

# Reaproveitamento de Energia em Sistemas Convencionais de Ar Condicionado II: Análise Comportamental de Diferentes Fluidos Refrigerantes

Huesllyn Jankovski<sup>1</sup>, Herbert Stuy<sup>1</sup>, Tiago Senem<sup>1</sup>, Thiago Dai Campi<sup>1</sup> Guilherme Stiegler<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Universidade da Região de Joinville (UNIVILLE),  
CEP 89.288-385 - São Bento do Sul, SC - Brasil.

[herbert.stuy@univille.edu.br](mailto:herbert.stuy@univille.edu.br), [huesllynjankovski@univille.edu.br](mailto:huesllynjankovski@univille.edu.br),  
[tiago.senem@univille.edu.br](mailto:tiago.senem@univille.edu.br), [thiagocampi@univille.edu.br](mailto:thiagocampi@univille.edu.br),  
[guilherme.stiegler@univille.edu.br](mailto:guilherme.stiegler@univille.edu.br)

**Resumo.** *O estudo da eficácia, e aplicabilidade de um fluido refrigerante, torna-se cada vez mais necessário com avanço da tecnologia em sistemas de refrigeração. O artigo proposto busca analisar o comportamento de fluidos refrigerantes em um ciclo de refrigeração dentro de um sistema de ar condicionado. Obtendo resultados em diagramas pressão-entalpia, esses diagramas são únicos para cada fluido, o que permite projetar condições teóricas de pressão, temperatura, eficiência, e capacidade de refrigeração no ciclo. Tais condições podem ser mensuradas com base nas propriedades físicas do fluido com o auxílio de análises matemáticas. Com base nas informações coletadas busca-se aplicar o fluido que melhor desempenha a função necessária em um projeto de ar condicionado. Após todas as análises, é possível compará-las com resultados obtidos experimentalmente, comprovando a eficácia do estudo.*

**Palavras Chave:** Reaproveitamento de Energia, Fluido Refrigerante, Ar-Condicionado.

## Introdução

A análise comportamental do fluido refrigerante em um sistema é de grande importância em aplicações nos processos termodinâmicos e em diferentes componentes do sistema de refrigeração. O grande desafio de hoje é propor novos desenvolvimentos para as próximas gerações de refrigerantes de forma sustentável. Segundo (MOLINA *et al.* 2008) refrigerantes com potencial de destruição de ozônio e auto potencial de aquecimento global foram proibidos ou sob permissão de tempo sob os protocolos de Montreal (1987) e Kyoto (1997).

Mediante a esta situação, para a modernização, estão sendo fabricados vários refrigerantes naturais e sintéticos em todo o mundo. A refrigeração consiste em retirar calor de um corpo para transferir para o meio ou outro elemento a uma temperatura maior. É aplicada para realizar conforto térmico, processamento, armazenamento, conservação de alimentos e climatização de ambientes industriais, residenciais (SILVA *et al.*, 2014).

Este trabalho tem por objetivo explorar o comportamento dos fluidos refrigerantes usados na refrigeração por compressão, dentre eles, hidrocarbonetos como R22, R12, R134A, R502, R404A e R507. Foi realizada uma análise comportamental dos fluidos em uma mesma aplicação com o intuito classifica-los conforme seu desempenho e rendimento no ciclo de refrigeração. Diante dos resultados, dos testes um estudo sobre a aplicabilidade dos fluidos fez-se necessário, para a selecionar qual é mais viável, esse

estudo coloca em pauta a Segurança e sustentabilidade dos fluidos. O fluido que teve o melhor desempenho para o sistema foi o R134A, o qual atendeu as condições propostas na análise e sua aplicabilidade.

### **Equações de Estado**

Empiricamente sabemos que dois corpos com diferentes temperaturas e a mesma massa tendem a entrar em equilíbrio térmico, levando suas temperaturas a se igualarem. Quando são misturadas diferentes massas a temperatura varia inversamente com as massas, sendo assim o corpo com maior massa tem menos variação em sua temperatura, e vice-versa. A energia térmica absorvida pelo corpo depende das características do material que o compõe, pode-se definir energia na forma de calor necessário para variar a temperatura de um corpo.

$$Q = mc_p \Delta T \quad (1)$$

Onde  $Q$  é a quantidade de calor (J),  $m$  é massa total da substância (kg),  $c_p$  é calor específico da substância ( $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) e  $\Delta T$  é variação de temperatura (K). Verificando a equação, conhecendo a massa, o calor específico e a variação de temperatura desejada, conseguimos calcular o calor necessário para efetuar essa mudança.

