

CENTRO UNIVERSITÁRIO ALVES FARIA (UNIALFA)
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Neuber Figueiredo Costa

ESTUDO TERMODINÂMICO DE UM TUBO DE VÓRTICES

GOIÂNIA
JUNHO DE 2019

CENTRO UNIVERSITÁRIO ALVES FARIA (UNIALFA)
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Neuber Figueiredo Costa

ESTUDO TERMODINÂMICO DE UM TUBO DE VÓRTICES

Trabalho de conclusão de curso apresentado
para conclusão do Curso de Engenharia
Mecânica do Centro Universitário Alves Faria,
sob a orientação do Prof. Dr. Rodrigo Lisita
Ribera

GOIÂNIA
JULHO DE 2019

CENTRO UNIVERSITÁRIO ALVES FARIA (UNIALFA)
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Neuber Figueiredo Costa

ESTUDO TERMODINÂMICO DE UM TUBO DE VÓRTICES

AVALIADORES:

Prof. Dr. Rodrigo Lisita Ribera – UNIALFA
(Orientador)

Prof. Ma. Evelyn de Jesus Fernandes – UNIALFA

Prof. Me. Iúry Vinicius Winckler Colatto – UNIALFA

GOIÂNIA
JULHO DE 2019

Dedico este trabalho à minha mãe, que sempre acreditou no meu sucesso e no decorrer desta caminhada foi o meu suporte, que sempre está ao meu lado nos momentos de maiores dificuldades.

*Aos meus professores, por todo o empenho e dedicação ao longo dos 5 anos que
passamos juntos.*

*A todos os colegas que me acompanharam nessa caminhada e que todos nós sejamos
profissionais de sucesso.*

RESUMO

FIGUEIREDO, Neuber Figueiredo Costa. **Estudo termodinâmico de um tubo de vórtices**. Projeto de pesquisa. 48 f. - Graduação em Engenharia Mecânica. Goiânia, 2018.

O tubo de vórtice pode ser uma alternativa aos métodos tradicionais de climatização considerados grandes poluidores, consumidores de energia elétrica e de custos elevados tanto de aquisição quanto de manutenção. O tubo de vórtice também conhecido como “Tubo de Ranque-Hilsch” é um dispositivo mecânico sem partes móveis e de fácil confecção capaz de separar o ar comprimido em duas partes uma fria e uma quente, a fria é o principal objeto de estudo deste trabalho pois em relação ao ar comprimido que é admitido pelos orifícios de entrada o tubo pode gerar um decréscimo de temperatura de dezenas de graus. Esse trabalho tem como objetivo estudar as teorias que descrevem os efeitos causados pelo tubo, como também promover testes em um protótipo alternando as condições para que se possa ter uma dimensão das capacidades térmicas do tubo, utilizando de uma metodologia experimental para confeccionar uma modelagem matemática que expressa em números os limites do dispositivo.

PALAVRAS-CHAVE: Vórtice. Climatização. Tubo de Ranque-Hilsch .

ABSTRACT

FIGUEIREDO, Neuber Figueiredo Costa. **Thermodynamic study of a vortex tube.** Completion of course work. 48 f – Graduation in Mechanical Engineering. Goiânia, 2018.

The vortex tube can be an alternative to traditional methods of air conditioning considered large polluters, consumers of electricity and high costs of both acquisition and maintenance. The vortex tube also known as "Ranque-Hilsch Tube" is a mechanical device without moving parts and easy to make able to separate compressed air into two parts one cold and one hot, cold is the main object of study of this work because in relation to the compressed air that is admitted by the entrance orifices the tube can generate a decreasing temperature of tens of degrees. This work aims to study theories that describe the effects caused by the tube, as well as to promote tests in a prototype alternating the conditions so that one can have a dimension of the thermal capacities of the tube, using an experimental methodology to make a mathematical modeling that expressed in numbers the limits of the device.

