



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

OTÁVIO BATISTA NETO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE UM TROCADOR DE CALOR DE LINHA LÍQUIDO-
SUCÇÃO NO COEFICIENTE DE PERFORMANCE DE UM AR CONDICIONADO
SPLIT**

JOÃO PESSOA

2019

OTÁVIO BATISTA NETO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE UM TROCADOR DE CALOR DE LINHA LÍQUIDO-
SUCÇÃO NO COEFICIENTE DE PERFORMANCE DE UM AR CONDICIONADO
SPLIT**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba como parte do requisito de obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Bruno Leonardo Campêlo de Queiroga

JOÃO PESSOA

2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

N469e Neto, Otavio Batista.

Estudo da Influência de um Trocador de Calor de Linha Líquido-Sucção no Coeficiente de Performance de um Ar Condicionado Split / Otavio Batista Neto. - João Pessoa, 2019.
39f. : il.

Orientação: Bruno Leonardo Campêlo de Queiroga.
Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Trocador de Calor. 2. Ar Condicionado tipo SPLIT. I. Queiroga, Bruno Leonardo Campêlo de. II. Título.

UFPB/BC

OTÁVIO BATISTA NETO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE UM TROCADOR DE CALOR DE LINHA LÍQUIDO-
SUCÇÃO NO COEFICIENTE DE PERFORMANCE DE UM AR CONDICIONADO
SPLIT**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba como parte do requisito de obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Bruno Leonardo Campêlo de Queiroga

Orientador

Doutorando Francisco Everton Tavares

Examinador

Dr. Vicente de Vasconcelos Claudino Filho

Examinador

João Pessoa

2019

De modo especial, aos meus pais, que sempre depositaram em mim total confiança.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço, e não poderia ser diferente, a minha mãe, Joseneide Alves Batista, a qual sempre esteve presente em todos os momentos e ao meu pai, já falecido, Luís Carlos da Silva Batista, que depositou toda confiança em mim.

Agradeço, à Amanda Priscilla, minha irmã, por todo incentivo.

Ao meu orientador, Prof. Bruno Queiroga, pelo acompanhamento e orientação, bem como a oportunidade de trabalharmos juntos.

Ao colegiado do Curso de Engenharia Mecânica, pela compreensão nos momentos difíceis.

Aos técnicos do Laboratório de Conservação e Transferência de calor, Jandemarques e Ayrton, pelo indispensável esforço na área de construção do experimento e ao aluno de doutorando Vicente Filho pela sua contribuição durante o desenvolvimento do trabalho.

RESUMO

Este trabalho tem como proposta realizar uma análise comparativa do Coeficiente de Performance (COP), entre duas configurações distintas de um condicionador de ar de 7000 Btu/h. Na primeira configuração o trajeto do fluido refrigerante é o mesmo do convencional. Já na segunda, o fluido atravessa um Trocador de Calor de Linha de Líquido-Sucção, onde o capilar envolve parte da tubulação de sucção. Foi instalado um sistema de *bypass*, a fim de facilitar a troca de configurações, sem ter a necessidade da constante montagem e desmontagem do sistema para a alteração do mesmo. Como resultado, verificou-se que COP do sistema com trocador de calor aumentou aproximadamente 9,89 % em relação ao sistema sem trocador de calor (convencional), mantendo-se a temperatura do ar insuflado em 15,3 °C.

PALAVRAS- CHAVE: Coeficiente de Performance, Trocador de Calor de Linha de Líquido-Sucção, Ar Condicionado Split.

ABSTRACT

This work has as goal do a comparative analysis of the Coefficient of Performance (COP), between two distinct configurations from an air conditioning device of 7000 Btu/h. In the first configuration the coolant trajectory is the same of the conventional system. In the second configuration, the coolant goes through a heat exchange installed in the on the liquid/suction line, where the capillary wraps part of the suction pipe. It was install a bypass system, in order to make easier the change of configurations, without the need of a constant assembly and disassembly of the system. As results, it was verified that the system's COP with the heat exchange had increase about 9.89% regarding to a conventional system without the heat exchange, keeping the temperature of the inflated air at 15.3 °C

Keywords: CoeficientOf Performance, liquid-suction line, bypass.

LISTA DE INLUSTRAÇÕES

Figura 1 - Distribuição de energia elétrica por setor.	11
Figura 2 - Ciclo teórico de refrigeração por compressão de vapor.	14
Figura 3 - Diagrama pressão x entalpia de um ciclo real.	15
Figura 4 - Sistema de um refrigerador doméstico.	17
Figura 5 - Sistema de Ar Condicionado Split.	18
Figura 6 - Principais componentes de um ciclo de refrigeração com SLHX.	20
Figura 7 - Trocador de calor tipo Casco-Tubo.	21
Figura 8 - Trocador de calor tipo linhas soldadas.	22
Figura 9 - Trocador de calor tipo tube in tube.	22
Figura 10 - Sistema de refrigeração estudado. (A) Parte frontal; (B) Parte traseira.	23
Figura 11 - Esquema do Ar Condicionado estudado.	24
Figura 12 - Cortador de tubos, Flangeador, Dobrador de tubos.	26
Figura 13 - Conjunto de soldagem oxiacetileno. (A) Cilindros; (B) Maçaricos.	26
Figura 14 - Manifold, botijão de gás refrigerante e bomba de vácuo.	27
Figura 15 - Retirada de fluido refrigerante do sistema.	27
Figura 16 - Sala de realização dos experimentos.	28
Figura 17 - Disposição da bancada de refrigeração na sala de experimentos.	29
Figura 18 - Área definida de saída de ar do evaporador.	30
Figura 19 - Configuração original do sistema de refrigeração.	30
Figura 20 - Configuração modificada do sistema de refrigeração.	31
Figura 21 - Termômetro digital Penta III.	32
Figura 22 - Termo higrômetro.	33
Figura 23 - Anemômetro.	33
Figura 24 - Analisador de energia.	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados coletados durante teste 1.....	36
Tabela 2 - Dados coletados durante teste 2.....	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos	12
1.1.1	Objetivo geral	12
1.1.2	Objetivos específicos	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	Refrigeração.....	13
2.2	Conforto Térmico	13
2.3	Ciclo Teórico de refrigeração por compressão de vapor	14
2.4	Ciclo Real de refrigeração por compressão de vapor	15
2.5	Sistemas de refrigeração residenciais	16
2.6	Coeficiente de Performance	18
2.7	Trocador de Calor de Linha Líquido - Sucção	20
2.7.1.	Tipos de Trocador de Calor de Linha Líquido - Sucção (SLHX).....	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1	Projeto do trocador de calor.	23
3.2	Execução do Projeto do trocador de calor proposto.....	25
3.3	Experimentos	28
3.4	Equipamentos utilizados	32
4	RESULTADOS	36
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
6	REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

