo de ensino-aprendizagem dos alunos e resultando em mais um benefício para o sistema.

Palavras chave: Automatização. Refrigeração. Ar condicionado. Bancada didática. Interface homem-máquina.

ABSTRACT

The goal of this project is the automation of a didactic air conditioning stand. After evaluating the original installation, a set of thermocouple sensors and analog transducers was proposed for the 8 main system temperatures: 2 dry bulb and 2 wet bulbs of the air conditioning cycle, and 4 evaporator and condenser inlets and outlets of the refrigeration cycle; all connected to a programmable logic controller. After processing the code, this controller transmits the values to a human-machine interface, which shows the system temperatures in real time. Therefore, it was obtained a didactic stand with an interface that centralized the temperatures, instead of being read individually and dissociated from the supervisory *software* already installed, facilitating the teaching-learning process of the students and resulting in another benefit for the system.

Key words: Automation. Refrigeration. Air conditioning. Didactic stand. Human-machine interface.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo de refrigeração por compressão de vapor.....	13
Figura 2 - Diagrama p-h para os ciclos real e ideal de refrigeração	14
Figura 3 - Esquema ilustrativo da operação de uma bomba de calor.....	16
Figura 4 - Compressor alternativo.....	17
Figura 5 - Interior do compressor tipo <i>Scroll</i>	19
Figura 6 - Espirais de um compressor tipo <i>Scroll</i>	19
Figura 7 - Funcionamento das espirais	20
Figura 8 - Diferença de pressão no interior do compressor tipo <i>Scroll</i>	20
Figura 9 - Evaporador de serpentina aletada para resfriamento.....	21
Figura 10 - Evaporador tipo placas	21
Figura 11 - Condensador de duplo tubo.....	22
Figura 12 - Condensador tipo casco e serpentina	22
Figura 13 - Distribuição de temperaturas em um trocador de calor de contracorrente	23
Figura 14 - Válvula de expansão termostática	25
Figura 15 - Principais componentes de um sistema de controle.....	29
Figura 16 - Exemplos de Interfaces Homem-Máquinas (IHM's)	29
Figura 17 - Bancada didática de condicionamento de ar do Lamotriz	31
Figura 18 - Circuito da bancada didática do Lamotriz	31
Figura 19 - Tela <i>software</i> supervisorio	32
Figura 20 - Medidores de temperatura de bancada.....	32
Figura 21 - Medidor de vazão da bancada.....	33
Figura 22 – Fluxograma de atividades	33
Figura 23 – Sensor de vazão testado	34
Figura 24 – Esquema do sistema proposto.....	35
Figura 25 - Ligação elétrica termopar PT100	35
Figura 26 - Gráfico gerador da equação do sensor PT100.....	37
Figura 27 - Bloco para comunicação Modbus para escrita de variáveis	38
Figura 28 – Código para equação linear do sensor.....	39
Figura 29 - IHM visualizada através do software.....	39
Figura 30 – Bancada didática em testes	40
Figura 31 – Medidor de temperatura e Termopar PT100 instalados	40
Figura 32 - IHM finalizada nos testes de validação	41

LISTA DE QUADRO E TABELA

Quadro 1 – Propriedades de fluidos refrigerantes	28
Tabela 1 – Estimativa de custo para implementação do sistema	42

LISTA DE SÍMBOLOS

$\dot{Q}$	Taxa de transferência de calor	[kW]
$\dot{W}$	Potência consumida pelo compressor	[kW]
$\dot{m}$	Taxa mássica	[kg/s]
h	Entalpia	[kJ/kg]
COP_R	Coeficiente de desempenho para ciclo refrigerador	[adimensional]
COP_{BC}	Coeficiente de desempenho para ciclo bomba de calor	[adimensional]
DV	Deslocamento volumétrico	[m³/s]
D_c	Diâmetro do cilindro	[m]
L_p	Curso do pistão	[m]
N	Rotação	[rpm]
n	Número de cilindros	[adimensional]
U	Coeficiente global de transferência de calor	[W/m²K]
A	Área de troca de calor	[m²]
F	Fator de correção conforme tipo de trocar de calor	[adimensional]
ΔT_{ml}	Diferença da temperatura média logarítmica	[°C ou K]
T_{qs}	Temperatura do fluido quente da saída do trocador	[°C]
T_{fe}	Temperatura do fluido frio da entrada do trocador	[°C]
T_{qe}	Temperatura do fluido quente da entrada do trocador	[°C]
T_{fs}	Temperatura do fluido frio da saída do trocador	[°C]
$\dot{m}_a$	Taxa mássica de água	[kg/s]
c_a	Calor específico da água	[J/kgK]
T_{sa}	Temperatura da água na saída do trocador	[°C]
T_{ea}	Temperatura da água na entrada do trocador	[°C]
Δp	Perda de pressão	[Pa]
f	Coeficiente de atrito	[adimensional]
L	Comprimento do tubo	[m]
ρ	Densidade do fluido	[kg/m³]
V	Velocidade média do fluido	[m/s]
D	Diâmetro do tubo	[m]
T	Temperatura atual do termopar	[°C]
VA	Valor analógico lido pelo CLP	[adimensional]

LISTA DE SIGLAS

COP	Coeficiente de Desempenho
CLP	Controlador Lógico Programável
IHM	Interface Homem-Máquina
Lamotriz	Laboratório de Eficiência Energética
GWP	Potencial de Aquecimento Global (do inglês: <i>Global Warming Potential</i>)
ODP	Potencial de Destruição da Camada de Ozônio (do inglês: <i>Ozone Depletion Potential</i>)
UCS	Universidade de Caxias do Sul

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	JUSTIFICATIVA	11
1.2	OBJETIVOS	12
1.2.1	Objetivo Geral	12
1.2.2	Objetivos Específicos	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR	13
2.1.1	Ciclos Ideal e Real	14
2.1.2	Bombas de Calor	15
2.1.3	Coeficiente de Desempenho (COP)	16
2.2	ELEMENTOS DO SISTEMA	17
2.2.1	Compressores	17
2.2.1.1	Compressores Alternativos	17
2.2.1.2	Compressores tipo Scroll	18
2.2.2	Trocadores de Calor	20
2.2.2.1	Dimensionamento de Trocadores de Calor	23
2.2.3	Dispositivo de Expansão	24
2.2.4	Tubulação	26
2.2.5	Fluidos Refrigerantes	26
2.3	CONTROLE E INSTRUMENTAÇÃO	28
2.3.1	Controlador Lógico Programável (CLP)	28
2.3.2	Interface Homem-Máquina (IHM)	29
2.3.3	Variáveis de Controle	30
2.3.3.1	Temperatura	30
2.3.3.2	Pressão	30
2.3.3.3	Vazão	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	ETAPAS DO TRABALHO	33
3.2.1	Componentes do Sistema	34
3.2.2	Instalação de sensores e transdutores analógicos	35
3.2.3	Elaboração da curva característica do sensor	36
3.2.4	Programação do CLP e IHM	36

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
4.1	CALIBRAÇÃO DO SENSOR.....	37
4.2	CÓDIGO DO PROGRAMA DO CLP	37
4.3	PROGRAMAÇÃO DA IHM	39
4.4	TESTE REALIZADO NO LAMOTRIZ	40
4.5	ESTIMATIVA DE INVESTIMENTO	41
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	43
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
	APÊNDICE A – DADOS COLETADOS PARA GERAÇÃO DA EQUAÇÃO LINEAR DO TERMOPAR PT100	46
	APÊNDICE B – CÓDIGO COMPLETO DA PROGRAMAÇÃO DO CLP	47

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de refrigeração são amplamente utilizados pelas pessoas e empresas diariamente. Quaisquer ramos em que o ciclo de refrigeração esteja sendo utilizado, os conhecimentos por trás do que é possível enxergar são basicamente os mesmos. Compreender completamente todos os fenômenos termodinâmicos dos ciclos de refrigeração por compressão de vapor são, geralmente, mais difíceis do que apenas os seus conceitos. Nestes casos, os estudos podem ser entendidos através de teorias e cálculos dentro de instituições de ensino ou treinamentos industriais.

Esses conhecimentos teóricos podem ser de pequena absorção para a maioria das pessoas por se tratar de uma área onde existem inúmeras variáveis a serem estudadas e assimiladas. Normalmente, e de forma assertiva, são utilizadas bancadas didáticas para demonstração e discernimento dos conhecimentos termodinâmicos nos ciclos de refrigeração, onde existem equipamentos capazes de simular os processos existentes na área. Estas bancadas didáticas facilitam o entendimento entre teoria e prática, assim como melhoram as capacidades psicomotoras da área de quem as utilizam, tanto para treinamento quanto para ensino.

A facilidade em interagir com um sistema prático auxilia ainda mais no discernimento das informações, quando os usuários podem validar os dados teóricos em uma interface e ainda sim, interagir com o sistema modificando os parâmetros e avaliando novos resultados. Um sistema automatizado em uma bancada didática facilita a compreensão dos conceitos a partir da leitura e modificação de dados, fazendo com que usuários se concentrem em apenas interpretar os conhecimentos de sistema de refrigeração de forma facilitada, absorvendo os aprendizados e fenômenos termodinâmicos provenientes da literatura.

1.1 JUSTIFICATIVA

A Universidade de Caxias do Sul faz seu importante papel no uso de bancadas didáticas para o processo de ensino-aprendizagem de todos os cursos. Entretanto, algumas delas, como a de refrigeração do Lamotriz (Laboratório de Eficiência Energética), apresentam a leitura dos dados e o controle dos parâmetros dispersos, exigindo mais atenção dos alunos para localizar e manter o foco nas informações principais.

A automatização de bancadas deste gênero facilita o processo de análise e gestão dos parâmetros que envolvem os equipamentos, permitindo uma visualização mais assertiva, melhorando ainda o processo de ensino-aprendizagem da instituição.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Propor automatização de uma bancada didática de condicionamento de ar, permitindo leituras diretas e centralizadas das variáveis do sistema.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos se dividem em:

- a) compreender de forma mais ampla a operação de um sistema de refrigeração por compressão de vapor;
- b) caracterizar os componentes presentes na bancada atual;
- c) definir os instrumentos de medição a serem utilizados que possam ser utilizados na interação da automatização;
- d) implementar uma interface homem-máquina para centralização das variáveis;
- e) permitir a modificação e monitoramento dos parâmetros do sistema através da interface homem-máquina.