KEYWORDS: Vortex. Air conditioning. Ranque-Hilsch Tube

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Variação de temperatura no tempo para pressão 6 bar, antes da correção.....	34
Gráfico 2 – Variação de temperatura no tempo para pressão 3 bar.....	35
Gráfico 3 – Variação de temperatura no tempo para pressão 4 bar.....	36
Gráfico 4 – Variação de temperatura no tempo para pressão 6 bar.....	37
Gráfico 5 – Variação de temperatura no tempo para pressão 6 bar, experimento de uma hora.....	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo tubo de vórtices contrafluxo.....	14
Figura 2 – Exemplo tubo de vórtices unifluxo.....	14
Figura 3 – Ilustração dos vórtices.....	15
Figura 4 – Tubo de Ranque.....	16
Figura 5 – Tubo de Hilsch.....	17
Figura 6 – Fluxo de processos de fabricação em geral.....	20
Figura 7 – Peças utilizadas no projeto de Bulchelt.....	21
Figura 8 – Tubo de Albuquerque (2017).....	22
Figura 9 – Tubo de Bulchelt (2016)	23
Figura 10 – Ciclo de refrigeração de Brayton.....	24
Figura 11 – Ciclo de refrigeração de Carnot.....	25
Figura 12 – Esquema simplificado de ar condicionado automotivo.....	26
Figura 13 – Desenho esquemático sistema de climatização.....	27
Figura 14 – Bancada do tubo de vórtices.....	31
Figura 15 – Compressor utilizado no experimento.....	32
Figura 16 – Termopar calibrado.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condições do ambiente.....	35
Tabela 2 – Temperatura a 3 bar.....	36
Tabela 3 – Temperatura a 4 bar.....	37
Tabela 4 – Temperatura a 6 bar.....	38
Tabela 5 – Temperatura a 6 bar, teste de uma hora.....	39
Tabela 6 – Resultado.....	43

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	11
1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
1.1 Tubo de vórtices.....	13
1.2 Projeto.....	15
1.2.1 Etapas de um projeto de engenharia	18
1.3 Fabricação de um tubo de vórtices	20
1.4 Modelagem	23
1.5 Exemplificação de um sistema tradicional de climatização	24
2 METODOLOGIA.....	28
3 DISCUSSÃO, ANÁLISE E AVALIAÇÃO DOS DADOS COLETADOS.....	31
3.1 Estudo de caso	31
3.2 Discussão do caso	40
3.2.1 Modelagem	40
3.2.2 Balanço de massa e energia	41
3.2.3 Capacidade de refrigeração.....	42
3.3 Resultados	43
CONCLUSÃO.....	44
REFERÊNCIAS	47

INTRODUÇÃO

Sistemas de climatização se tornam cada vez mais indispensáveis ao ser humano devido a temperaturas cada vez mais altas relacionadas aos efeitos do aquecimento global já sentidas no planeta (KAYNAKLI; HORUZ, 2003). Os aparelhos tradicionais de ar condicionado estão cada vez mais presentes na nossa vida seja no trabalho, em nossa residência e até mesmo enquanto nos deslocamos. Veículos sem tal sistema praticamente não são mais comercializados. Indústrias também são grandes consumidores que além do conforto de seus funcionários também utilizam seus sistemas de climatização para otimizar os resultados em sua linha de produção mantendo seus sistemas na temperatura ideal, porém sempre há o questionamento sobre seus efeitos negativos. Apesar de serem bastante estudados os sistemas de ar condicionado tradicionais apresentaram poucas evoluções nos últimos anos e apresentam alguns pontos a serem melhorados tais como consumo de energia elétrica e os efeitos que são causados no meio ambiente (KAYNAKLI; HORUZ, 2003). Nesse sentido, o tubo de vórtices surge como uma alternativa aos sistemas tradicionais que basicamente consistem em sistemas fechados que utilizam um compressor de líquido refrigerante geralmente um gás tais sistemas são muito criticados, pois apesar de bastantes eficientes consomem muita energia elétrica uma fonte de energia que está cada vez mais escassa devida a falta de recursos hídricos em diversas partes do mundo ao contrário do sistema proposto nesse trabalho.

O Tubo de vórtice é um componente mecânico sem partes móveis ou componentes elétricos. Essa característica praticamente elimina seu custo de manutenção uma vez que não sofrerá desgaste em partes móveis ou elétricas. Ele precisa apenas ser alimentado com ar comprimido sendo capaz de separá-lo em duas partes: uma de maior temperatura e outra de menor temperatura sendo essa última o principal foco de estudo desse trabalho por apresentar um decréscimo em relação ao ar comprimido admitido de dezenas de graus (HILSCH, 1947). Segundo Cockerill (1998), apesar de tal capacidade, ainda é pouco explorado e é apenas utilizado quando se trata de resfriamentos pontuais como em casos de equipamentos de tornos do tipo CNC (Comando numérico computadorizado sigla CNC, do inglês *Computer Numeric Control*) o objetivo deste trabalho é estudar o tubo e suas aplicações.