### **Primeira Lei da Termodinâmica**

Habitualmente utiliza-se o conceito de gás Ideal para representar várias determinações termodinâmicas, esse conceito considera um gás que não apresenta interação entre suas moléculas, assim como a ausência de choques elásticos entre as mesmas. Sabe-se que suas propriedades de pressão, volume, e temperatura obedecem a equação dos gases ideais. Onde  $P$  é a pressão (Pa),  $V$  é o volume da substância ( $\text{m}^3$ ),  $n$  é número de mols da substância (mols), e  $R$  é a constante universal dos gases ( $\text{atm.L/mol.K}$ ).

$$PV = nRT \quad (3)$$

Sabe – se que um gás real tem um comportamento muito próximo ao de um gás ideal, a equação de estado referente a um gás ideal é encontrada a partir da combinação das equações de Charles e Boyle.

$$\frac{PV}{T} = \frac{PV}{T} \quad (4)$$

A 1ª lei da termodinâmica denomina  $q$  a variação da energia interna de um sistema termodinâmico fechado é igual à soma da energia térmica fornecida ao sistema e o trabalho realizado no sistema.

A entalpia é uma das consideradas mais fundamentais em sistemas de refrigeração visto que, o sistema de refrigeração tem elementos que realizam um processo isobárico reversível e uma das características da entalpia é que neste processo a variação de entalpia é igual à quantidade de calor que é transferida, apesar de poder não ser correto para todas as situações, é adequada em cerca de 99% das situações encontradas em refrigeração. Onde  $H$  é Entalpia, ( $\text{KJ/mol}$ ),  $U$  é a energia interna do sistema (J).

$$H = U + P \quad (5)$$

## Entropia

A entropia abrange os conceitos da 2ª lei de termodinâmico, seu postulado refere-se a duas importantes consequências causadas devido ao isolamento do corpo termodinamicamente causando ao longo do tempo um aumento da entropia no sistema que gera um alcance da entalpia máxima do mesmo.

$$ds = \frac{dQ}{T} \quad (6)$$

Com a remoção do calor no sistema a entropia do mesmo diminui

$$\Delta Q = T(S1 - S2) \quad (7)$$

Sistemas com entropia constante chamado de processo isentrópico, onde ocorre uma transformação adiabática reversível. Onde  $S$  é a Entropia (J/K).

## Metodologia

O projeto surgiu da necessidade de desenvolver um a máquina com sistema refrigerante onde possa ser analisado o comportamento dos fluidos nas condições de pressão, temperatura e volume com o objetivo de comparar a eficiência de cada resultando na escolha do fluido mais eficiente.

## Etapas de Construção

Para melhor visualização das etapas do projeto, desenvolveu-se o fluxograma, detalhando cada etapa do projeto.

Abaixo segue a esquematização das etapas:

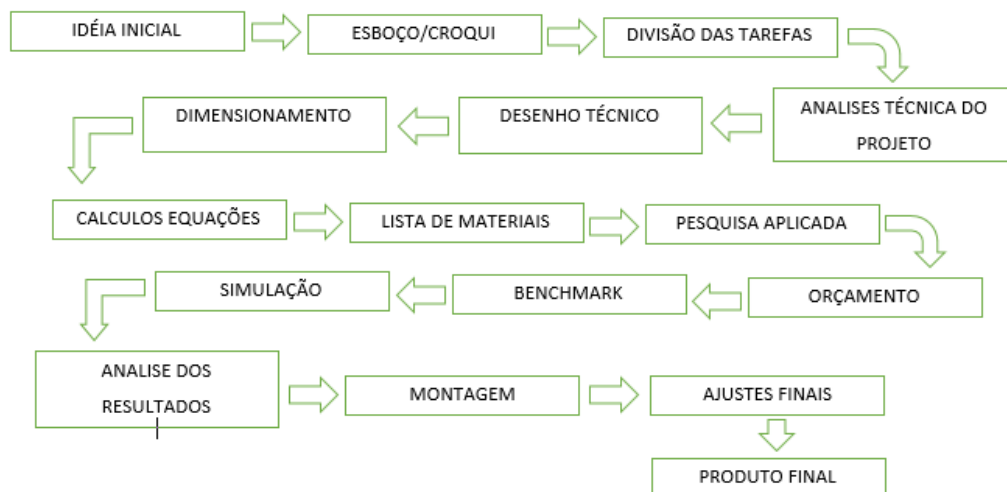


Figura 1. Fluxograma de construção. (Fonte Primária, 2019).