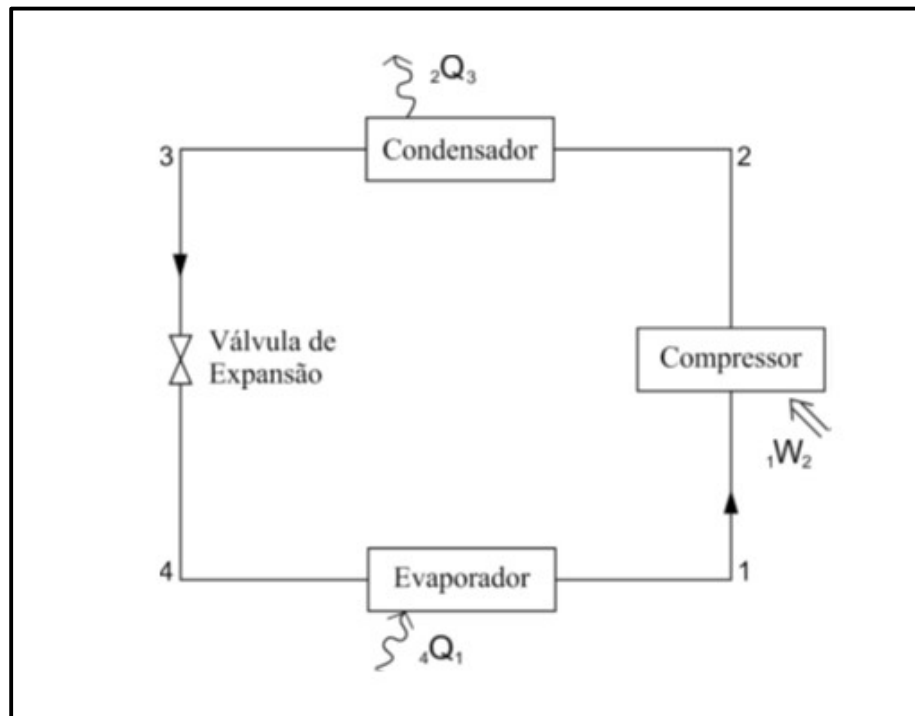
2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é feita uma revisão dos assuntos tratados no trabalho como ciclos de refrigeração por compressão de vapor, elementos do sistema e controle e instrumentação.

2.1 CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR

O funcionamento básico de um ciclo de refrigeração por compressão de vapor é de fácil entendimento. Este ciclo e seus componentes são representados na Figura 1.

Figura 1 - Ciclo de refrigeração por compressão de vapor



Fonte: adaptado de ASHRAE (1997).

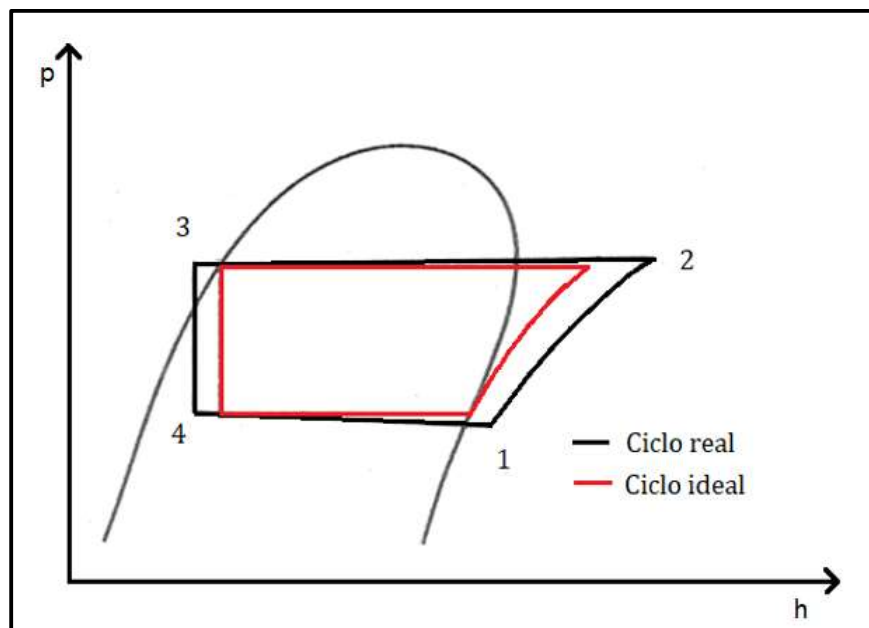
O fluido refrigerante, quando entra no evaporador, está a baixa pressão e é uma mistura de líquido-vapor que absorve energia (calor) do meio a ser refrigerado (externo). Quando este fluido sai do evaporador, em estado de vapor, entra no compressor, que aumenta sua temperatura e pressão. O refrigerante no condensador libera energia (calor) ao ambiente externo, tornando-se líquido e entrando no último estágio, a válvula de expansão. Ela reduz a pressão e a temperatura do fluido, tornando-o uma mistura líquido-vapor e recomeçando o ciclo.

De maneira similar funcionam também os grandes sistemas de refrigeração, como câmaras frigoríficas. O que difere os sistemas pequenos dos de grande porte é o número de unidades compressoras, evaporadoras, de expansão e condensadoras envolvidas, que nestes últimos podem ser múltiplos, bem como o sistema de controle, que pode alcançar elevada complexidade (SILVA, 2004, p. 56).

2.1.1 Ciclos ideal e real

Os ciclos de refrigeração podem ser diferenciados entre ideal e real, conforme mostrado no diagrama p-h da Figura 2, em linhas sólidas vermelha e preta, respectivamente. Os números que identificam os estados principais, embora apresentados no ciclo real, valem também para os correspondentes no ideal.

Figura 2 - Diagrama p-h para os ciclos real e ideal de refrigeração



Fonte: o autor (2020)

Para um ciclo ideal, o diagrama da Figura 2, mostra os seguintes processos:

- compressão isentrópica até a pressão de condensação (processo 1-2);
- redução da temperatura do vapor (dessuperaquecimento), seguida de condensação até líquido saturado, ambos a pressão constante (processo 2-3);
- expansão isentálpica no dispositivo de expansão até a pressão de evaporação (processo 3-4);
- evaporação até o estado de vapor saturado, a pressão constante (processo 4-1).

Entre os ciclos há algumas diferenças importantes, que estão relacionadas às perdas de pressão no evaporador e condensador, ao subresfriamento do líquido deixando o condensador e ao superaquecimento do vapor na aspiração do compressor (STOECKER e JONES, 1985).

Como pode ser visto, o ciclo padrão ideal não prevê perdas de pressão nas regiões de troca de calor (evaporador e condensador). No caso real, o subresfriamento na saída do

condensador é intencional para garantir que o refrigerante esteja líquido na entrada do dispositivo de expansão. O superaquecimento na saída do evaporador também é intencional, para evitar que qualquer porção de líquido seja absorvida pelo compressor. No caso do compressor, devido às irreversibilidades internas, o processo não é isoentrópico e o ciclo real envolve maior trabalho do que no ideal.

Segundo Stoecker e Jabardo (2002), a completa determinação dos estados representativos dos ciclos de compressão a vapor pode permitir a avaliação mais precisa da vazão volumétrica de refrigerante deslocada pelo compressor, além de propiciar boas estimativas de pressões e temperaturas para cada estado.

Aplicando as conservações de massa e de energia aos volumes de controle em torno dos 4 componentes básicos do ciclo, admitindo regime permanente e desprezando as variações de energias cinética e potencial, tem-se:

- a) Equação 1- potência fornecida ao compressor;
- b) Equação 2- taxa de transferência de calor no condensador;
- c) Equação 3- processo isoentálpico no dispositivo de expansão;
- d) Equação 4- taxa de transferência de calor no evaporador.

$$\dot{W}_{1-2} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{2-3} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3) \quad (2)$$

$$h_3 = h_4 \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{4-1} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) \quad (4)$$

onde: $\dot{Q}$ é a taxa de transferência de calor [kW];

$\dot{W}$ é a potência para acionamento do compressor [kW];

$\dot{m}$ é a vazão mássica de fluido refrigerante [kg/s];

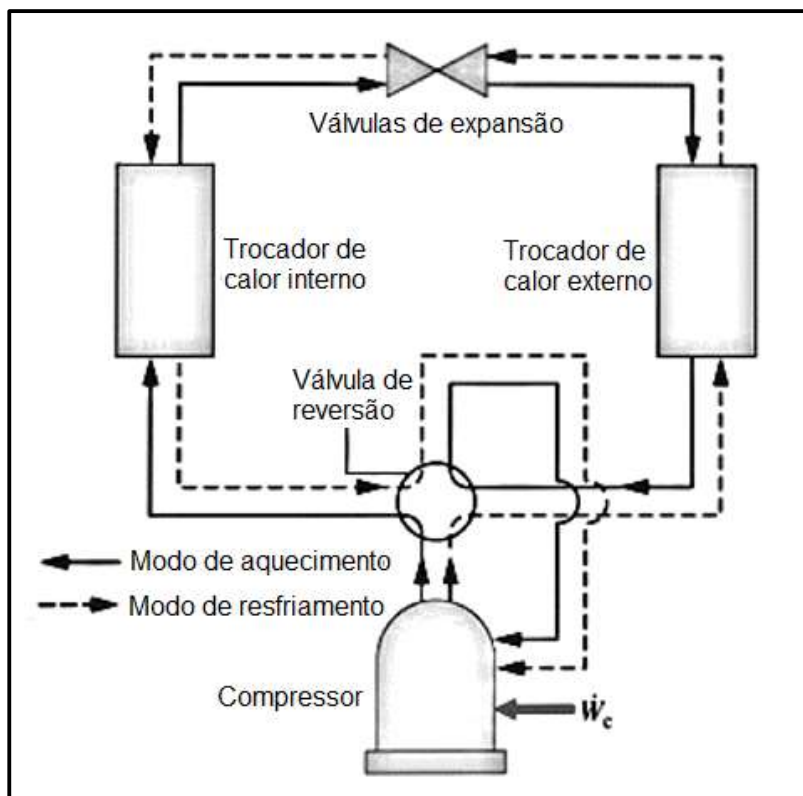
h é a entalpia [kJ/kg].

2.1.2 Bombas de Calor

Segundo Borgnakke e Sonntag (2013), o ciclo padrão por compressão a vapor pode ser utilizado de duas maneiras. A primeira, como máquina frigorífica e a segunda como bomba de calor. A diferença básica das duas formas são o sentido, que é invertido, e a função, onde a primeira resfria, a segunda aquece.

Os componentes utilizados para fazer uma bomba de calor são os mesmos utilizados para uma máquina frigorífica, porém, o ciclo para aquecimento é invertido por meio de uma válvula, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Esquema ilustrativo da operação de uma bomba de calor



Fonte: adaptado de Moran, et al (2018)

2.1.3 Coeficiente de desempenho (COP)

O coeficiente de desempenho, ou COP (do inglês *Coefficient of Performance*), para um ciclo de refrigeração é dado pela razão entre o calor retirado pelo evaporador e o trabalho realizado pelo compressor. Em outras palavras, pode-se dizer que é a relação entre a energia útil do processo (calor retirado do evaporador, $\dot{Q}_{4-1}$) e a energia gasta pelo sistema (trabalho do compressor, $\dot{W}_{1-2}$). A Equação 5 mostra como se dá o cálculo do COP para operações como refrigerador.

$$COP_R = \frac{\dot{Q}_{4-1}}{\dot{W}_{1-2}} \quad (5)$$

No caso de bomba de calor, o coeficiente de desempenho é calculado de forma similar, só que nesse caso, a energia útil passa a ser o calor transferido no condensador ($\dot{Q}_{2-3}$), sendo dado pela Equação 6.

$$COP_{BC} = \frac{\dot{Q}_{2-3}}{\dot{W}_{1-2}} \quad (6)$$

2.2 ELEMENTOS DO SISTEMA

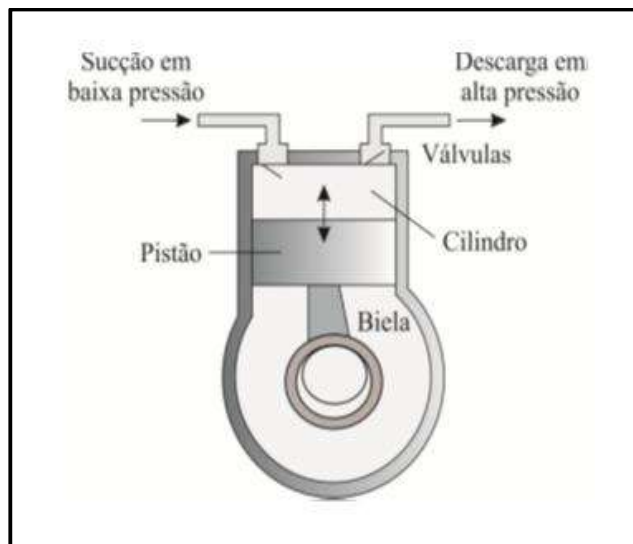
Em um ciclo de refrigeração por compressão de vapor, os elementos básicos são: compressor, trocadores de calor, dispositivo de expansão, tubulação e fluido refrigerante, descritos na sequência.