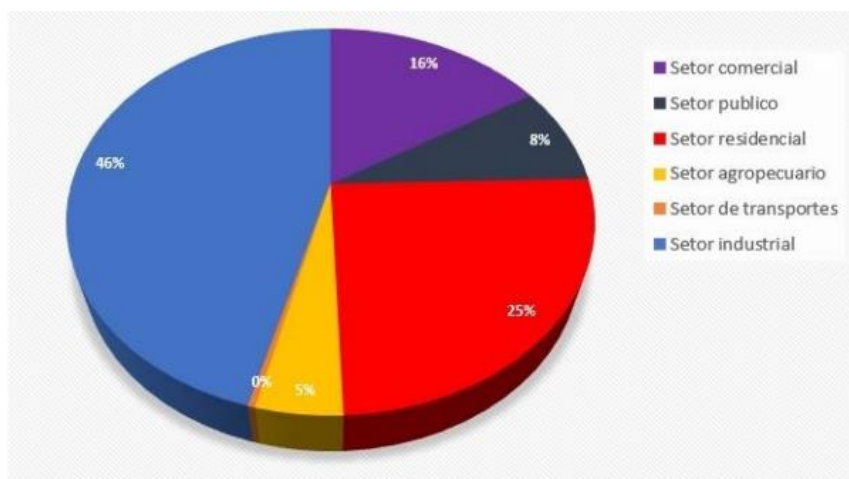
Na maior parte das atividades de desenvolver, produzir, criar, ensinar e em outras, a eletricidade está presente em diversas etapas, iluminando, movimentando, processando, ou seja, permitindo, facilitando e proporcionando conforto aos seus usuários.

Nos casos em que a energia elétrica é utilizada nos processos, essa passa a ser parte dos custos, de qualquer que seja o produto ou serviço realizado com a sua contribuição. Sendo assim, controlar os gastos com energia elétrica se torna importante em todas as instalações que façam o seu uso, melhorando a competitividade diante ao mercado, reduzindo seus custos na produção ou prestação de serviços.

A cada dia a parcela de energia elétrica destinada à climatização cresce. Estima-se que o consumo de energia elétrica devido aos condicionadores de ar no setor residencial tenha mais que triplicado nos últimos 12 anos, atingindo 18,7 TWh em 2017. A posse de equipamentos nas residências aumentou 9,0% ao ano entre 2005 e 2017, influenciado, principalmente, pelo crescimento das vendas de equipamentos novos entre 2010 e 2015. (UPE, 2018). Dessa forma faz-se necessário estudo de novas formas de reduzir esse consumo, sem alterar significativamente o custo na inovação.

Pesquisas divulgadas pelo Balanço Energético Nacional (BEN, 2012) mostram o consumo de energia elétrica no Brasil distribuído por setor observado na Fig. 1 a seguir.

Figura 1 - Distribuição de energia elétrica por setor.



Fonte: (BEN, 2012)

No setor residencial, o maior consumo de energia elétrica é atribuído a aparelhos de refrigeração e climatização, representando 33% do consumo do setor. Uma redução de 1% no

consumo de energia de equipamentos de refrigeração residencial geraria uma economia de cerca de 30 GWh/ano. No setor comercial 20 % da energia se destina a climatização (BEN, 2012).

Atualmente, o Ar Condicionado Split é o mais utilizado em residências, sendo, comparando-se com o Ar Condicionado de janela, mais econômico e mais silencioso. O mesmo apresenta em sua estrutura, uma unidade evaporadora, localizada no interior do ambiente, e uma unidade condensadora, que é instalada na parte externa ao recinto aclimatado. No entanto, como visto, o consumo desses equipamentos é considerável, demandando pesquisas para buscar torná-lo o mais econômico possível.

Em refrigeradores domésticos, uma técnica que vem sendo empregada para aumento de desempenho, e também para promover um melhor funcionamento dos componentes, é a utilização de Trocadores de Calor de Linha Líquido-Sucção. Já para sistemas de Ar Condicionado, é necessária a verificação do benefício dessa configuração, pois o tipo de instalação ou o tipo do fluido refrigerante podem tornar inviável a utilização desse componente.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho realiza um estudo no intuito de verificar a influência de um Trocador de Calor de Linha de Líquido-Sucção no Coeficiente de Performance de um Ar Condicionado do tipo SPLIT.

1.1.2 Objetivos específicos

- Fazer um estudo teórico sobre os sistemas de refrigeração por compressão de vapor e os tipos de Trocadores de Calor de Linha líquido-sucção.
- Escolher o tipo de trocador de calor a ser utilizado no sistema.
- Verificar como o trocador de calor será instalado.
- Promover a instalação do novo sistema.
- Realizar testes experimentais nas duas configurações
- Analisar os dados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Refrigeração

A refrigeração é a ciência que estuda o resfriamento de fluidos como ar e líquido de maneira a prover ambientes de baixa temperatura, para preservar alimentos, resfriar bebidas, fazer gelo e para diversas outras aplicações, tais como o condicionamento de ar em ambientes.

O uso da refrigeração e do Ar Condicionado representou um dos mais importantes avanços da civilização moderna. A possibilidade de guardar e distribuir alimentos e de viver e trabalhar em climas adversos deu às atividades humanas perspectivas melhores do que aquelas anteriormente possíveis.

2.2 Conforto Térmico

O ser humano é um animal de temperatura constante, na ordem de 37 °C, com faixa de variações muito reduzida, entre 36,1 °C e 37,2 °C, sendo 32 °C o limite inferior e 42 °C o limite superior para a sobrevivência em estado de enfermidade. A temperatura corpórea é mantida através do calor proveniente de reações químicas (metabolismo) que ocorrem pela ingestão de alimentos e consumo de ar. Para se conseguir o equilíbrio térmico grande parte da energia produzida pelo metabolismo deve ser dissipada pela pele (aproximadamente 80%). Portanto, a “máquina humana” possui rendimento muito baixo. O calor dissipado pelo homem depende da atividade exercida, em repouso absoluto o calor cedido ao ambiente é de aproximadamente 75 W (FROTA & SCHIFFER, 2003).