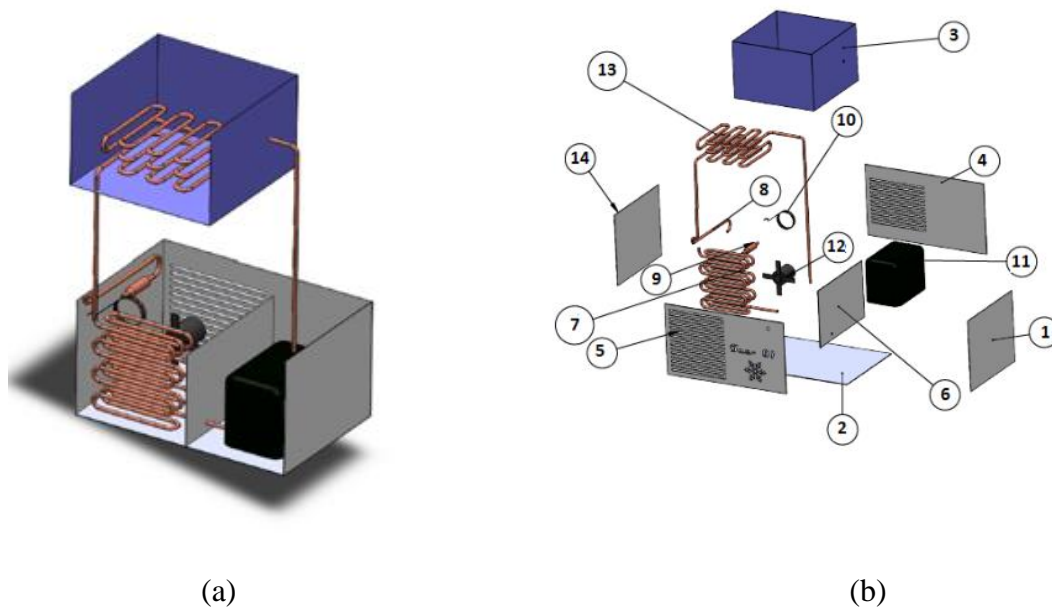
Conforme visto na Figura 1, a partir da análise mais profunda do projeto, foram propostas sugestões através brainstorming esta etapa foi fundamental para esboço da máquina. As divisões de tarefas foram desenvolvidas na parte técnica que envolveu o dimensionamento da máquina, o desenho técnico, montagem e a pesquisa aplicada que trabalhou em cálculos, listas de materiais, orçamentos, benchmark.

Durante cada etapa foi fundamental ter um plano de comunicação, cada etapa foi necessária avaliar os procedimentos adotados e a análise dos resultados buscando minimizar erros das próximas etapas. Para montagem do sistema foram necessários ajustes nos desenhos técnicos adequação dos itens no orçamento para atender o propósito que foi inicial criar um equipamento com condições de avaliar o comportamento dos fluidos refrigerantes.

Usualmente a representação das propriedades termodinâmicas de uma substância é representada através de diagramas, onde as coordenadas representam grandezas físicas, tais como entropia, volume, entalpia, pressão e temperatura.

### Detalhamento do Projeto em CAD

Para o detalhamento do projeto foi utilizado o programa CAD, sendo a Figura (2.a) a vista do projeto por completo mostrando os componentes que ela possui em seu devido local. Já na Figura (2.b) temos a vista explodida do projeto tendo assim a melhor visualização de cada componente.



**Figura 2. Projeto do ar condicionado com reaproveitamento de energia. a) montagem. b) vista explodida. (Fonte Primária, 2019).**

A Figura 2.b apresenta o projeto numa vista explodida, demonstrando todos seus componentes apresentados pela numeração e descrição conforme tabela 1.