2.2.1 Compressores

Segundo Silva (2004), os compressores são divididos em volumétricos ou centrífugos. Os volumétricos trabalham com a compressão pela redução de volume do fluido. Já os centrífugos, trabalham acelerando o gás pelas pás do rotor e o ganho de velocidade é convertido em ganho de pressão. Os compressores volumétricos [(alternativos e rotativos (scroll, de palhetas e de parafusos)] são normalmente utilizados em pequenas/médias instalações, enquanto os compressores centrífugos são usados em médias/grandes instalações.

2.2.1.1 Compressores alternativos

Figura 4 - Compressor alternativo



Fonte: adaptado de Silva (2010).

Compressores alternativos trabalham através de um movimento cíclico de um pistão, comprimindo o fluido e reduzindo seu volume e, por consequência, aumentando os níveis de pressão e temperatura. A Figura 4 mostra os componentes básicos de um compressor alternativo.

De acordo com Silva (2004), a compressão do gás é feita por 3 etapas com o compressor alternativo. São elas:

- a) admissão, na qual o êmbolo se desloca para baixo, fazendo com que a válvula de sucção abra e o fluido entre, com pressão baixa e teoricamente constante;
- b) compressão, em que o êmbolo se desloca para cima, reduzindo o espaço que o fluido ocupa e fechando a válvula de sucção, de modo que sua pressão aumente;
- c) exaustão, quando é atingida uma determinada pressão, a válvula de descarga abre e o fluido é forçado a sair.

Para esse tipo de compressor, é possível calcular o seu deslocamento volumétrico, através da Equação 7.

$$DV = \frac{\pi \cdot D_c^2}{4} \cdot L_p \cdot N \cdot n \quad (7)$$

onde: DV é o deslocamento volumétrico [m^3/s];

D_c é o diâmetro do cilindro [m];

L_p é o curso do pistão [m];

N é a rotação [rpm];

n é o número de cilindros [adimensional].

Ainda de acordo com Silva (2004), se necessário, é possível calcular a vazão mássica deslocada pelo compressor, dividindo o seu deslocamento volumétrico pelo volume específico do fluido refrigerante na entrada do compressor.

2.2.1.2 Compressores tipo scroll

Os compressores do tipo *scroll* estão sendo cada vez mais utilizados em sistemas de ar condicionado ou refrigeração, uma vez que ocupam bem menos espaços que os alternativos.

Silva (2004) comenta que os compressores tipo *scroll* têm como principais características a ausência de válvulas de sucção e de descarga, ruído e vibrações baixas, compacidade, leveza e alta eficiência.

A Figura 5 ilustra como o compressor tipo *scroll* é constituído internamente. A figura mostra que a entrada do ar se faz pela direita e a saída do fluido pela parte superior. O motor e lubrificante do compressor estão localizados mais abaixo, dentro do equipamento. O eixo central tem um afastamento do centro (circulado em branco), justamente para o giro da espiral móvel não ser concêntrico com a espiral fixa.

Figura 5 - Interior do compressor tipo *Scroll*



Fonte: adaptado de Schwenke (2018)

Figura 6 - Espirais de um compressor tipo *Scroll*

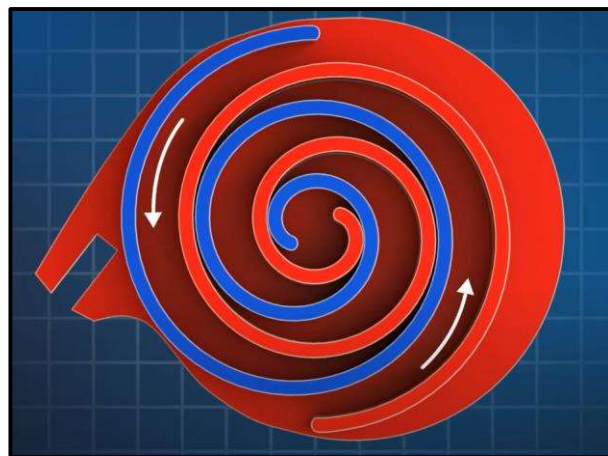


Fonte: adaptado de Schwenke (2018)

As espirais do compressor ficam logo mais acima do motor, onde a espiral externa é fixa e a interna é que faz a movimentação para compressão. A Figura 6 mostra as duas espirais.

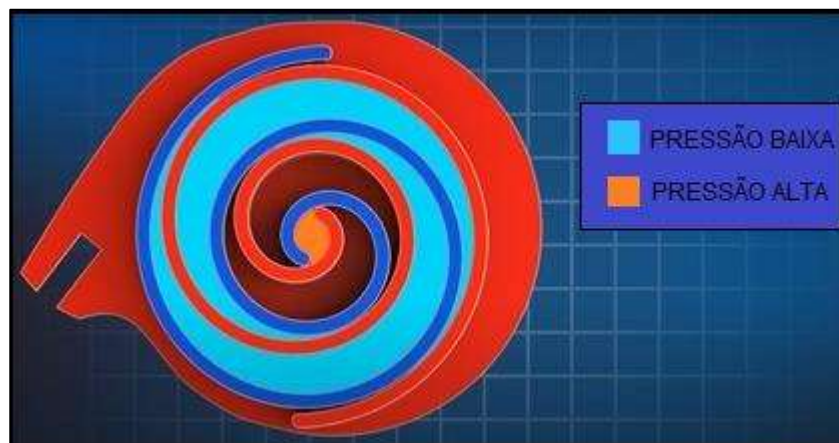
Quando o motor é ativado, o fluido começa a circular em direção ao centro das espirais, onde a área é menor e por consequência, a pressão é intensificada. A Figura 7 mostra como o giro funciona, e a Figura 8 mostra a continuação, ilustrando a diferença de pressão no interior das espirais. A espiral que se movimenta está representada na figura com a cor vermelha.

Figura 7 - Funcionamento das espirais



Fonte: adaptado de Schwenke (2018)

Figura 8 - Diferença de pressão no interior do compressor tipo *Scroll*



Fonte: adaptado de Schwenke (2018)

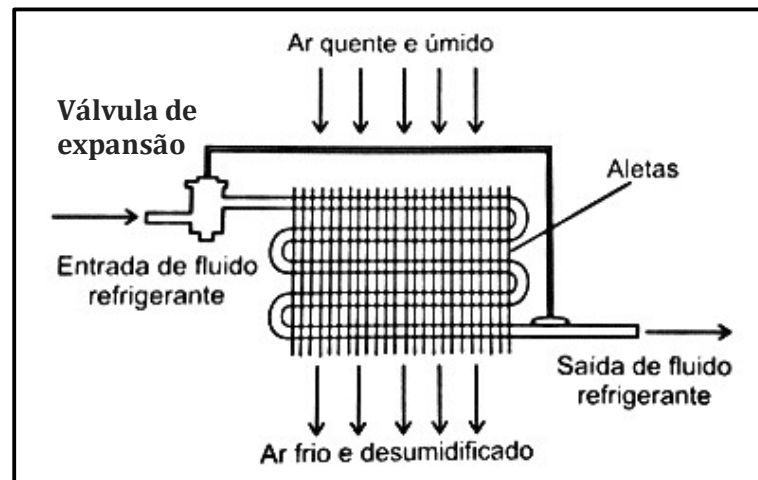
2.2.2 Trocadores de calor

Os trocadores de calor são essenciais para os ciclos de refrigeração, por fazerem toda a troca de energia por calor entre ambientes e fluido refrigerante.

Os evaporados retiram a energia em forma de calor do meio a ser resfriado através do fluido refrigerante a baixa temperatura e em evaporação. O fluido, que passa pela tubulação, é levado até ao estado de vapor pelo evaporador.

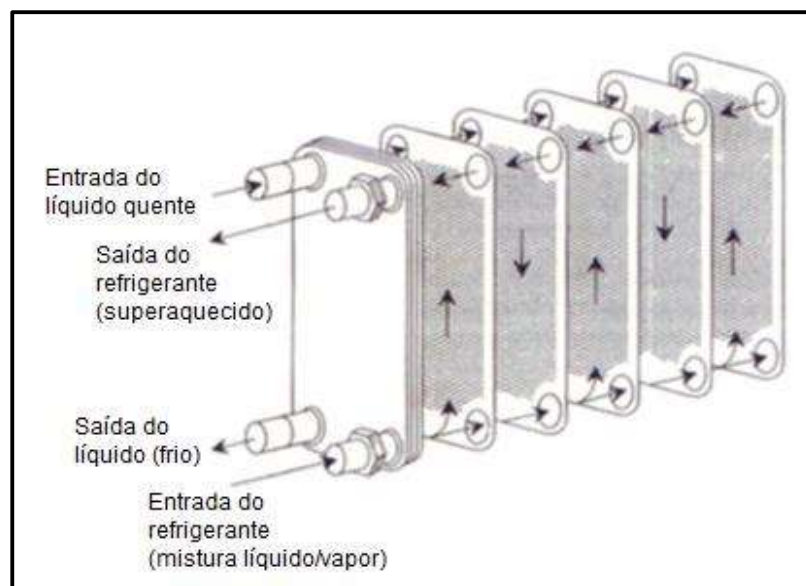
Segundo Silva (2004), os evaporadores podem ser usados para resfriamento de ar ou de líquido, e nos casos de resfriamento de ar os mais utilizados são os evaporadores do tipo forçadores de ar ou serpentina aletada, este segundo conforme Figura 9. Essa figura, inclusive, demonstra o funcionamento básico de um evaporador.

Figura 9 - Evaporador de serpentina aletada para resfriamento



Fonte: adaptado de Silva (2004)

Figura 10 - Evaporador tipo placas



Fonte: adaptado de Silva (2010)

O fluido refrigerante passa internamente por tubos da serpentina aletada que se encontra no meio a ser refrigerado, fazendo com que o fluido se torne vapor e o calor seja

retirada deste meio. A válvula de expansão tem a função de controlar a vazão do fluido para que não haja líquido na entrada do compressor.

O evaporador de placas é muito utilizado atualmente e pode ser representado na Figura 10, podendo ser usado para resfriar ou aquecer fluidos.