O equilíbrio térmico é essencial para a vida humana e é obtido quando a quantidade de calor produzida no corpo é igual à quantidade de calor cedida para o ambiente através da pele e da respiração. O calor produzido é a diferença entre a taxa de metabolismo e o trabalho mecânico realizado. (ASHRAE, 2001)

Sabe-se que temperaturas elevadas causam danos ao ser humano como: exaustão, câimbras, perda de concentração, etc. A observação acerca do rendimento do trabalho em minas da Inglaterra mostrou que o mineiro rende 41% menos quando a temperatura efetiva é de 27°C em relação ao rendimento à temperatura efetiva de 19°C (FROTA & SCHIFFER,

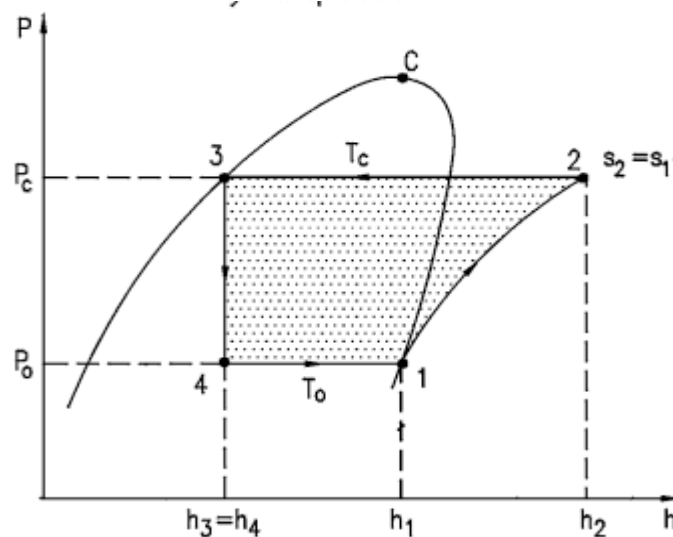
2003). Assim, em vários casos na nossa vida cotidiana os sistemas de condicionamento de ar são indispensáveis uma vez que:

- Controlam a temperatura ambiente;
- Controlam a umidade ambiente;
- Regulam os níveis de oxigênio;
- Controlam os odores a níveis abaixo do limite perceptível;
- Mantém a velocidade de movimentação do ar.

2.3 Ciclo Teórico de refrigeração por compressão de vapor

O estudo dos ciclos termodinâmicos envolve um procedimento para a obtenção de refrigeração de maneira contínua. Tal procedimento consiste em fazer com que um fluido, denominado refrigerante, passe por uma série de processos, retornando ao estado inicial, como visto na Fig. 2.

Figura 2 - Ciclo teórico de refrigeração por compressão de vapor.



Fonte: (VARGAS, 2010).

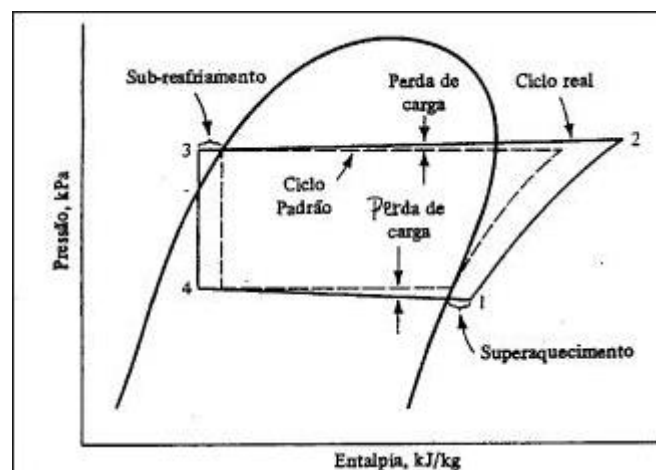
Os processos termodinâmicos que constituem o ciclo teórico em seus respectivos equipamentos são:

- Processo 1→2: O refrigerante entra no compressor à pressão do evaporador. O refrigerante é então comprimido até atingir a pressão de condensação e, ao sair do compressor está superaquecido à temperatura T_2 .
- Processo 2→3: O refrigerante rejeita calor no condensador, e este calor é transferido para um meio que tem um temperatura inferior . A quantidade de calor emitido é o calor absorvido pelo refrigerante no evaporador mais o calor gerado pela compressão. O meio de transferência de calor pode ser ar ou água, à pressão constante. Neste processo, o fluido refrigerante é resfriado da temperatura T_2 até a temperatura de condensação TC e, a seguir, condensado até se tornar líquido saturado na temperatura T_3 .
- Processo 3→4: O líquido do condensador é então enviado a um tanque receptor. A pressão no receptor é muito maior do que o a pressão no evaporador, devido à compressão (aumento de pressão), que ocorreu no compressor. Para reduzir a pressão ao mesmo nível que a pressão de evaporação, é utilizado um dispositivo, chamado de válvula de expansão, reguladora de pressão.
- Processo 4→1. Ocorre no evaporador, sendo um processo de transferência de calor a pressão constante (P_0), consequentemente a temperatura constante (T_0), desde vapor úmido (estado 4), até atingir o estado de vapor saturado seco.

2.4 Ciclo Real de refrigeração por compressão de vapor

Na Figura 3, pode-se perceber uma diferença significativa entre o ciclo teórico e real.

Figura 3 - Diagrama pressão x entalpia de um ciclo real.



Fonte: (EBAH, 2018)

O ciclo real difere do ciclo ideal pelo fato de certas hipóteses não serem verdadeiramente consideradas no ciclo real. Os pontos importantes do ciclo real que devem ser considerados são:

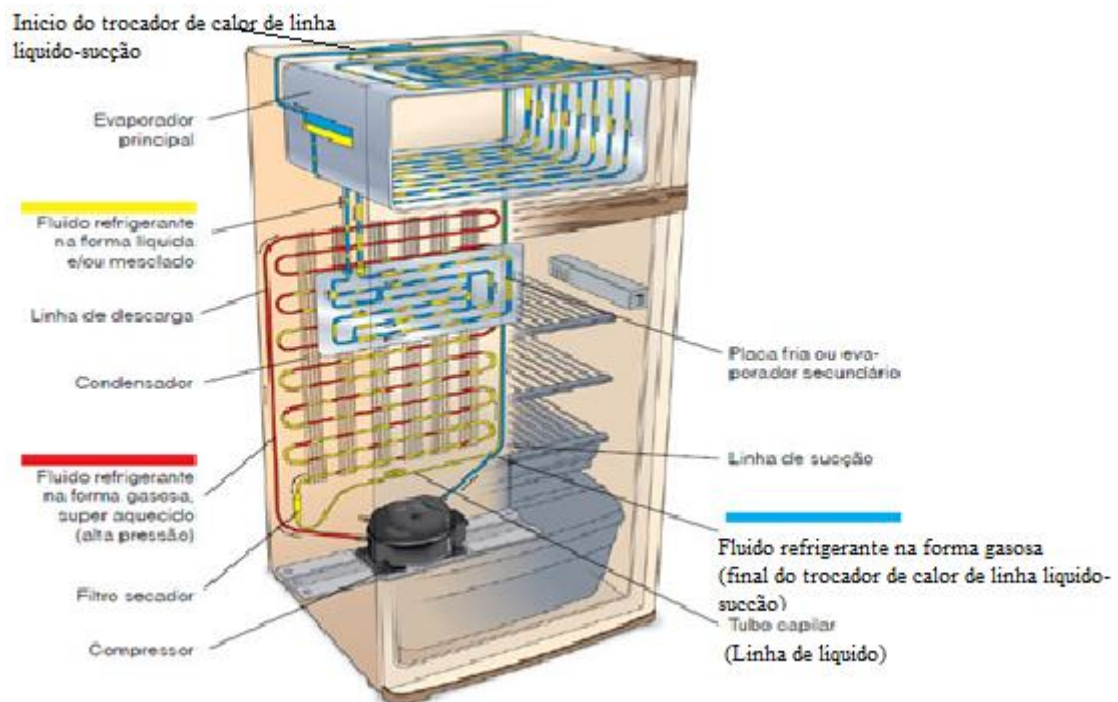
- O efeito do sub-resfriamento.
- As irreversibilidades de compressão.
- As perdas de carga na tubulação.
- A necessidade do superaquecimento do vapor.