**Tabela 1. Lista dos componentes do projeto de ar condicionado.**

Número	Descrição	Número	Descrição
1	Lateral Direita da Caixa	8	Tubulação
2	Fundo da Caixa	9	Filtro de Secagem
3	Caixa de água	10	Válvula de Expansão
4	Traseira da Caixa	11	Compressor
5	Frente da Caixa	12	Ventilador
6	Divisória	13	Caixa Condensadora
7	Caixa Evaporadora	14	Lateral Esquerda da Caixa

(Fonte Primária, 2019).

A Tabela 1 possui o respectivo nome de cada componente utilizado para a montagem do projeto.

### **Materiais**

A tabela 2 possui o nome dos elementos utilizados para a realização do projeto e a seguinte função para cada.

**Tabela 2. Lista dos componentes do projeto de ar condicionado.**

<b>Materiais</b>	<b>Função</b>
Chapa metálica	Construção da caixa
Tubo de cobre 8 mm	Ligação de componentes
Tubo de cobre 3 mm	Fabricação válvula de expansão
Caixa evaporadora	Transmissão do ar gelado ao ambiente
Compressor	Circulação do fluido no sistema
Motor Elétrico com ventoinha	Arrefecimento do sistema
Chave de Contato	Ligar o ar condicionado
Termômetro	Medição da temperatura
Bomba de Água	Troca de Água
Chapa Acrílica	Criação de visores
Fio Elétrico	Condutores Elétricos
Parafusos	Fixação de componentes
Tintas	Acabamento

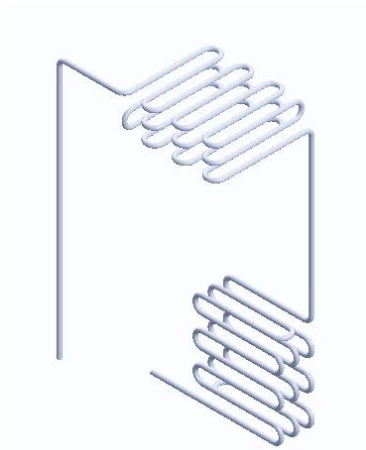
(Fonte Primária, 2019)

### **Sistema de Tubulação do Fluido Refrigerante**

Como a proposta do artigo é analisar o comportamento de diferentes fluidos dentro de um sistema de refrigeração, foram selecionados seis diferentes tipos de fluidos refrigerantes comumente utilizados em tais sistemas, dentre eles, R12, R22, R-404, R-134A, R502, e R507.

Um ciclo de refrigeração é composto por um compressor, dois permutadores de calor, chamados de Evaporador e Condensador, e uma válvula de expansão termostática. O artigo não tem foco em demonstrar o funcionamento de cada componente do sistema, apenas analisar de forma geral o comportamento de diferentes fluidos refrigerantes dentro do ciclo.

De forma geral o fluido é comprimido pelo compressor, o qual conseqüente eleva sua temperatura e pressão respectivamente, então o fluido caminha em direção ao, condensador que muda a fase do gás, transformando – o em líquido, após passa pela válvula de expansão na qual diminui drasticamente sua pressão e conseqüentemente sua temperatura, assim voltando ao evaporador que transforma a fase de líquido para vapor, e dando reinício ao ciclo. Separadamente foi possível representar apenas o circuito da tubulação, pelo qual o circuito vai transitar, o circuito é representado pela Figura 3.



**Figura 3. Circuito de tubulação do sistema de ar condicionado. (Fonte Primária, 2019).**

A tubulação consiste em um diâmetro interno de 4 milímetros, e um diâmetro externo de 6 milímetros, e seu material é Cobre. Para as simulações dos fluidos, alguns dados do sistema foram pré-definidos, e levados como constantes para os diferentes fluidos, dentre eles estão, a vazão do compressor utilizado, e a pressão de trabalho do mesmo. A temperatura do trocador de calor acoplado ao Condensador, e a pressão de saída do fluido da válvula de expansão. Com esses dados definidos é possível realizar uma análise comportamental e assim escolher o fluido ideal para o sistema analisado.

### **Análise dos Fluidos Refrigerantes**

Hoje existem vários tipos de fluidos refrigerantes comercializados, utilizados para as mais diversas aplicações, eles podem ser classificados como, fluidos sintéticos, amônia, dióxido de carbono e hidrocarbonetos, estes requerem cuidados especiais durante sua manutenção, já que se tratam de substâncias inflamáveis.