Os condensadores são responsáveis por liberar o calor armazenado pelo fluido refrigerante durante os processos de evaporação e compressão. O calor é liberado para que o refrigerante possa retornar ao estado líquido e ser conduzido até o dispositivo de expansão.

De acordo com Silva (2004), os tipos mais comuns de condensadores são de duplo tubo (Figura 11), casco e serpentina, carcaça e tubos e de placas.

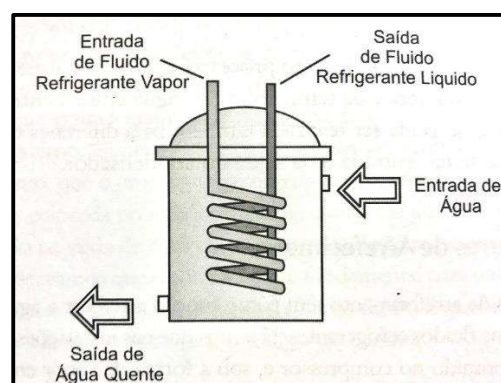
Figura 11 - Condensador de duplo tubo



Fonte: adaptado de Silva (2004)

A Figura 11 mostra o trocador de duplo tubo aplicado para resfriar água, onde o refrigerante e a água circulam em sentidos contrários, tendo uma maior eficiência no processo de troca de calor. Já a Figura 12 apresenta um condensador tipo casco e serpentina, onde o fluido refrigerante passa pela serpentina, liberando o calor para a água que se encontra no interior do casco.

Figura 12 - Condensador tipo casco e serpentina



Fonte: adaptado de Silva (2004)

2.2.2.1 Dimensionamento de Trocadores de Calor

Para ser assertivo no momento da aquisição dos trocadores de calor, é necessário saber dimensionar o componente, mesmo que forma básica. Para Incropera et al. (2008), é possível obter ou prever o desempenho de um trocador de calor, ou ter sua taxa de transferência de calor, basta relacionar a energia térmica com as temperaturas de entradas e saída dos fluidos, coeficiente global de transferência de calor e a área disponível para troca térmica. A Equação 8 mostra isso, inserindo o fator de correção do tipo de trocador.

$$\dot{Q}_{trocado} = U \cdot A \cdot F \cdot \Delta T_{ml} \quad (8)$$

onde: $\dot{Q}_{trocado}$ é o calor trocado pelo trocador de calor [W];

U é o coeficiente global de transferência de calor [W/m^2K];

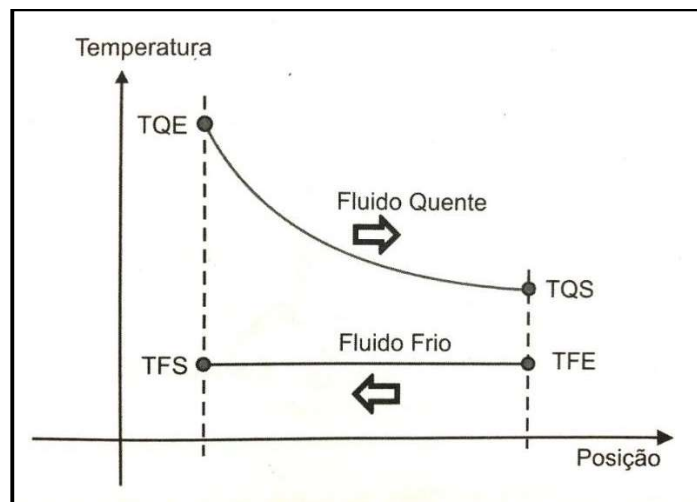
A é a área de troca [m^2];

F é o fator de correção conforme tipo de trocador [adimensional];

ΔT_{ml} é diferença logarítmica da temperatura média [$^{\circ}C$ ou K].

Desta maneira, a diferença de temperatura em escala logarítmica é considerada a partir da Figura 13, que exemplifica como os fluidos e as temperaturas se relacionam, para escoamento de correntes contrárias em um evaporador. Silva (2004) ainda menciona que o fluido refrigerante troca calor sem mudar a temperatura por estar em processo de evaporação, fazendo com que ao final do processo tem-se o fluido quente com a temperatura menor do que entrou, e refrigerante em estado de vapor.

Figura 13 - Distribuição de temperaturas em um trocador de calor de contracorrente



Fonte: adaptada de Silva (2004)

Para se obter ΔT_{ml} é necessário relacionar as temperaturas presentes no sistema de transferência de calor, da maneira que a Equação 9 mostra.

$$\Delta T_{ml} = \frac{[(T_{qs} - T_{fe}) - (T_{qe} - T_{fs})]}{\log[(T_{qs} - T_{fe}) / (T_{qe} - T_{fs})]} \quad (9)$$

onde: ΔT_{ml} é a diferença de temperatura média logarítmica [°C];

T_{qe} é a temperatura do fluido quente na entrada do trocador [°C];

T_{qs} é a temperatura do fluido quente na saída do trocador [°C];

T_{fe} é a temperatura do fluido frio na entrada do trocador [°C];

T_{fs} é a temperatura do fluido frio na saída do trocador [°C].

Para os trocadores de calor que utilizam água para a troca de calor, como acontece com a maioria dos condensadores, o cálculo de calor trocado é dado a parti da Equação 10.

$$\dot{Q}_{trocado} = \dot{m}_a \cdot c_a \cdot (T_{sa} - T_{ea}) \quad (10)$$

onde: $\dot{Q}_{trocado}$ é a taxa de transferência de calor trocada [W];

$\dot{m}_a$ é a taxa mássica de água no processo[kg/s];

c_a é o calor específico da água [J/kg·K]

T_{sa} é a temperatura da água na saída do trocador [°C];

T_{ea} é a temperatura da água na entrada do trocador [°C].

2.2.3 Dispositivo de expansão

Os dispositivos de expansão têm a principal função de reduzir a pressão do fluido refrigerante. De acordo com Silva (2004), em sistemas mais complexos, esses dispositivos têm a função de controlar a quantidade de líquido no evaporador, evitar que o compressor aspire vapores excessivamente quentes e impedir que o fluido refrigerante chegue no estado líquido no compressor.

O tubo capilar e as válvulas de expansão termostáticas são as mais utilizadas nas áreas de refrigeração e ar condicionado.

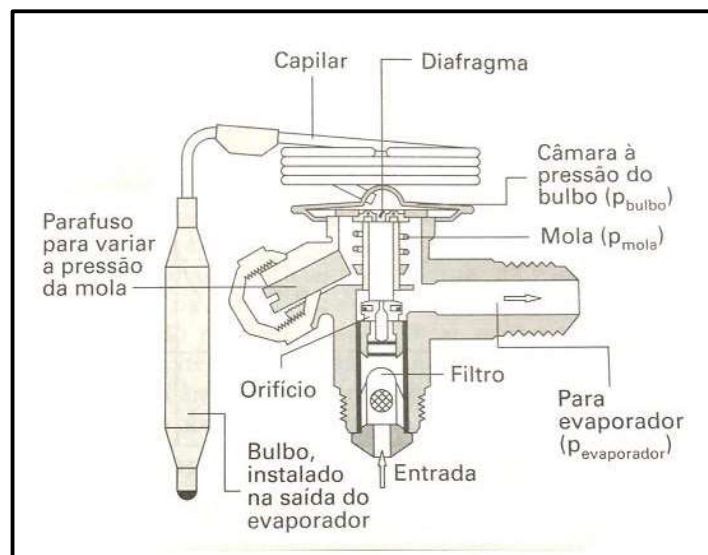
Os dispositivos de tubo capilar são simples. Silva (2004) ainda fala que o fluido refrigerante perde pressão devido atrito com as paredes internas do tubo, normalmente de 0,6

mm de diâmetro. A vantagem é necessitar pouco torque para a partida do compressor, já que quando o sistema desliga, existe uma equalização da pressão. Estes dispositivos são dimensionados a partir da compressão do sistema e do tipo do fluido refrigerante utilizado.

A válvula de expansão direta, ou válvula automática, pode ser uma membrana ou diafragma. “A parte superior do diafragma está submetida à ação constante da pressão atmosférica; a parte inferior, pelo contrário, submete-se à pressão interna do evaporador” (SILVA, 2004, p. 130). Portanto, é a diferença de pressão que regula a abertura e o fechamento da válvula de expansão. Quando o compressor está parado, a mola garante o fechamento da passagem de fluido refrigerante, e a medida que a pressão no interior do evaporador vai diminuindo, a mola recebe menos pressão, fazendo com que a válvula se abra e o fluido volte a circular, mantendo a pressão constante na entrada do compressor.

As válvulas termostáticas são bastante utilizadas nas instalações comerciais e industriais. Ela funciona tanto com a pressão do evaporador quanto com a pressão proveniente do bulbo termostático, este instalado na saída do evaporador. Caso a temperatura no bulbo caia e/ou tenha aumentado a pressão no evaporador, o diafragma provoca o bloqueio da passagem de fluido refrigerante, e em condições contrárias, o fluxo do fluido é permitido. De acordo com Silva (2004), a válvula permite a alimentação adequada do evaporador, sob todas condições de carga e sem ter o risco de inundação do compressor. A Figura 14 mostra uma válvula de expansão termostática em corte.

Figura 14 - Válvula de expansão termostática



Fonte: adaptado de Stoecker e Jabardo (2002)

Para sistemas que existe uma variação enorme de temperatura, existem válvulas de controle eletrônico, fazendo com que a abertura e fechamento da válvula sejam de acordo com o monitoramento da pressão e temperatura na saída do evaporador.

2.2.4 Tubulação

O transporte de fluido refrigerante nos sistemas de refrigeração requer componentes específicos, pois em cada um dos processos existem diferentes pressões e temperaturas à serem suportadas, sem haver a perda de energia pela tubulação.

“O dimensionamento de tubulações se baseia na premissa de limitar a perda de carga. Esta implica numa redução da pressão, que em sistemas frigoríficos, correspondem a uma diminuição na temperatura de saturação correspondente.” (STOECKER e JABARDO, 2002, p. 218).

O dimensionamento é quase sempre auxiliado por tabelas de cada tipo de refrigerante, mas ainda há condições adversas em cada tipo de ciclo que podem complicar o projetista. Portanto, utiliza-se o conceito de perda de pressão para o dimensionamento da tubulação do sistema, este empregado na Equação 11. O cálculo de perda de pressão, faz com que os processos sejam dimensionados a partir da queda de pressão que acontece no fluido durante a circulação.

$$\Delta p = f \frac{L \cdot \rho \cdot V^2}{D \cdot 2} \quad (11)$$

onde: Δp é a perda de pressão [Pa];

f é o coeficiente de atrito [adimensional];

L é o comprimento do tubo [m];

D é o diâmetro do tubo [m];

V é a velocidade média do fluido [m/s];

ρ é a densidade do fluido [kg/m³].

2.2.5 Fluidos refrigerantes

São substâncias químicas com a função de absorver calor do ambiente a ser refrigerado, através de mudanças entre as fases líquida e vapor. Conforme Silva (2004), os fluidos refrigerantes são divididos em: hidrocarbonetos halogenados e não halogenados, misturas azeotrópicas e não azeotrópicas, e compostos inorgânicos.