Há uma necessidade de ocorrer o sub-resfriamento do líquido que sai do condensador, justamente para que não haja a formação de “bolhas”, o que acaba dificultando o processo de expansão. Já na saída do evaporador é necessário o superaquecimento do vapor, pois evita que gotículas de líquido adentrem o compressor, o que acaba impedindo a compressão úmida e conseqüentemente a redução da eficiência volumétrica. E por fim, teremos no processo de compressão uma natureza não isentrópica, causada por perdas como atrito, ruído e vibração.

2.5 Sistemas de refrigeração residenciais

Na Figura 4 é possível verificar o processo que ocorre em um refrigerador doméstico, como também seus principais componentes.

Figura 4 - Sistema de um refrigerador doméstico.

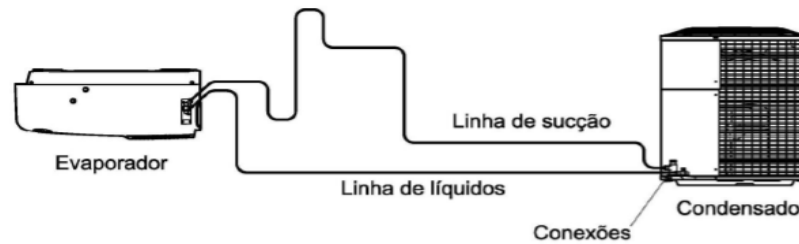


Fonte: (ALTERADO DE BLOG DO ELETRODOMESTICO, 2019).

Neste equipamento, além do funcionamento normal de um sistema de refrigeração, há a implementação de um trocador de calor para melhoria da sua performance. O tubo capilar instalado na saída do condensador encontra-se dentro da tubulação de sucção, havendo uma troca de calor (contracorrente) entre as linhas de líquido e de sucção. Como resultado dessa troca térmica, o refrigerante inicia sua expansão a uma temperatura mais baixa, pois perde calor, e o compressor recebe vapor levemente superaquecido.

Os sistemas de condicionamento de ar residenciais mais populares são os do tipo *Split*. Na Figura 5, temos um esquema do posicionamento dos principais componentes presentes em um aparelho de Ar Condicionado *Split*.

Figura 5 - Sistema de Ar Condicionado Split.



Fonte: (TARIK LINHARES TEBCHIRANI, 2011).

O ar-condicionado do tipo Split é um equipamento moderno e eficiente. Ele oferece numerosas vantagens, como fácil instalação, menor consumo de energia e diversidade de modelos discretos e sofisticados que podem, inclusive, ser incorporados à decoração do recinto.

De modo geral, todo Split é composto por dois componentes principais: a condensadora e a evaporadora. A parte externa é a condensadora, que rejeita para o meio exterior o calor absorvido do local a ser resfriado. Já a parte interna é a evaporadora, que libera o ar frio no ambiente aclimatado. Essas peças são conectadas por um tubo de cobre. Apesar da necessidade de acomodar e conectar esses dois componentes, a instalação de um ar-condicionado Split ocupa pouco espaço.

2.6 Coeficiente de Performance

O Coeficiente de Performance, COP, é um parâmetro fundamental na análise de sistemas de refrigeração, pois, o mesmo, analisa a capacidade de retirar calor pelo evaporador sobre a potência consumida do compressor. O COP do ciclo real, para as mesmas condições de operação, é sempre menor do que o do ciclo ideal. Para o ciclo teórico, o COP é função somente das propriedades do Refrigerante. Para o ciclo real, entretanto, o desempenho é fortemente dependente das propriedades na sucção do compressor e das características do compressor, condensador, evaporador e do dispositivo de expansão.

A razão entre a taxa de calor retirado do ar e a potência consumida pelo compressor deve ser a maior possível e é dada pela seguinte expressão:

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

Onde:

COP - Coeficiente de Performance;

\dot{Q}_L - taxa de calor retirado do ar;

\dot{W}_C - potência elétrica consumida pelo compressor.

A taxa de calor absorvida pode ser calculada através da seguinte expressão, (INCROPERA, 2011):

$$\dot{Q}_L = \dot{m} c_p (T_{sai} - T_{ent}) \quad (2)$$

Onde:

\dot{Q}_L - taxa de calor retirado do ar;

\dot{m} - vazão mássica do ar atmosférico;

c_p - calor específico à pressão constante;

T_{ent} - temperaturas de entrada do ar;

T_{sai} - temperaturas de saída do ar.

A vazão mássica do ar que escoo pelo evaporador é dada pela seguinte equação:

$$\dot{m} = \rho A V \quad (3)$$

Onde:

\dot{m} - vazão mássica do ar;

V - velocidade média do escoamento do ar;

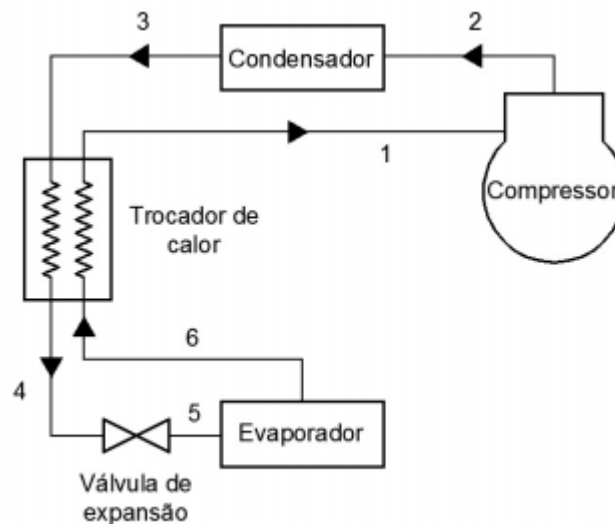
ρ - massa específica;

A - área transversal de saída do ar.

2.7 Trocador de Calor de Linha Líquido - Sucção

O ciclo de compressão a vapor possui dois níveis diferentes de pressão, um de baixa pressão que é a pressão no evaporador e outro de alta pressão sendo a pressão no condensador. Esta diferença de pressão permite que o fluido mude de fase e absorva ou rejeite calor do sistema. Por este motivo as linhas de líquido e de sucção apresentam uma diferença de temperatura considerável, aproximadamente 30°C. Considerando esta diferença de temperatura, poderíamos utilizar o gás frio que sai do evaporador para resfriar o líquido quente que sai do condensador, mas na prática isto não ocorre, pois a tubulação de líquido e de sucção possuem isolamentos térmicos distintos. A Fig. 6 representa esquematicamente o Trocador de Calor de Linha Líquido – Sucção (*Suction-Liquid Heat Exchanger SLHX*).