Entre os mais utilizados na refrigeração de pequeno porte como em geladeiras domésticas e ar-condicionado estão o R-134a, R-404A, e hidrocarbonetos como R-600a, e R290. Em refrigerações de médio e grande porte destacam-se os refrigerantes R-404A, R-134a, e o R-410A. Pode-se destacar o fluido R-134a, como um fluido de grande aplicabilidade já que o mesmo se destaca na refrigeração de pequeno, médio e grande porte. As propriedades dos diferentes fluidos analisados, foram fornecidas por (GAS SERVEI, 2019).

### **Resultados e Discussões**

Inicialmente é necessário realizar uma análise prévia do comportamento termodinâmico do sistema, os conceitos da termodinâmica apontam três propriedades básicas para qualquer substância, sendo elas pressão, temperatura e volume. Cada material tem comportamentos de fase específicos para cada situação que suas propriedades variam, e segundo (ALAM *et al.*, 2019) As propriedades termofísicas dos quatro refrigerantes, como a densidade, a energia potencial interna e o volume das células dos sistemas moleculares durante o processo de condensação sofrem plena variação entre os fluidos.

Partindo do ponto de alta pressão do sistema, no qual o fluido refrigerante passa pelo compressor, tendo sua pressão elevada. Dentro do projeto, a pressão de saída do

compressor se mantem a mesma independentemente do tipo de fluido que esta transitando pelo circuito. (Tello-Oquendo *et al.*, 2019) apresenta que diferentes modelos de compressores apresentam desempenhos distintos conforme a variação na temperatura de descarga. O compressor utilizado no projeto tem uma pressão de trabalho constante em 230psi, ou 1586kPa. Dentro da termodinâmica existe uma relação entre a temperatura, e a fase que a substância se encontra. Quando a temperatura do sistema for menor que a temperatura de saturação da substância temos o estado de Líquido Comprimido, já se a temperatura de saturação for maior que a temperatura do sistema a substância se encontra no estado de Vapor Superaquecido, e se ambas forem iguais, encontra-se o estado de vapor saturado.

Tendo em vista tal princípio é possível prever a fase que todos os fluidos analisados se encontram após passar pelo compressor essa análise é possível verificar na Tabela 3.

**Tabela 3. Fase do fluido em Alta pressão**

<b>Fluido</b>	<b>Temperatura de Saturação</b>	<b>Estado</b>
R12	61,669482 °C	Vapor superaquecido
R22	41,355344 °C	Vapor superaquecido
R134a	57,50 °C	Vapor superaquecido
R404	56,54 °C	Líquido Comprimido
R502	37,709497 °C	Vapor superaquecido
R507	33,160493 °C	Vapor superaquecido

(Fonte Primária, 2019).

Com as propriedades de cada substância, e a pressão de trabalho do compressor, pode-se definir a temperatura que cada fluido tem ao sair do compressor. Essa relação é possível observar na tabela 4.

**Tabela 4. Temperatura em Alta pressão**

<b>Fluido</b>	<b>Temperatura de Saída</b>	<b>Estado</b>
R12	64,909090 °C	Vapor superaquecido
R22	43,94827 °C	Vapor superaquecido
R134a	60,181819 °C	Vapor superaquecido
R404	36,633333 °C	Líquido Comprimido
R502	40,333333 °C	Vapor superaquecido
R507	35,666666 °C	Vapor superaquecido

(Fonte Primária, 2019).

É possível perceber que cinco dos fluidos a serem analisados tem o mesmo comportamento de estado ao sair do compressor, no entanto é possível notar que o R404 não atinge uma elevada temperatura no momento em que sai do compressor, devido a mesma ultrapassar a temperatura crítica do fluido, observa-se uma grande disparidade no quesito temperatura, isso leva em consideração as propriedades de cada substancia analisada, para (RAABE 2018), a evolução no desenvolvimento de fluidos refrigerantes tem direta ligação com o avanço de simulações moleculares e suas propriedades. Em uma

mesma pressão o fluido R12 tem uma temperatura que é praticamente o dobro da temperatura alcançada pelo R507, essa diferença também é possível observar quando falamos da temperatura de saturação, tabela 3. Com base nas análises o R404 é descartado do projeto como um fluido viável, pelo motivo do mesmo não atingir a temperatura de saturação