O decréscimo de temperatura é um fenômeno termodinâmico extremamente interessante e pode trazer vários benefícios para sua utilização, porém enfrenta dificuldades principalmente quando se trata de manter temperaturas em alguns ambientes de determinados tamanhos, como salas de alvenaria de pequenos tamanhos a uma temperatura específica e neste trabalho será

estudado tal fenômeno a fim de identificar os pontos fracos do processo, procurando melhorá-los para que o tubo se torne o mais funcional possível.

O tubo objeto de estudo neste trabalho apresenta instabilidades térmicas e não conseguia manter uma temperatura estável. Assim o principal objetivo deste trabalho é identificar a falha no dispositivo. Uma vez corrigida desenvolver testes controlando as variáveis que possam influenciar no decréscimo de temperatura produzido por ele, coletar dados dos testes feitos para que através, de uma modelagem matemática se possa definir os limites do tubo, e em trabalhos futuros estudar sua aplicação.

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica está dividida em cinco partes, a fim de facilitar o entendimento do trabalho. A primeira parte apresenta o tubo explica parte de seu funcionamento e seus componentes, já a segunda parte mostra as etapas de um projeto, a terceira parte retrata técnicas de fabricação que podem ser utilizadas em um tubo de vórtices, a quarta parte fala um pouco de modelagem matemática que será utilizada no decorrer deste trabalho e por fim a quinta parte tem como função ilustrar e explicar o funcionamento de sistemas de ar condicionados habituais exemplificando o sistema automotivo.

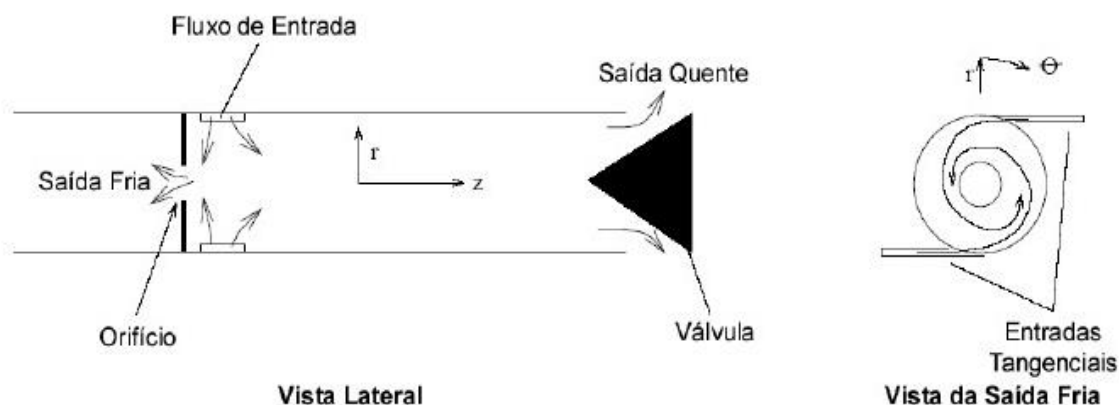
1.1 Tubo de vórtices

O tubo de vórtices também conhecido como “Tubo de Ranque-Hilsch” foi descoberto em 1928 quando o francês George Ranque fazia experimentos com uma bomba de vórtices com funcionamento e função semelhante às bombas tradicionais utilizando a movimentação do fluido através de vórtices e acidentalmente percebeu um fenômeno atípico: uma das extremidades liberava um ar frio, já outra um ar quente (HILSCH,1947). George decidiu se dedicar a tal fenômeno enxergando ali um alto potencial comercial desse componente capaz de separar o ar quente do frio. Ele chegou a criar uma pequena empresa, porém logo abriu falência, pois tal produto não estava de acordo com as necessidades da época, e em 1933 compartilhou um artigo para a sociedade científica francesa, porém sem apoio caiu logo em esquecimento (HILSCH, 1947).