Figura 6 - Principais componentes de um ciclo de refrigeração com SLHX.



Fonte: (TEBCHIRANI, 2011).

Um dos motivos da aplicação de um Trocador de Calor de Linha Líquido - Sucção (SLHX) é garantir a operação correta do sistema e elevar o seu desempenho. Segundo ASHRAE, Fundamentals Handbook (2001) os SLHX são eficazes para:

- Elevar o COP;
- Elevar o sub-resfriamento do refrigerante para evitar a formação do gás flash na entrada do dispositivo de expansão;
- Evaporar totalmente o líquido residual que pode permanecer na aspiração antes de chegar ao compressor.

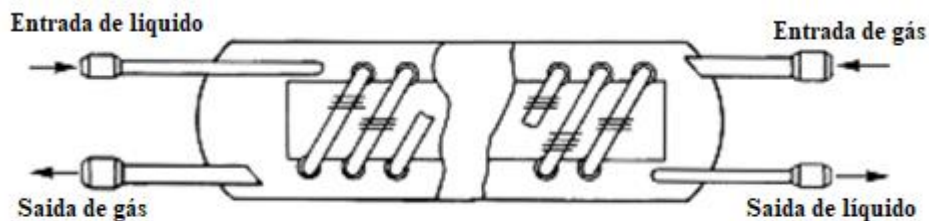
2.7.1. Tipos de Trocador de Calor de Linha Líquido - Sucção (SLHX)

Existem diversos trocadores de calor disponíveis no mercado para a aplicação em linhas de líquido - sucção. Segundo a ASRHAE, 2001 os referidos trocadores podem ser:

✓ Tipo Casco e Tubo

Estes tipos de trocadores (ver Fig. 7) são facilmente encontrados na literatura e também comercialmente. Devido ao alto custo financeiro e suas dimensões, os mesmos, não são utilizados para a aplicação em Ar Condicionado.

Figura 7 - Trocador de calor tipo Casco-Tubo.

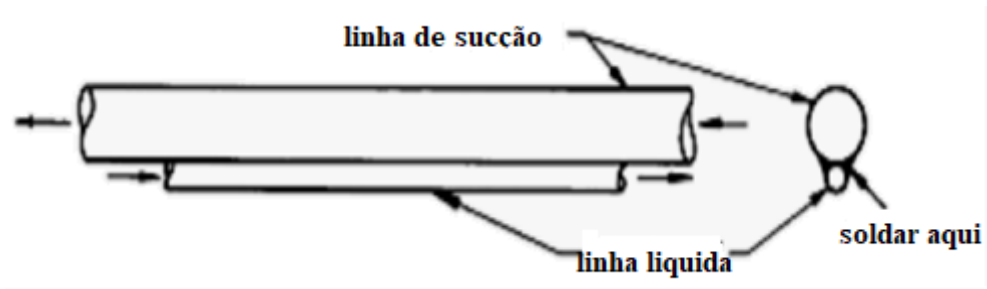


Fonte: (Adaptado de ASHRAE, Fundamentals Handbook, 2001).

✓ Tipo tubo soldado

Este trocador (ver Fig. 8) é formado somente pela soldagem das linhas formando uma unidade contra corrente. É importante que a linha de líquido esteja abaixo da linha de sucção, pelo motivo que o líquido a ser evaporado estará sempre na parte inferior da tubulação.

Figura 8 - Trocador de calor tipo linhas soldadas.

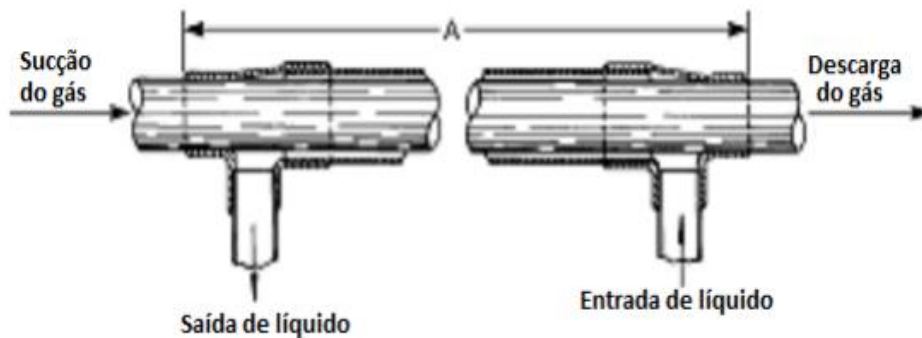


Fonte: (Adaptado de ASHRAE, Fundamentals Handbook, 2001).

✓ Tipo *tube in tube* concêntricos

Possuem menor eficiência que os anteriores, contudo, pelas suas dimensões reduzidas podem ser muito úteis na evaporação de eventuais partículas de fluido que permanecem no estado líquido na sucção do compressor. Pode ser obtido pela utilização da própria tubulação frigorífica, onde a linha de líquido passará por dentro da tubulação de sucção (ver Fig.9).

Figura 9 - Trocador de calor tipo tube in tube.



Fonte: (ASHRAE, 2001).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Projeto do trocador de calor.

O Ar Condicionado Split utilizado nos testes é da marca *Rheem*, de capacidade total de refrigeração igual a 7000 Btu (2,05 kW), consumo de energia de 14,0 kWh/ mês e eficiência energética a plena carga de 3,01. O refrigerante de trabalho utilizado é o R-22. O Ar Condicionado está montado em uma bancada móvel, como pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 - Sistema de refrigeração estudado. (A) Parte frontal; (B) Parte traseira.



(A)

(B)

Fonte: (AUTOR, 2019).

Na parte de trás, temos um condensador e o compressor, na parte da frente superior se encontra um evaporador. Já se encontram instalados manômetros nas linhas de alta e de baixa pressão.

O trocador utilizado nesse trabalho veio do mesmo princípio dos tipos Tubo Soldado, porém o capilar da linha de líquido era envolvido na tubulação de linha sucção com o objetivo de aumentar a área de contato entre as tubulações envolvidas e conseqüentemente uma maior transferência de calor.