A temperatura de saturação é atingida no sistema pela troca de calor do fluido com o ambiente externo, no projeto em questão essa troca é forçada por um recipiente com água a temperatura ambiente, (aproximadamente 23°C) a qual aumenta a troca de calor entre as paredes da tubulação e o ambiente externo. Após cada fluido atingir a temperatura de saturação, os mesmos sofrem uma queda de pressão forçada pela válvula de expansão reduzindo sua temperatura a pontos extremamente baixos, essa pressão se mantém constante em 147,1 kPA. Sendo assim podemos prever a temperatura que cada fluido atinge, após essa queda de pressão. Tal análise é apresentada na tabela 5.

**Tabela 5. Temperatura em baixa pressão**

<b>Fluido</b>	<b>Temperatura de Saída</b>	
R12	-6,38745750 °C	Líquido Comprimido
R22	-19,7824745 °C	Líquido Comprimido
R134a	-4,47496357 °C	Líquido Comprimido
R404	-25,1482406 °C	Líquido Comprimido
R502	-24,1962585 °C	Líquido Comprimido
R507	-26,3321064 °C	Líquido Comprimido

(Fonte Primária, 2019)

Pode-se observar que 4 fluidos apresentam temperaturas extremamente baixas, as quais podem ser utilizadas para uma refrigeração de médio a grande porte, como o objetivo do projeto é a fabricação de um ar condicionado de pequeno porte, consideramos esses fluidos como inviáveis ao projeto. Destacamos o R12, e o R134a, como os principais fluidos a serem utilizados. Sendo que para (Zhao *et al.*, 2017) o R134, se mostra mais eficiente em comparação a outros fluidos utilizados na evaporação de filmes na troca de calor em ar condicionados.

Após todas as análises comportamentais para cada fluido é possível selecionar aquele que apresenta as melhores condições de refrigeração e aplicar de maneira prática o fluido selecionado, e assim comprar resultados matemáticos, com os resultados reais. O fluido que apresentou a melhor capacidade de refrigeração para o sistema de ar condicionado em questão, foi o R134-a, tendo em vista que o mesmo atende todas as condições de pressão propostas pelo compressor e válvula de expansão, e que o compressor foi fabricado para suportar o fluido R134-a, notou-se que o fluido R12, esta em desuso na indústria, e sua comercialização não é assim tão comum como o R134-a. e utilizar os outros fluidos propostos, não desempenhariam a mesma capacidade que o compressor. Com o protótipo fabricado. aplicou-se o fluido no sistema, e assim foi possível obter valores experimentais, apresentados na tabela 6.

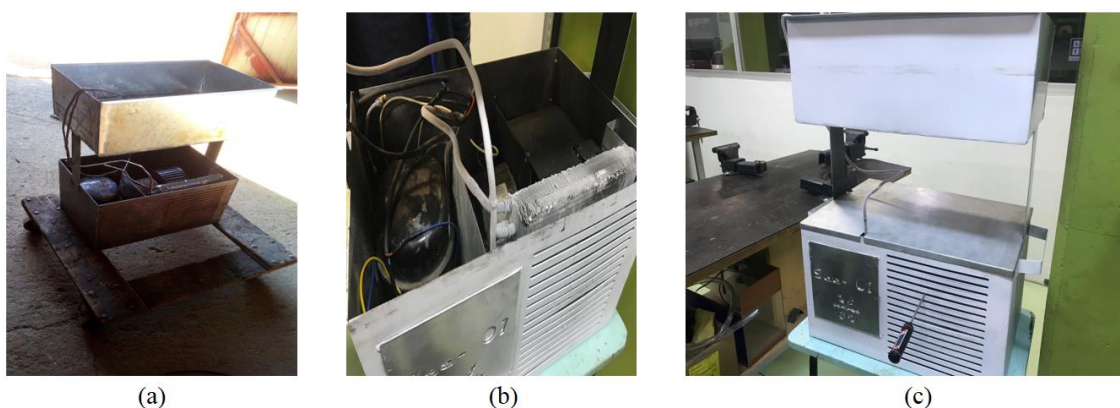


**Tabela 6. Comparação Experimento e Análise matemática**

<b>Experimental</b>		<b>Análises</b>	
Temperatura em Alta Pressão	63,3 °C	Temperatura em Alta Pressão	60,181819 °C
Temperatura em Baixa Pressão	-13,9 °C	Temperatura em Baixa Pressão	-4,47496357 °C

(Fonte Primária, 2019).