Hidrocarbonetos halogenados são compostos que possuem em sua composição um ou mais átomos de cloro, flúor ou Bromo. Dentre os mais comuns e utilizados, existem o R22 e o R134a. A nomenclatura dos halogenados se dá pela relação entre números de átomos de carbono, hidrogênio e flúor.

Já os hidrocarbonetos não halogenados, como Metano, Etano e Propano, respectivamente R50, R170 e R250, são bastante utilizados em indústrias químicas.

Compostos inorgânicos recebem a nomenclatura com o número sete e o peso molecular da substância, como acontece com a amônia (R717) e o dióxido de carbono (R744).

Misturas não azeotrópicas se comportam como mistura binária, fazendo a condensação a pressão constante, mas com variação de temperatura. Misturas azeotrópicas condensam a temperatura constante como substância simples, mas com propriedades diferentes.

Todo o manuseio do fluido refrigerante deve ser de total cuidado, pois todos os gases e compostos químicos são prejudiciais ao meio ambiente, quando lançados na atmosfera. As maiores preocupações são devido a troca e higienização dos equipamentos industriais que operam com refrigeração, onde uma vez que há o vazamento de fluidos refrigerantes, podem ser lançados e chegando na estratosfera, influenciar na redução da camada de ozônio.

Segundo Danfoss e Metaphor (2011), sabe-se que a emissões de refrigerante durante sua utilização tenham sido levadas à sério pelas indústrias, mas também é de conhecimento que as mesmas emissões não podem ser totalmente inibidas. Isso cria a necessidade de se obter novos fluidos refrigerantes que não causam prejuízos à natureza, e, mesmo que um refrigerante seja viável em termos termodinâmicos, nem sempre podem ser aplicados.

De acordo com Danfoss e Metaphor (2011), as características que devem ser levadas em consideração para aquisição e uso do fluido refrigerante são:

- a) eficiência do fluido no processo;
- b) segurança, que inclui toxicidade, inflamabilidade e pressão máxima;
- c) impactos ambientais, não podendo ser um potencial de destruição da camada de ozônio (*Ozone Depletion Potential* – ODP) e um potencial de aquecimento global (*Global Warming Potential* – GWP);
- d) propriedades termodinâmicas compatíveis com melhores pontos críticos, trabalhos com pressões mais baixas e estabilidades maiores da temperatura, comparados com outros fluidos;
- e) propriedades químicas compatíveis com materiais e a miscibilidade com óleo e água;
- f) aspectos econômicos, levando em conta o custo de aquisição e o custo de manutenção do fluido;
- g) disponibilidade para aquisição do refrigerante.

O Quadro 1 apresenta o comparativo entre vários fluidos refrigerantes, com base nas características mencionadas.

Quadro 1 - Propriedades de fluidos refrigerantes

Refrigerante	R22	R134a	R404a	R410a	R717	R744	R290
Eficiência	●	●	●	●	●	● * ● **	●
Segurança	●	●	●	●	●	●	●
Ambiente (ODT, GWP)	●	●	●	●	●	●	●
Propriedade termodinâmicas	●	●	●	●	●	●	●
Propriedades químicas	●	●	●	●	●	●	●
Aspectos econômicos	● ● ***	● ● ***	● ● ***	● ● ***	●	●	●
Disponibilidade	● ●	●	●	●	●	●	●
● Bom ● Regular ● Ruim *Algumas aplicações de refrigeração **Bombas de calor e algumas aplicações de refrigeração ***Altas taxas (países nórdicos)							

Fonte: adaptado de Danfoss e Metaphor (2011)

2.3 CONTROLE E INSTRUMENTAÇÃO

Os sistemas de refrigeração normalmente contam com métodos de controle, que variam de acordo com a quantidade de equipamentos e suas aplicações. No entanto, todos eles visam, basicamente, a manipulação das variáveis de pressão temperatura e vazão.

O controle é um conjunto de equipamentos que garantem o funcionamento do sistema com o uso de todos os equipamentos que compõem as instalações do processo. “Ele é composto de um elemento sensível ou sensor, um elemento de painel e um elemento final, o atuador de válvulas, que vão corrigir os desvios detectados no funcionamento do sistema”. (SILVA, 2004, p. 208)

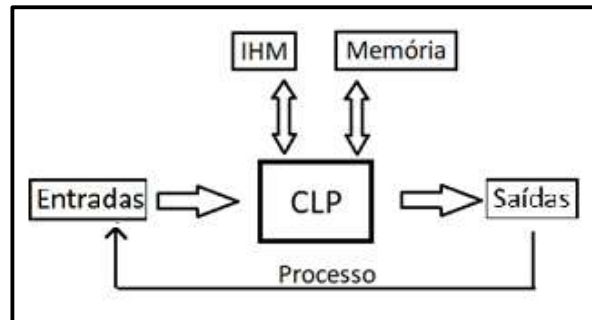
2.3.1 Controlador lógico programável (CLP)

De acordo com Bega (2011), o CLP foi criado para substituir a utilização de relés em circuitos lógicos sequenciais ou combinatórios para controles industriais. Ainda diz que este equipamento funciona sequencialmente, interpretando o estado dos dispositivos atrelados às suas entradas, operando a lógica pelo seu programa interno e determinando o estado dos dispositivos ligados às suas saídas.

Em uma bancada de condicionamento de ar, o CLP pode ser o centro do controle do sistema, de forma que ele seja conectado a um painel de operação, sensores e atuadores do sistema. Através de um algoritmo de programação desenvolvido em um *software*, o CLP

consegue verificar os sinais digitais ou analógicos das entradas, processar as informações com a varredura do programa e atualizar o estado das saídas (digitais ou analógicas) de uma forma cíclica e constante. Também tem a função de processar informações provenientes de painéis ou interfaces, que podem interferir em todo o processo. A Figura 15 ilustra a composição dos principais componentes de um sistema de controle, sendo o CLP o principal.

Figura 15 - Principais componentes de um sistema de controle



Fonte: o autor (2020)

2.3.2 Interface homem-máquina (IHM)

A interface homem-máquina (IHM), segundo EngProcess (2020), é uma tela gráfica instalada junto ao sistema de automação, tornando mais eficiente a comunicação entre pessoas e a máquina. Isto garante uma visualização mais centralizada e generalizada do processo da máquina, podendo reunir o painel de botões, o tratamento de dados e métodos de supervisão em suas principais funções. Wonderware (2019) ainda fala que IHMs dão uma visão operacional do processo e possibilitam o controle e otimização, sendo a principal ferramenta pela qual operadores e supervisores de linha têm para coordenarem a fabricação de seus produtos. Atualmente, as IHMs comercializadas são, na maioria, com tecnologias sensíveis ao toque e coloridas, como os exemplos na Figura 16.

Figura 16 - Exemplos de Interfaces Homem-Máquinas (IHM's)



Fonte: adaptado de LS Brasil (2020)

2.3.3 Variáveis de controle

Os sistemas de refrigeração contam com diversas variáveis de controle, dentre elas, temperatura, pressão e vazão, detalhadas nas seções seguintes.

2.3.3.1 Temperatura

Segundo Bega (2011), a temperatura quantifica uma forma de energia associada à atividade molecular de uma substância, muito importante para os processos de refrigeração, existindo uma variada gama de sensores capazes de medir a temperatura. Esses sensores podem trabalhar com propriedades físicas dos materiais, como resistência, volume, variação de comprimento. Para a utilizações destas medições em um controlador, podem ser necessários o uso de transdutores analógicos, uma vez que transformam grandezas físicas em grandezas elétricas.

2.3.3.2 Pressão

Bega (2011) afirma que a pressão é definida como uma força sobre uma área. A pressão pode ser medida em diversos lugares em um ciclo de refrigeração, podendo ser utilizadas as informações para melhor controle do sistema e prevendo, eventualmente, algum tipo de problema no sistema, caso haja quedas de pressões em locais inapropriados. O uso de pressostatos são bastante comuns, que são instrumentos que permitem um range de pressão para o compressor poder trabalhar.

2.3.3.3 Vazão

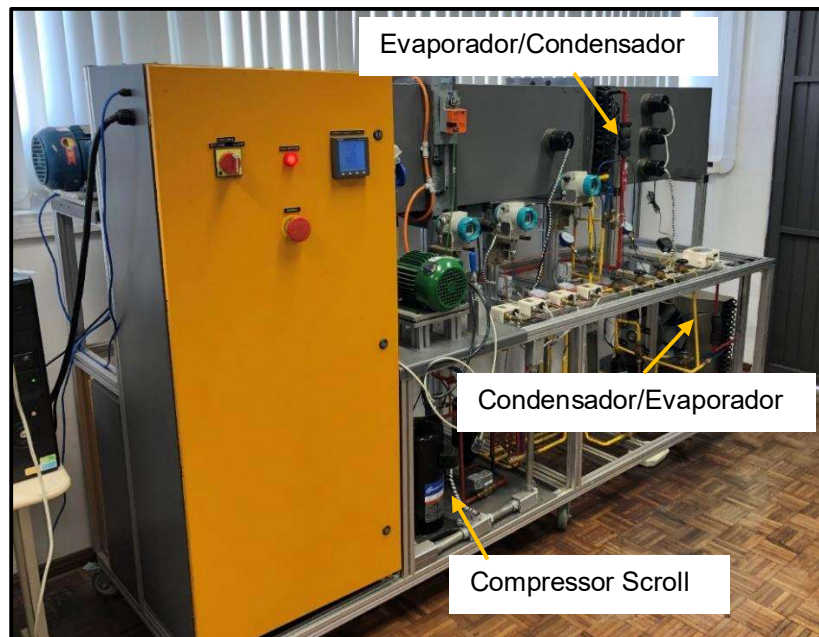
Conforme Bega (2011), a vazão é definida como a quantidade de fluido (líquido, gás ou vapor) que passa pela seção reta de um duto, sobre unidade de tempo. A quantidade de fluido pode ser medida em volume ou massa, sendo vazão volumétrica e vazão mássica, respectivamente.

A medição da vazão mássica de fluido refrigerante é importante para que, junto com a entalpia, seja possível definir a taxa de transferência de calor. Isso auxilia no dimensionamento dos componentes do processo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

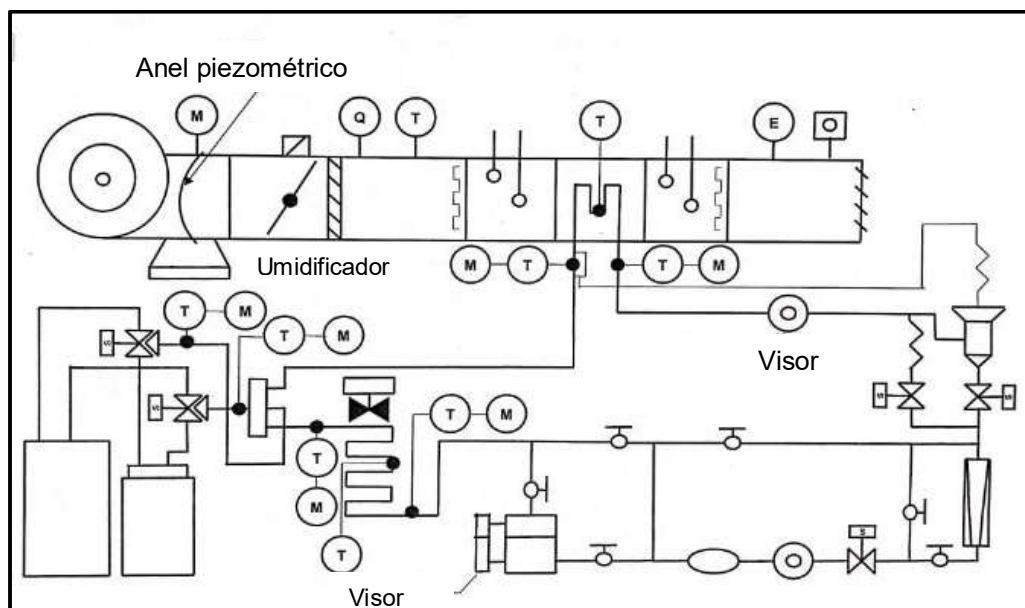
A bancada didática encontrada no laboratório Lamotriz, da Universidade de Caxias do Sul, mostrada na Figura 17, pode operar tanto em resfriamento quanto em aquecimento (bomba de calor), a partir do acionamento de uma válvula de quatro vias. O circuito da bancada está apresentado na Figura 18.