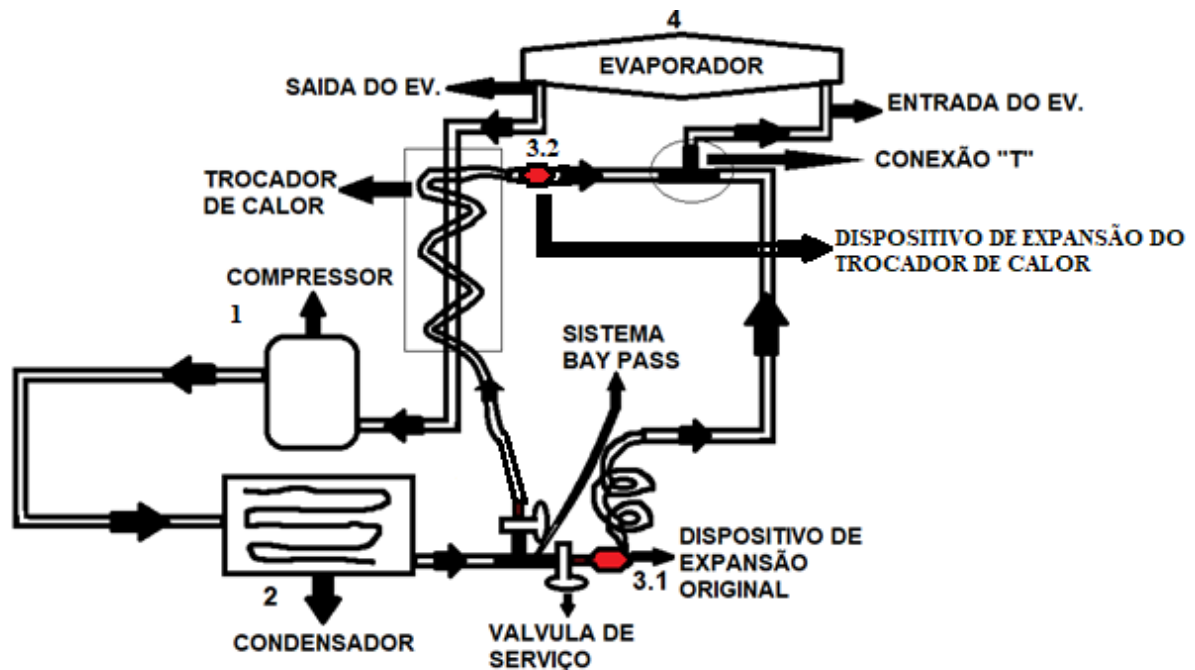
Inicialmente, foi discutido como iria ser instalado o trocador de calor, pois as tubulações das duas configurações deveriam ter, obrigatoriamente, a mesma distância por conta das perdas inerentes ao ciclo de refrigeração.

Para tal problema, a solução foi inserir um dispositivo de expansão similar ao original posicionado ao lado daquele já instalado, e desenvolver um sistema de *bypass* a fim de facilitar ao máximo os ensaios dos dois tipos de configuração dentro do mesmo espaço de trabalho. Esse sistema de *bypass* acabaria com o problema da desmontagem de uma configuração em detrimento da montagem da outra.

Para por em prática a ideia acima, foi necessário a compra dos seguintes materiais: dispositivo de expansão, tubo capilar, válvula de serviço e conexões do tipo "T".

A Figura 11 mostra o esquema do Ar Condicionado no qual temos instalado o *bypass*.

Figura 11 - Esquema do Ar Condicionado estudado.



Fonte: (AUTOR, 2019).

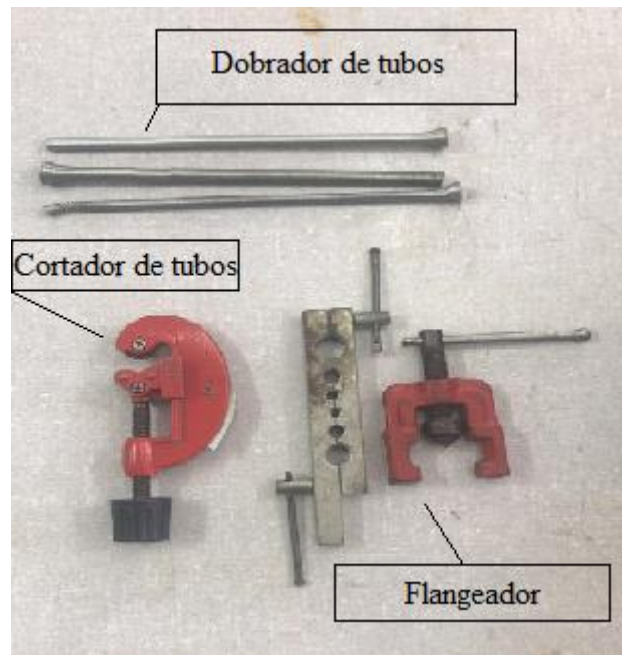
A configuração do sistema sem modificações esta caracterizada pelos caminhos $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3.1 \rightarrow 4 \rightarrow 1$. Já a segunda configuração, com as modificações aplicadas, esta representada pelos seguintes caminhos $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3.2 \rightarrow 4 \rightarrow 1$.

Na primeira configuração (sem trocador de calor), estando a válvula de serviço 3.2 fechada, o fluido passa pela válvula 3.1 e em seguida pelo dispositivo de expansão original ate chegar ao evaporador. Já na segunda configuração (com o trocador de calor), estando a válvula de serviço 3.1 fechada, o fluido passa pelo capilar desta configuração que é envolvido em parte da tubulação de linha de sucção, caracterizando o Trocador de Calor de Linha Líquido-Sucção, e em seguida passa pelo dispositivo de expansão adicional

3.2 Execução do Projeto do trocador de calor proposto.

Foi feita a retirada do refrigerante existente no próprio sistema de refrigeração para realização de corte e reparos nas tubulações, bem como a correta instalação da válvula de serviço, dispositivo de expansão e conexões do tipo “T”. Foi necessário o flangeamento da válvula de serviço e das conexões tipo “T” realizados por instrumentos do Laboratório de Refrigeração (ver Fig. 12). Já nas conexões que envolvem o trocador de calor foi realizada uma soldagem com o conjunto soldagem oxiacetileno disponibilizado pela Oficina Mecânica (ver Fig. 13).

Figura 12 - Cortador de tubos, Flangeador, Dobrador de tubos.



Fonte: (AUTOR, 2019).

Figura 13 - Conjunto de soldagem oxiacetileno. (A) Cilindros; (B) Maçarico.



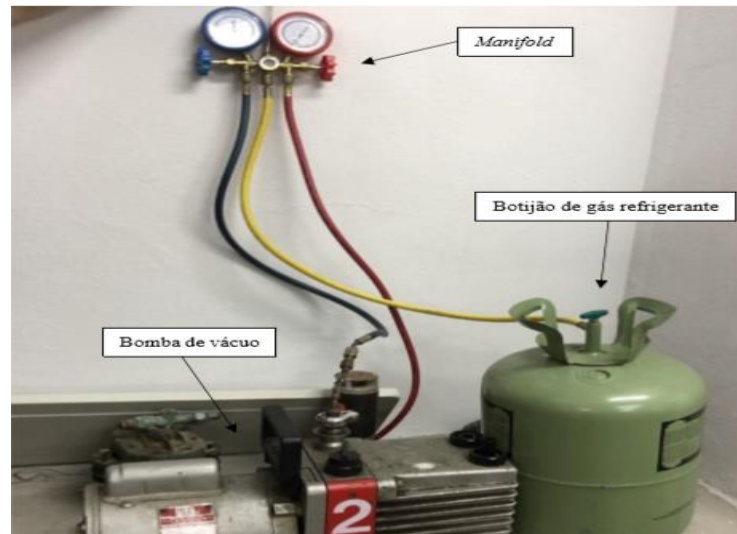
(A)

(B)

Fonte: (AUTOR, 2019).