Observa-se na Figura 4.a a temperatura ambiente da água marcada pelo termômetro digital em 23,3°C, já na figura 4.b a temperatura do fluido em baixa pressão, marcada pelo termômetro digital em -13,9°C.



**Figura 4. Ar condicionado com reaproveitamento de energia. a) Montagem do Reaproveitamento da energia do ar condicionado. b) Sistema de compressão, evaporação e condensação. c) Projeto pronto. (Fonte Primária, 2019).**

Com os dispositivos trocadores de calor instalados, fez-se a ligação das

## **Conclusão**

Ao término deste projeto, conclui-se que foram superadas as expectativas e objetivos inicialmente proposto no estudo da eficácia e aplicabilidade de um fluido refrigerante, a comparação dos fluidos nas tabelas e teste prático no projeto desenvolvido nos possibilitou a concluir que o fluido R134a é mais eficiente para o equipamento desenvolvido perante ao demais fluidos.

O estudo e a elaboração deste projeto foram de grande benefício, pois trouxe maior conhecimento real tanto sobre a possibilidade dos fluidos que podem ser aplicadas no equipamento de acordo com o resultado pré-estabelecido inicialmente, além de proporcionar um conhecimento amplo como, dimensionamentos mecânicos, estudos dos fluidos e também na área de custos e planejamentos que hoje é fundamental para o sucesso do projeto.

Devido a diversidade dos desafios encontrados houveram muitos contratemplos durante o desenvolvimento do trabalho, tanto no estudo de novos componentes utilizados no projeto, como na falta de conhecimento de determinados assuntos, mas utilizando-se do empenho e das diferentes experiências profissionais que cada integrante da equipe possuía esta etapa foi superada junto com o teste em laboratório.

Para melhores resultado a primeira melhoria está em fazer simulações no software trabalhando nas pressões, temperatura e acompanhando de forma mais precisa

o estado que o fluido se encontra, o estudo da viabilidade econômica dos fluidos também é uma sugestão para a melhoria futura do artigo.

## Referências

Molina M. J., & Rowland F. S., Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine. *Int. J. Refrigeration* (2008), 1123-1133.

Werth S., K. Stöbener, P. Klein, K.-H. Küfer, M. Horsch, H. Hasse. *Molecular modelling*.

Yu G., Guogeng H., Peidong C., Zhao X., Dehua Cai Energy and exergy analysis of an air-cooled waste heat-driven absorption refrigeration cycle using R290/oil as working fluid, (2019).

Silva, J. C; Souza, G. J; Rocha, S. P. *Desenho técnico para refrigeração e climatização*. 1.ed. São José: [S.n.], (2014). 134p.

Raabe G., *Molecular simulation studies on refrigerants past – present – future*, *Fluid Phase Equilibria* vol. 485, 15 April 2019.

Borgnakke C., Sonntag R. E., *Fundamentos da Termodinâmica, Série Van Wylen*, 8° ed, Blucher, 2018.

Alam, M. S., & Jeong, J. H. (2019). Comparative molecular dynamics simulations of homogeneous condensation of refrigerants. *International Journal of Thermal Sciences*, 141, 187–198.

Tello-Oquendo F. M., Navarro-Peris E., & González-Maciá J. (2019). Comparison of the performance of a vapor-injection scroll compressor and a two-stage scroll compressor working with high pressure ratios. *Applied Thermal Engineering*.

Gas Servei, 2019, Acesso em: 07, de Julho de 2019, <[https://www.gas-servei.com/images/Dados\\_tecnicos\\_R507.pdf](https://www.gas-servei.com/images/Dados_tecnicos_R507.pdf)>

Gas Servei, 2019, Acesso em: 07, de Julho de 2019, < [https://www.gas-servei.com/images/Dados\\_tecnicos\\_R134a.pdf](https://www.gas-servei.com/images/Dados_tecnicos_R134a.pdf)>

Gas Servei, 2019, Acesso em: 07, de Julho de 2019, < [https://www.gas-servei.com/images/Dados\\_tecnicos\\_R404A.pdf](https://www.gas-servei.com/images/Dados_tecnicos_R404A.pdf)>