Figura 17 - Bancada didática de condicionamento de ar do Lamotriz



Fonte: o autor (2020)

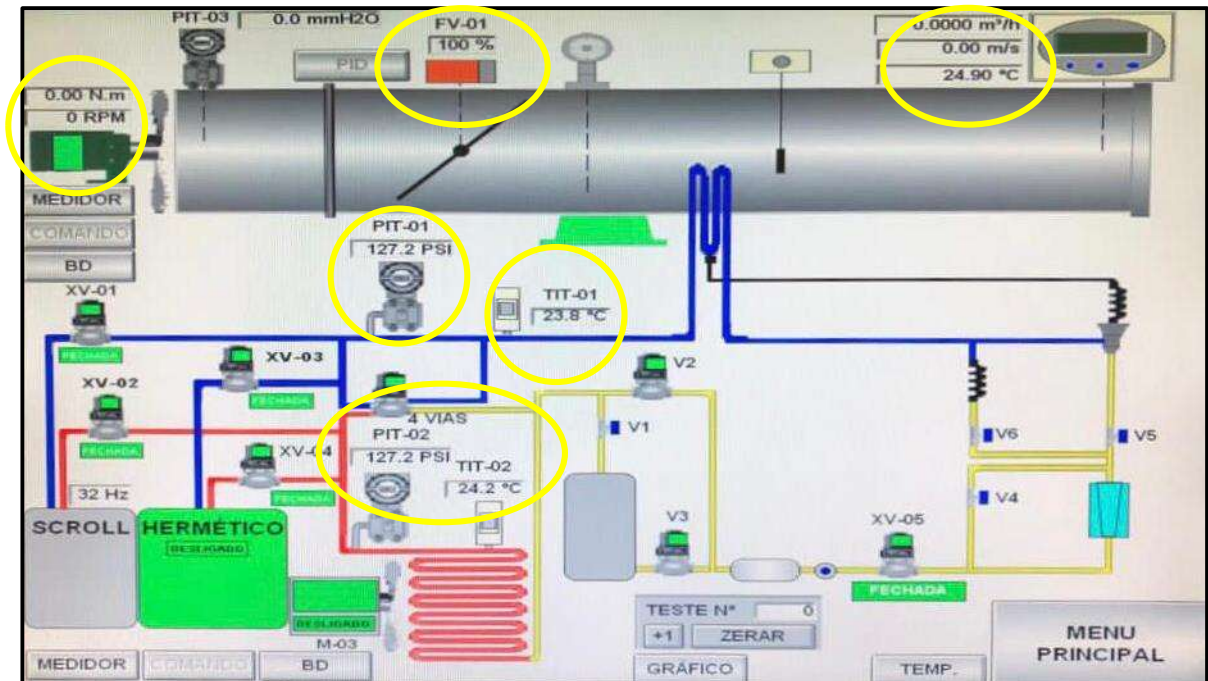
Figura 18 - Circuito da bancada didática do Lamotriz



Fonte: o autor (2020)

A bancada disponibiliza um *software* supervisorio (fabricante Indusoft) para o controle do sistema e apresentação de algumas variáveis, conforme Figura 19.

Figura 19 - Tela *software* supervisorio



Fonte: o autor (2020)

Porém, as demais variáveis importantes são mostradas em diversos locais ao longo do equipamento, dificultando a visualização das informações.

As medições de temperatura do fluido no condensador e no evaporador são feitas através de sensores e mostradas nos indicadores da Figura 20. No lado do ar, as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido, antes e depois do trocador de calor, devem ser lidas a partir de medidores instalados nos respectivos locais.

Figura 20 - Medidores de temperatura da bancada



Fonte: o autor (2020)

A medição de vazão na saída do condensador é feita através do rotâmetro mostrado na Figura 21 (graduado até 3 L/min), cuja leitura exige que se agache ou ajoelhe. Além disso, o fato de seguidamente observarem-se bolhas no fluido durante a passagem pelo medidor

(alterando reais valores de fluxo) sugere que haja perdas de pressão em demasia nos canais. O que é respaldado pela existência de trajetos longos e com muitas curvas.

Figura 21 - Medidor de vazão da bancada

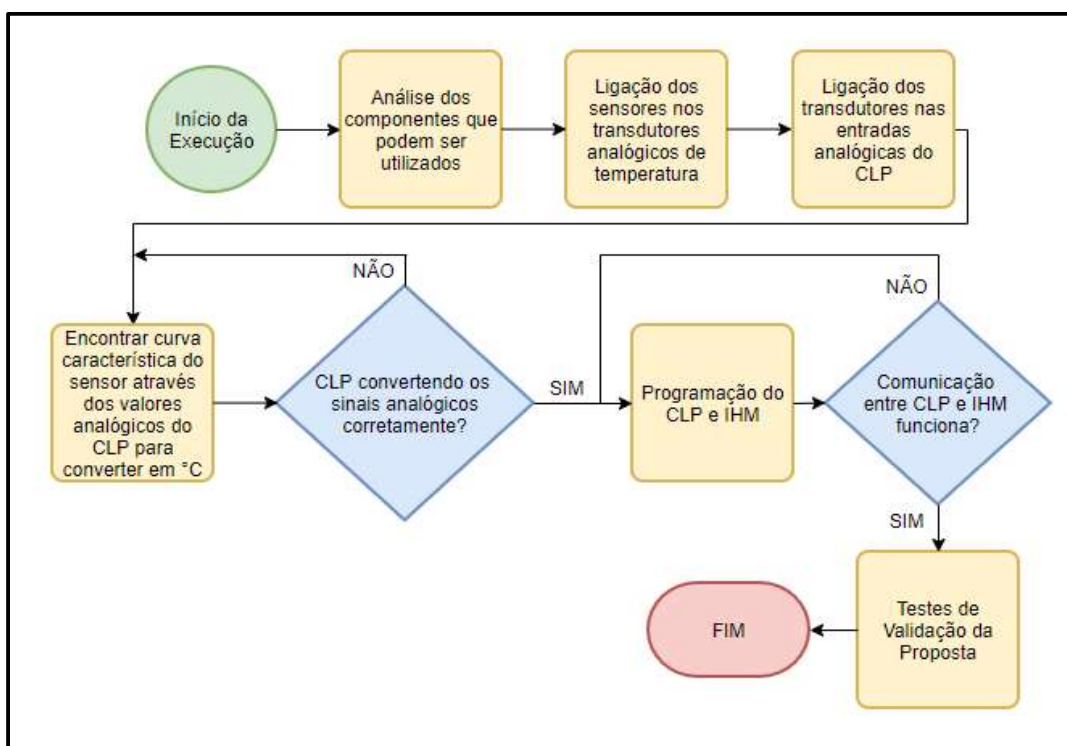


Fonte: o autor (2020)

3.1 ETAPAS DO TRABALHO

A execução do trabalho seguiu as etapas mostradas no fluxograma de atividades da Figura 22.

Figura 22 - Fluxograma de atividades



Fonte: o autor (2020)

A proposta de automatização da bancada consiste na implementação de uma interface homem-máquina, centralizando as informações das temperaturas mais importantes do sistema. Há ainda a necessidade de um CLP para controlar as informações recebidas dos sensores de temperatura, processar os sinais e se comunicar com a IHM. Essa interface será uma ampliação do sistema atual disposto, tendo mais um componente para o gerenciamento do sistema, e os dados que serão disponibilizados não constam no *software* supervisor.

Houve também a análise do medidor de vazão do sistema, para possível troca para um sensor analógico, utilizando o mesmo controlador e mesma IHM do sistema proposto. Porém, o sensor disponível para testes, não estava em pleno funcionamento, do tipo turbina optoeletrônica, do fabricante Festo, com faixa de medição de 0,3 a 9 L/min, não estava operando corretamente. Tal fato fez com que a medição de vazão não fosse considerada no desenvolvimento posterior, mas possível de ser contemplada como implantação futura. O sensor em questão está ilustrado na Figura 23.

Figura 23 - Sensor de vazão testado



Fonte: adaptado de SetPoint (2020)

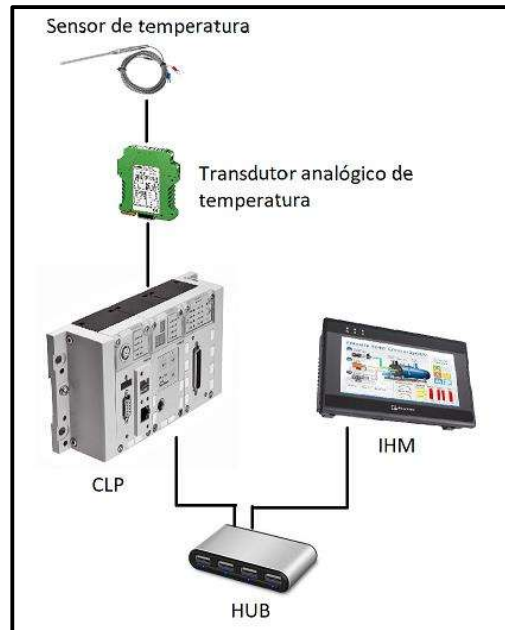
Outros modelos de sensores de vazão que são mais comuns de encontrar, utilizam faixas acima de 3 L/min, o que não satisfaz o sistema em questão. Para o uso na bancada do Lamotriz, é necessário um sensor cuja faixa de medição atenda e, também seja utilizado uma tensão de alimentação de 24 Vdc (corrente contínua).

3.2.1 Componentes do Sistema

O esquema apresentado na Figura 24 demonstra a utilização de um sensor de temperatura ligado ao um transdutor analógico, para o CLP captar um sinal de tensão de 0 a 10 V em sua entrada. A partir disso o CLP processa os dados e se comunica em rede, com utilização de um *hub*, com a IHM que, por fim, informa a temperatura medida. O sistema

automatizado proposto permite medições de 8 temperaturas: duas de bulbo seco e duas de bulbo úmido (lado ar), e 4 de entradas e saídas do evaporador e do condensador (lado refrigerante).