O primeiro passo foi realizar um vácuo no botijão para auxiliar na retirada do fluido e em seguida fez-se uso de uma bomba de vácuo, e sempre que tivesse alguma movimentação de fluido, um *manifold* era usado (ver Fig. 14).

Figura 14 - Manifold, botijão de gás refrigerante e bomba de vácuo.



Fonte: (AUTOR, 2019).

Após a retirada de fluido do sistema com o auxílio de um compressor, foi visto que o mesmo não possuía a quantidade necessária para funcionamento sendo preciso obter um volume maior. A Figura 15 mostra como foi realizado o processo de retirada do refrigerante do sistema.

Figura 15 - Retirada de fluido refrigerante do sistema.



Fonte: (AUTOR, 2018).

Para fazer a verificação minuciosa de todo e qualquer tipo de vazamento presente nas tubulações, o refrigerante era colocado e a pressão em alguns pontos era registrada. Era esperado um dia e conferido se essa pressão tinha caído. Os processos de retirada de vazamento e acoplamento da nova estrutura foram realizados através de soldagem oxiacetilênica, usando dois cilindros e um maçarico.

3.3 Experimentos

Desde início, a procura do local de trabalho onde seria feito as análises dos experimentos foi sendo pesquisada. Foi encontrada uma sala localizada no bloco de elétrica no Centro de Tecnologia da UFPB, próxima ao laboratório de refrigeração, o que facilitou bastante a remoção de toda a bancada. A sala era ideal para tais experimentos, e contava com uma dimensão de mais ou menos $15 m^2$, além da presença de cadeiras e uma janela, na qual durante os experimentos teve a preocupação de isola-la ao máximo, para que não houvesse interferências externas no processo de análise. (ver Fig. 16).

Figura 16 - Sala de realização dos experimentos.



Fonte: (AUTOR, 2019).

As comparações entre os dois experimentos foram feitas de maneira semelhantes, ou seja, mesmo sabendo que os dados coletados poderiam sofrer alterações devido aos instrumentos de medição e ao método de cálculo do COP não ser ideal, o fato das duas

configurações serem observadas na mesma situação, faz com que a padronização do experimento tenha resultados confiáveis.

A bancada foi posta exatamente na porta da sala com a unidade evaporadora voltada para dentro da sala e o restante (unidade condensadora, o compressor e as válvulas de expansão) do lado de fora da sala (ver Fig. 17). Foi preciso preencher com isopor toda a área da porta que apresentava saídas, para isolar do ambiente externo.

Figura 17 - Disposição da bancada de refrigeração na sala de experimentos.

(A) Evaporador; (B) Condensador, Compressor e Dispositivo de Expansão.



(A)

(B)

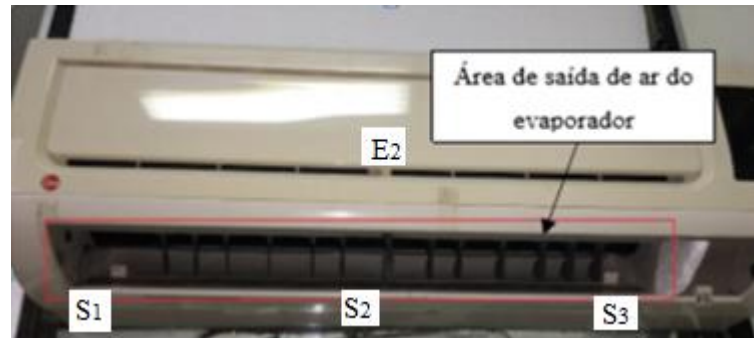
Fonte: (AUTOR, 2019).

Depois de toda essa parte de posicionamento da bancada, pode-se dar início de fato, aos experimentos.

Os testes da primeira e da segunda configuração foram realizados no dia 20 de outubro de 2017, sendo o primeiro horário de 10h20min às 10h50min e o segundo de 11h00min às 11h30min.

Os pontos de entrada e saída, onde foram medidos os parâmetros como velocidade do ar que escoava pelo evaporador e temperaturas do mesmo podem ser vistos na Figura 18, na qual as temperaturas de entrada e saída foram mensuradas em E_2 e S_2 respectivamente e as velocidades em S_1 , S_2 e S_3 .

Figura 18 - Área definida de saída de ar do evaporador.



Fonte: (AUTOR, 2019).

Experimento 1

O primeiro experimento se caracterizou por ter o sistema trabalhando de maneira convencional, no qual o tubo capilar da linha líquido apresenta-se de maneira livre sem a troca de calor com a tubulação da linha de sucção (ver Fig.19).

Figura 19 - Configuração original do sistema de refrigeração.



Fonte: (AUTOR, 2019).

O aparelho foi ligado e um tempo padrão de 30 minutos de teste foi estabelecido para que a coleta de dados fosse realizada. Tudo ocorreu de maneira tranquila e todos os dados necessários foram coletados para que se pudesse calcular o COP do sistema em estudo.

Experimento 2

Já no segundo experimento foi acionada uma válvula de serviço que fazia o fluido percorrer um caminho diferente do primeiro experimento, ou seja, por outro dispositivo de expansão e em seguida por um tubo capilar de linha líquido totalmente envolvido na tubulação de linha de sucção, tendo a finalidade de trocar calor com a mesma (ver Fig. 20). Como dito anteriormente, para a realização desse teste, foi necessário apenas o desligamento do aparelho e em seguida o acionamento da válvula de serviço para que houvesse o redirecionamento do fluido de trabalho para a segunda configuração.

Figura 20 - Configuração modificada do sistema de refrigeração.



Fonte: (AUTOR, 2019).

Os passos seguintes desse experimento foram realizados de maneira semelhante ao do experimento anterior. Mesma disposição da sala, mesmos instrumentos de medição, mesmo

tempo de teste, número de testes, quantidade de dados coletados e método de cálculo do COP do sistema.

3.4 Equipamentos utilizados

A seguir serão apresentados todos os instrumentos utilizados nos testes e as suas especificações.

As medições de temperatura dos pontos analisados foram feitas através de um Termômetro digital Penta III (ver Fig. 21) com cinco pontos de leitura distintos, faixa de leitura entra -50 e 105 graus Celsius e temperatura de operação entre 0 a 50 graus Celsius.

Figura 21 - Termômetro digital Penta III.



Fonte: (AUTOR, 2019).

Também foi necessário o uso de um termo higrômetro mth-1380 (ver Fig. 22) da marca Minipa com tempo de resposta para umidade de 75 segundos e para temperatura de 40 segundos, ambos com fluxo de ar lento, e ambiente de operação com temperaturas entre zero e cinquenta graus Celsius.

Figura 22 - Termo higrômetro.



Fonte: (AUTOR, 2019).

Para medição da velocidade de saída do ar do evaporador foi necessário um anemômetro (ver Fig. 24) da marca Lutron com faixa de medição de velocidade entre 0.4 e 30 metros por segundo.