Figura 24 - Esquema do sistema proposto



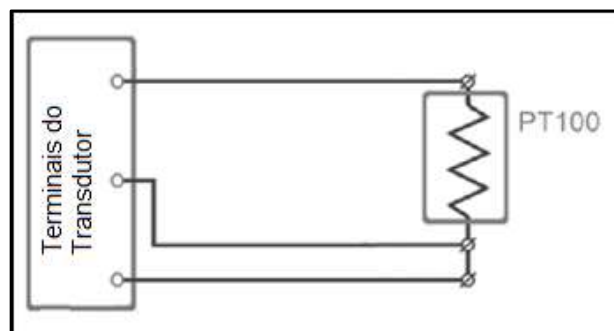
Fonte: o autor (2020)

3.2.2 Instalação de sensores e transdutores analógicos

Os sensores utilizados são termopares tipo PT100, por terem uma resolução em curva linear, facilitando o processo de aquisição de dados pelo CLP.

O termopar varia a resistência elétrica conforme a variação de temperatura. E como o sinal de resistência elétrica é muito baixo, o uso de um transdutor é necessário para amplificar e transformar este sinal em valores de 0 a 10 V, o que permite que CLPs efetuem a leitura. A figura 25 mostra a ligação elétrica padrão para termopares PT100 com 3 fios.

Figura 25 - Ligação elétrica termopar PT100



Fonte: adaptado de Eletrizados (2020)

3.2.3 Elaboração da curva característica do sensor

Sensores PT100 são sensores que têm um resistor em seu interior, onde conforme a variação de temperatura, esta resistência é variada de forma linear, de acordo com Omega (2015). E, para as entradas analógicas do CLP, são necessários unidades de tensão elétrica, de 0 a 10 V, para as leituras, sendo o transdutor analógico responsável por esta conversão.

E para o CLP processar o sinal elétrico e calcular corretamente a temperatura atual, é necessário criar um gráfico com os valores de temperatura e os valores disponibilizados no CLP. Este gráfico gera uma equação que será utilizada para o cálculo automático da temperatura a partir do sensor. Este processo pode ser chamado de calibração e é necessário para a conversão dos valores analógicos lidos pelo CLP, serem corretamente convertidos em unidades de temperatura. Para a calibração do sensor, foi utilizado um medidor de temperatura comum, colocado sempre no mesmo meio que o sensor utilizado no sistema. Desta forma, foram coletados diversos valores de temperatura e de valores analógicos lidos pelo software do CLP.

3.2.4 Programação do CLP e IHM

A programação do CLP é baseada na curva característica do sensor. A partir da equação gerada no gráfico, o CLP processa o valor do sensor e calcula o valor em unidade de temperatura. Após cálculo feito de forma automática, este valor é transferido para a IHM (protocolo de comunicação de escolha do operador dos que estão disponíveis).

Para o CLP foi utilizada a linguagem de programação *Ladder* (por ser a única linguagem de programação que o *software* tem disponível), fazendo toda a lógica de processo de operação.

O trabalho de programação da IHM é baseado na configuração do *layout* e nos dados recebidos, devem ser alocados nos lugares onde foi planejada a visualização, no caso das temperaturas. E para estes dados, devem ser alocados as variáveis de mesmo endereço que foram utilizadas na programação do CLP. Portanto, a variável que é transferida do CLP para a IHM será mostrada corretamente.

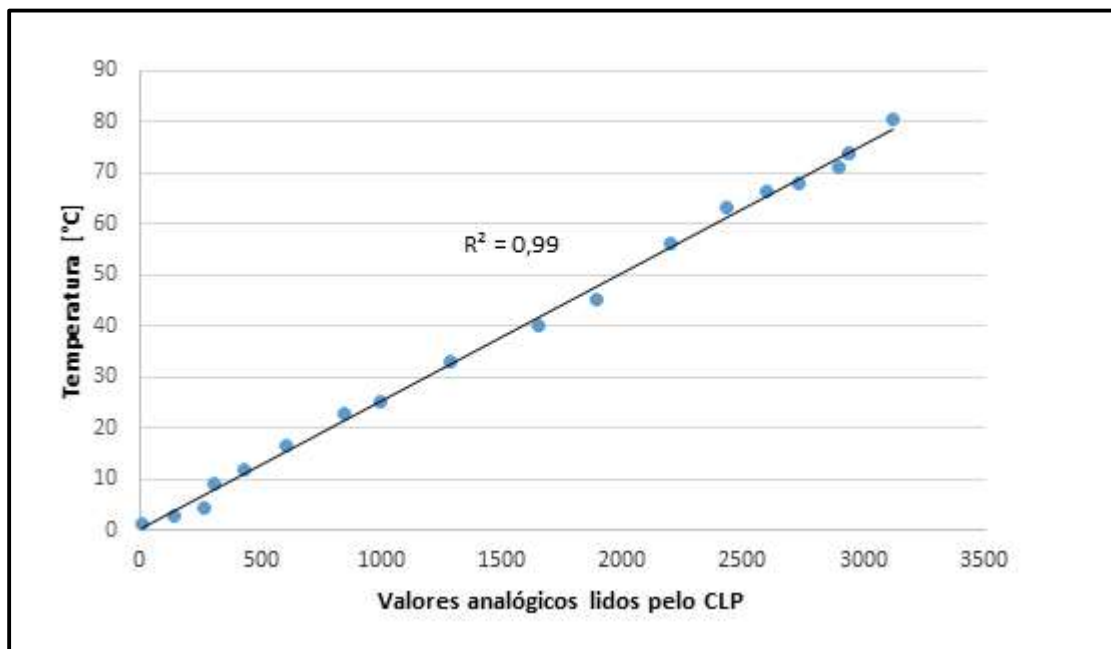
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos são apresentados neste capítulo separados em: equação do sensor, elaboração do código de programação do CLP, visualização da IHM em funcionamento e estimativa de investimento.

4.1 CALIBRAÇÃO DO SENSOR PT100

A Figura 26 mostra a reta ajustada pelos pontos coletados, explicitada também na Equação 12. Os dados coletados estão dispostos no Apêndice A.

Figura 26 - Gráfico gerador da equação do sensor PT100



Fonte: o autor (2020)

$$T = 0,0251.VA + 0,1961 \quad (12)$$

onde: T é a temperatura atual do termopar [°C];

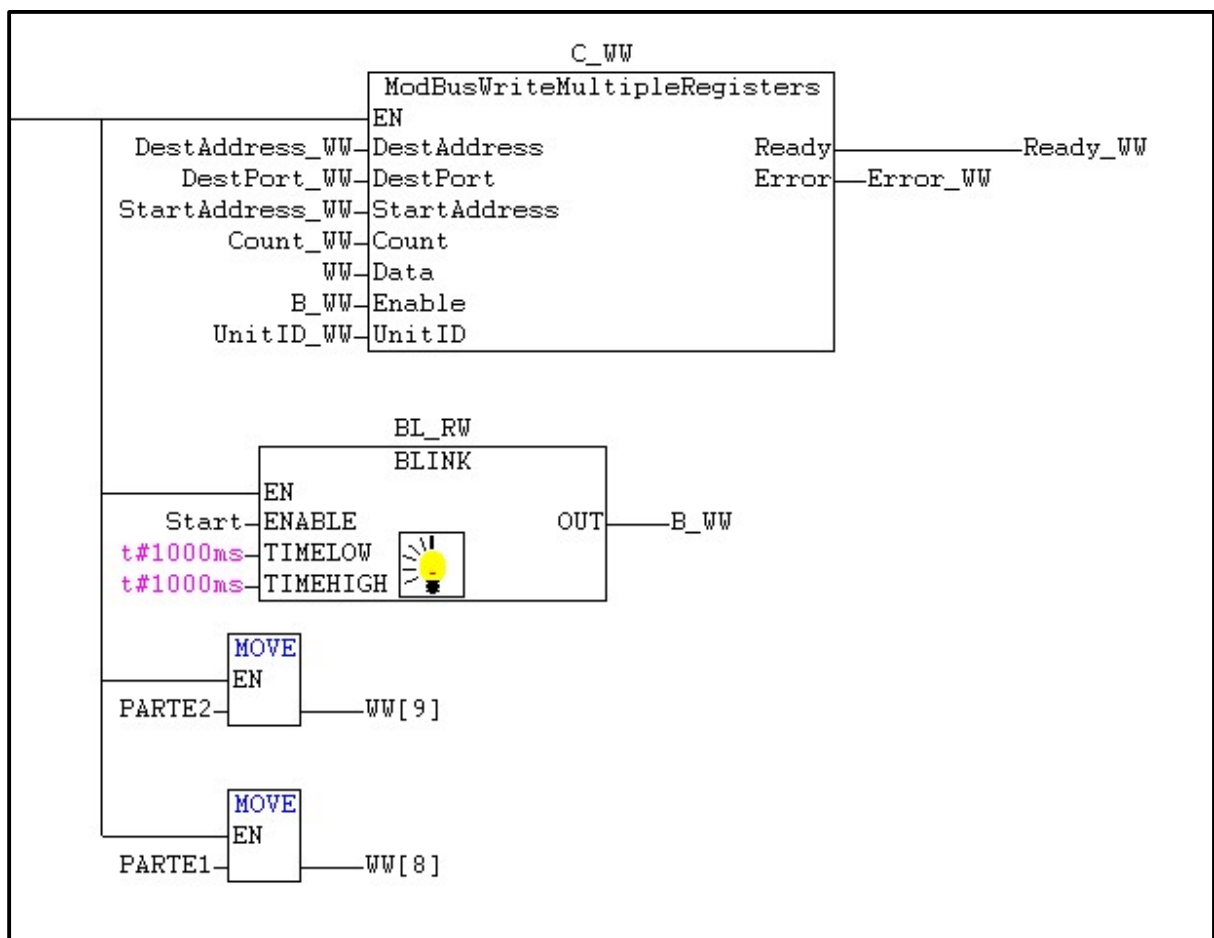
VA é o valor analógico lido pelo CLP [adimensional].

4.2 CÓDIGO DO PROGRAMA DO CLP

O CLP programado foi um CPX-CEC da fabricante Festo. O *software* de programação utilizado é o Codesys v2.3. A linguagem de programação utilizada foi a *Ladder*.

Para o programa funcionar corretamente, o sistema teve que contar com um bloco de comunicação em rede para a escrita de variáveis, utilizando protocolo Modbus TCP/IP. Este bloco de comunicação é proveniente do próprio software, sendo um bloco padrão para esta finalidade. O programador tem o trabalho de atribuir os endereços de rede corretos dos dispositivos para que a comunicação funcione, assim como definir quais e quantas variáveis estarão sendo transmitidas em intervalos de 1 segundos. Na Figura 27 são mostradas as duas partes de cada temperatura que são enviadas à IHM (PARTE1 e PARTE2), que representam o valor inteiro e a parte decimal, respectivamente.

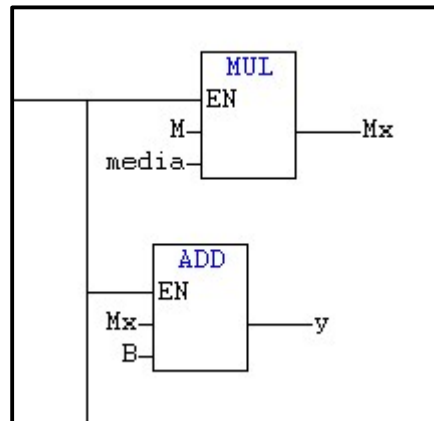
Figura 27 - Bloco para comunicação Modbus para escrita de variáveis



Fonte: o autor (2020)

Para o cálculo da temperatura, a Figura 28 demonstra o código para equação linear do sensor. A variável “media” é multiplicada com a “Mx” (da reta, é 0,0251) e depois é adicionado ao resultado a variável “B” (0,1961). Então a temperatura atual é encontrada.