Figura 23 - Anemômetro.



Fonte: (AUTOR, 2019).

Por fim, para encontrarmos a potência elétrica do compressor do ar condicionado foi utilizado um analisador de gás de energia 3197 (ver Fig. 24) da Hioki com faixa de medição de 600V em AC, 50 mA a 5.000kA, dependendo do sensor de corrente em uso e 300W a 9MW.

Figura 24 - Analisador de energia.



Fonte: (AUTOR, 2019).

4 RESULTADOS

A Tabela 1 mostra os parâmetros e valores encontrados após o teste realizado Configuração 1 (sem o trocador de calor) com a configuração original do sistema.

As velocidades do ar foram retiradas pela média das velocidades mensurada nos pontos especificados na figura 19.

As temperaturas de entrada e saída do evaporador foram consideradas como as temperaturas de entrada e saída do ar.

O calor específico do ar a pressão constante é uma constante dado pelo valor de 1004 J/ Kg k.

Tabela 1 - Dados coletados durante teste 1.

CONFIGURAÇÃO 1		
Parâmetros	Valor	Unidade
T de entrada do ar do evaporador	26	°C
T de saída do ar do evaporador	16,2	°C
Velocidade de saída do ar - 1	2,1	m/s
Velocidade de saída do ar - 2	4,2	m/s
Velocidade de saída do ar - 3	2,2	m/s
Densidade do ar	1,23	kg/m ³
Área de saída do ar	0,03192	m ²
Potência elétrica do compressor	741,8	W

Fonte: (AUTOR, 2019).

Com os valores acima, o passo seguinte foi realizar o cálculo simples de dois parâmetros importantes que deveriam ser encontrados para que pudesse utilizar a Equação (2) do Tópico 2.6. A variação de temperatura, que é obtida através da diferença entre a temperatura da saída e a temperatura de entrada do evaporador. E o segundo parâmetro a ser encontrado é a vazão mássica de ar calculada através da Equação (3) do Tópico 2.6:

Para encontrar a vazão mássica, foi preciso fazer o cálculo da velocidade média do ar que é a média simples das três velocidades coletadas em pontos diferentes do sistema. A área da entrada do evaporador foi calculada anteriormente.

A Taxa de calor retirada do ar foi calculada com as informações obtidas, e chegou-se a 1094,52 W.

O Coeficiente de Performance da primeira configuração foi então calculado com a Equação (1), sendo 1,48.

O teste, no qual apresenta a Configuração 2 (com o trocador de calor) foi realizado da mesma maneira que o teste para a Configuração 1, já que o objetivo do estudo é exatamente comparar o rendimento com o dispositivo de expansão em configurações diferentes, mas nas mesmas condições. Foi dado o mesmo tempo para que o sistema atuasse no ambiente e mais uma vez os dados foram coletados. Abaixo, segue Tabela 2 com esses dados e todo o cálculo necessário para obtenção do COP.

Tabela 2 - Dados coletados durante teste 2

CONFIGURAÇÃO 2		
Parâmetros	Valor	Unidade
T de entrada do ar do evaporador	25,5	°C
T de saída do ar do evaporador	15,3	°C
Velocidade de saída do ar - 1	2,3	m/s
Velocidade de saída do ar - 2	4,1	m/s
Velocidade de saída do ar - 3	2,2	m/s
Densidade do ar	1,23	kg/m ³
Área de saída do ar	0,03192	m ²
Potência elétrica do compressor	703,9	W

Fonte: (AUTOR, 2019).

Usando a mesma metodologia das medições e cálculos que da configuração 1 , a configuração 2 (com o trocador de calor) apresentou uma a taxa de calor retirada do ar de 1152,6 W, resultando em um COP de 1,64.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Desenvolveu-se neste trabalho uma análise termodinâmica experimental de um ciclo de compressão a vapor utilizando R-22 como fluido refrigerante. O objetivo principal foi a comparação entre um ciclo convencional, ou seja, com nenhuma modificação estrutural e posicional dos seus componentes e um ciclo não convencional no qual o tubo capilar da válvula de expansão troca calor com o tubo da saída do evaporador (trocador linha de sucção/linha de líquido). Para alcançar este objetivo foi ensaiado um aparelho de Ar Condicionado Split de condensação a ar.

Após a realização de todos os testes, foi possível comparar os Coeficientes de Performance das duas configurações, verificou-se a partir dos resultados encontrados que houve uma melhora quando aplicou-se a segunda configuração, ou seja, quando o tubo capilar da válvula de expansão trocando calor com o tubulação de saída do evaporador. Essa melhora foi significativa, pois ao comparar os COP's das duas situações, percebeu-se um aumento de 9,9 % do COP da segunda configuração (com o trocador de calor) em relação ao da primeira (original) o que acabou validando a teoria mencionada no tópico 2.7 deste trabalho da elevação do COP, pelo fato da presença do trocador de calor proporcionar um maior sub-resfriamento do refrigerante que entra no dispositivo de expansão, bem como uma evaporação total do líquido residual presente na aspiração antes de chegar ao compressor.

6 REFERÊNCIAS

- ASHRAE, American Society of Heating Refrigeration and Air-conditioning, Fundamentals Handbook, Atlanta, 2001.
- CREDER, H. Instalações de Ar Condicionado, LTC. 1997.
- Disponível em: < <http://www.epe.gov.br> > . Acesso em 5 de julho de 2019.
- Disponível em: < <http://www.springer.com.br> > Acesso em 5 de julho de 2019.
- Disponível em: < <https://www.ebah.com.br/content/ABAAABG64AL/2000-refrigeracao> > . Acesso em 5 de julho de 2019.
- FROTA, A. B., & SCHIFFER, S. R. Manual de Conforto Térmico. São Paulo: Studio Nobel, 2003.
- INCROPERA, Frank P. et al. Introduction to Heat Transfer. 6. ed. Wiley, 2011.
- Instalação e manutenção de condicionador de ar split system. Apostila elaborada pela THERMAL Cursos Profissionalizantes, 2015.
- MATOS, Rudmar S. Refrigeração. Curso de Engenharia Mecânica. Setor de tecnologia da Universidade Federal do Paraná.
- SPRINGER CARRIER.(s.d.).
- STOECKER, W. F., & JONES, J. W. Refrigeração e Ar Condicionado. Ed. McGraw-Hill, 1985.
- TEBCHIRANI, TÁRIK LINHARES Análise Termodinâmica Experimental de um Sistema de Ar Condicionado Split utilizando um Trocador de Calor Linha de Sucção/Linha de Líquido, 2011.
- VARGAS, L. C. P.; Análise teórico-experimental do coeficiente de performance (COP) de um sistema de refrigeração por jato-compressão. Natal, 2010. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- WYLEN, G. V., SONNTAG, R., & BORGNAKKE, C. Fundamentos da Termodinâmica Clássica. Edgard Blücher LTD, 2001.