Figura 28 - Código para equação linear do sensor



Fonte: o autor (2020)

É importante informar que a variável média é proveniente de uma média de 10 medições de temperatura (valores analógicos do CLP) no intervalo de 1 segundo. Desta forma, a cada 1 segundo o CLP faz a média dos valores lidos e disponibiliza para o cálculo da temperatura correta. Isso faz com que a visualização não fique com mudanças repentinas e bruscas na temperatura. O código do programa se encontra no Apêndice B.

4.3 PROGRAMAÇÃO DA IHM

A IHM utilizada foi uma eXP20-TTA da fabricante LS. A IHM tem 4" de tela colorida. O *software* utilizado foi o XP-Builder. Para a programação da IHM, é necessário montar o *layout* já definido, e então colocar as variáveis recebidas pelo CLP nos lugares corretamente. A Figura 29 mostra como ficou a IHM através do *software*.

Figura 29 - IHM visualizada através do *software*

Fonte: o autor (2020)

4.4 TESTE REALIZADO NO LAMOTRIZ

A Figura 30 mostra a bancada de refrigeração e os equipamentos instalados para o teste realizado. O sensor de temperatura foi colocado junto com o medidor de referência, como mostra a Figura 31. A 32 mostra ambas as leituras, feitas após inicializados o CLP e a IHM através de seus respectivos *softwares*.

Figura 30 - Bancada didática em testes



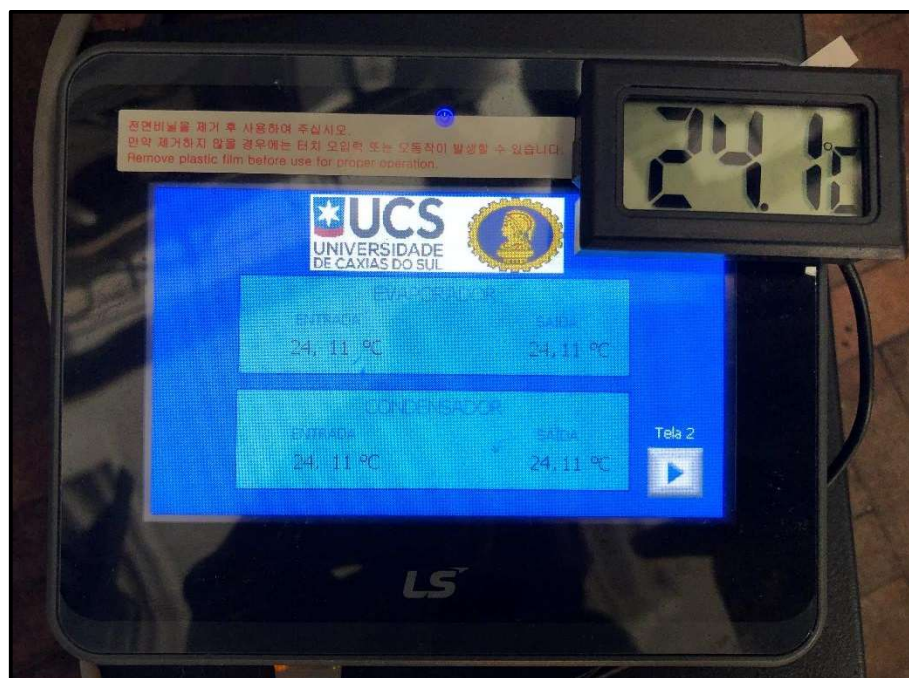
Fonte: o autor (2020)

Figura 31 - Medidor de temperatura e Termopar PT100 instalados



Fonte: o autor (2020)

Figura 32 - IHM finalizada nos testes de validação



Fonte: o autor (2020)

Todos os processos realizados foram possíveis de observar seu funcionamento. O termopar PT100 e o medidor de temperatura de referência foram colocados em equilíbrio térmico para os testes, mostrando a diferença mínima de temperatura entre as medições, mas pode-se considerar uma variação de no máximo 0.2, de acordo com os testes realizados no laboratório. No período de testes, ainda foram detectados quedas e subidas bruscas nas temperaturas mostradas ao usuário, logo, foram feitas modificações nos códigos do programa do CLP para suavizar este efeito.

No geral, os testes realizados mostraram uma boa assertividade nos códigos de programação e na funcionalidade proposta, não exigindo muito retrabalho durante os testes, e, ainda, foi possível observar possíveis melhoras futuras utilizando a mesma infraestrutura usada para este trabalho, aumentando as variáveis que possam ser mostradas ao aluno/usuário.

4.5 ESTIMATIVA DE INVESTIMENTO

A Tabela 1 demonstra a estimativa do investimento de aquisição para execução da proposta. Os valores são os médios encontrados no mercado para os modelos de fabricantes confiáveis, mas não topo de linha. A estimativa não considera, porém, valores de alteração da tubulação nem de mão de obra. Os valores podem mudar de acordo com reajustes, importação e custos de entrega.

Tabela 1 - Estimativa de custos para implementação do sistema

Componentes	Quantidade	Preço Unitário	Preço Total
Sensor temperatura PT100	8	R\$ 60,00	R\$ 480,00
Transdutor Analógico de Temperatura	8	R\$ 200,00	R\$ 1.600,00
IHM colorida	1	R\$ 1.100,00	R\$ 1.100,00
CLP com 12 entradas analógicas	1	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00
Sensor de Vazão Analógico (0-3 l/min)	1	R\$ 300,00	R\$ 300,00
Cabos de rede RJ45	2	R\$ 15,00	R\$ 30,00
Hub para comunicação em rede (5 portas)	1	R\$ 60,00	R\$ 60,00
TOTAL			6.070,00

Fonte: o autor (2020)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo do desenvolvimento do trabalho, diversos conceitos abordados na graduação foram aprendidos, revisados ou aplicados na automatização da bancada didática de condicionamento de ar.

Foi proposto o uso de uma interface homem-máquina (IHM) para centralização das leituras das temperaturas do sistema, que não são mostradas no atual *software* supervisor da bancada. Isso foi conseguido através de termopares PT100 conectados a transdutores analógicos de temperatura que, por sua vez, são ligados ao CLP para processar os sinais e transmiti-los através de uma rede de comunicação industrial (Protocolo Modbus) para a IHM, em tempo real. A operação da bancada dessa forma faz com que o aprendizado do aluno seja facilitado.

Para aferição dos sensores, foram coletados valores lidos pelo CLP, comparados com temperaturas reais através de um termômetro de referência e feito um gráfico para encontrar a equação linear de ajuste. Em conjunto com um código de programação que garantiu uma média de 10 medições por minuto, as variações das temperaturas mostradas ao usuário foram suavizadas.

É possível destacar alguns benefícios com a automatização da bancada de condicionamento de ar realizada no Lamotriz, como a centralização das variáveis do sistema, facilitando a visualização por parte de quem instrui e de quem aprende. Outro benefício foi o fato de haver agora a demonstração das variáveis que não estão contidas no *software* supervisor já instalado no sistema. Outra análise positiva, é o caso do processo de ensino-aprendizagem ser aprimorado por conta da interatividade dos usuários com a interface homem-máquina, ao aliar a teoria com a prática.

Para trabalhos futuros, propõe-se a implementação de um sensor de vazão analógico na bancada didática, que poderia ser ligado ao mesmo CLP que controla as temperaturas e mostrado na mesma IHM, reduzindo o investimento. O atual medidor de vazão é analógico e ocupa um espaço significativamente grande comparado a um sensor eletrônico, e ainda exige muitas curvas no sistema, fazendo com que aumente a perda de pressão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS; **1997 ASHRAE handbook: fundamentals**. SI ed. Atlanta: ASHRAE, 1997. 700 p.

BEGA, Egídio A. **Instrumentação Industrial**. 3 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. 694 p.

BORGNAKKE, Claus.; SONNTAG, Richard E. **Fundamentos da termodinâmica**. 8 ed. São Paulo: Blücher, 2013. 728 p.

DANFOSS A/S & METAPHOR REKLAMEBUREAU. **Refrigerant options now and in the future**. Danfoss, 2011. Disponível em: <http://www.ra.danfoss.com/TechnicalInfo/Literature/Manuals/RA/DKRAPE300A402.pdf>. Acesso em: 12 maio 2020.

ELETRIZADOS. **Como ligar os termoresistores PT100?** Disponível em: <https://eletrizados.com.br/como-ligar-os-termoresistores-pt100/>. Acesso em 05 nov 2020.

ENGPROCESS. **O que é IHM? Descubra aqui**. Disponível em: <https://engprocess.com.br/o-que-e-ihm/>. Acesso em 06 jun 2020.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 644 p.

LS BRASIL. **Linhas de IHM LS**. Disponível em: <https://lsbrasil.com.br/linhas-de-ihm-ls/>. Acesso em 06 jun 2020.

MORAN, et al. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018. 859 p.

OMEGA. **Sensores Pt-100**. Disponível em: <https://br.omega.com/prodinfo/pt100.html>. Acesso em: 13 dez 2020.

SCHWENKE, Thomas. **Scroll compressor – How it works!**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=yNgql4XPUZc>. Acesso em: 18 maio 2020.

SETPPOINT. **Sistema de Controle de Processos**. Disponível em: <https://setpoint.wordpress.com/set-point/network/stand-by/atividades/bancada-festo/>. Acesso em 09 dez 2020.

SILVA, Jesué Graciliano da. **Introdução à tecnologia da refrigeração e da climatização**. São Paulo: Artliber, 2004. 221 p.

SILVA, Jesué Graciliano da. **Introdução à tecnologia da refrigeração e da climatização**. 2 ed. São Paulo: Artliber, 2010. 263 p.

SONNTAG, Richard E.; BORGNAKKE, Claus.; VAN WYLEN, Gordon J. **Fundamentos da termodinâmica**. 5 ed. São Paulo: Blücher, 1998. 537 p.

STOECKER, Wilbert F.; JABARDO, José M. Saiz. **Refrigeração industrial**. 2.ed. São Paulo: Blücher, 2002. 371 p.

WONDERWARE. **Interface Homem-Máquina (IHM)**. Disponível em: <https://www.wonderware.com/pt-br/hmi-scada/what-is-hmi/>. Acesso em 06 jun 2020.

**APÊNDICE A – DADOS COLETADOS PARA GERAÇÃO DA EQUAÇÃO LINEAR DO
TERMOPAR PT100**

Valores Analógicos lidos pelo CLP	Temperatura [°C]
140	3
270	4,5
311	9
430	12
608	16,5
845	22,7
1000	24,9
1290	32,5
1650	40
1890	45
2200	56
2435	63,2
2600	66,5
2730	68
2894	71
2940	73,6
3120	80,5

APÊNDICE B – CÓDIGO COMPLETO DA PROGRAMAÇÃO DO CLP