Segundo Cockerill (1998), o tubo de vórtices é um componente de partes totalmente fixas capaz de dividir o fluxo de ar em dois sendo uma parte fria e outra quente, de vazões e temperatura totalmente distintas. Fisicamente, o componente resume-se a um tubo de formato cilíndrico com uma entrada para que o fluido entre de forma radial tocando a face interna do tubo. Os vórtices secundários saem em sentidos axiais podendo ser em sentidos contrários ou iguais dependendo da construção.

A figura 1 demonstra o modelo mais convencional geralmente encontrado no mercado. Esse modelo é conhecido como contrafluxo e em sua configuração há exaustores de ambos os lados e os fluxos quente e frio seguem em sentidos contrários como retrata a figura 1.

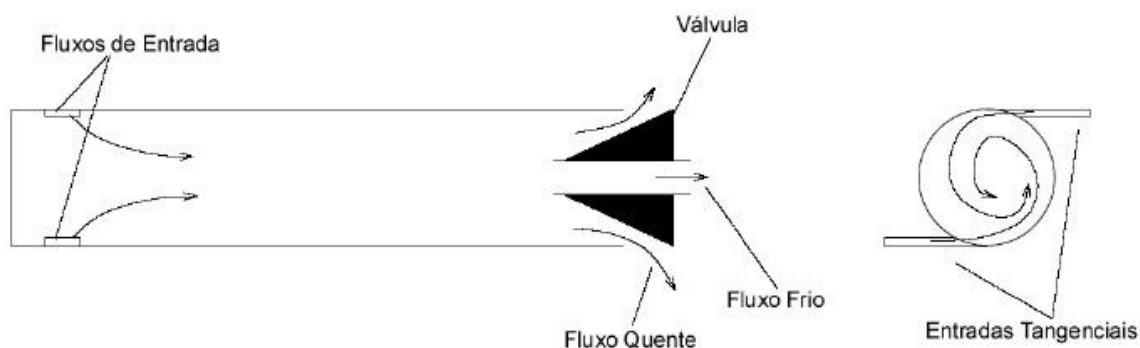
Figura 1 Exemplo de tubo de vórtices contrafluxo.



Fonte: Cockerill (1998)

A figura 2 mostra um exemplo menos convencional e muito pouco utilizado no qual, ao contrário do exemplo anterior, os dois fluxos de ar têm sua exaustão na mesma direção que é conhecida como unifluxo.

Figura 2 Exemplo de tubo de vórtices unifluxo.



Fonte: Cockerill (1998)

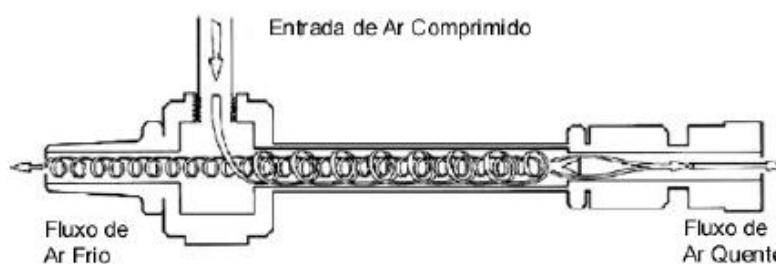
O uso de um tubo de vórtices em sistemas de climatização pode demandar componentes periféricos tais como serpentinas, tubulações, sensores ou evaporadores que, esses sim, podem demandar maiores manutenções, diferentemente do tubo em si que possui manutenção baixíssima e se concentra em seus componentes responsáveis pela admissão e escoamento do ar (GAO, 2005).

Hilsch publicou em 1947 um artigo extremamente abrangente sobre o assunto focado na eficiência do tubo, relacionando a ela a pressão de admissão do ar e a geometria do tubo contrariando a teoria de Ranque que se baseava em processos adiabáticos (HILSCH, 1947).

Já Fulton (1950) citou uma teoria sobre o fenômeno da separação de energia aplicada ao tubo que no princípio do processo as velocidades angulares dos vórtices são distintas sendo a que tangencia o tubo menor do que a que flui no centro.

Porém a fricção entre os vórtices equilibraria as velocidades tornando ambos os vórtices constantes formando um único corpo. Durante esse processo de atrito constante entre os vórtices a parte que tangencia o tubo ganha mais energia cinética que o vórtice central, o que causa um aumento de temperatura ao contrário do vórtice central que tende a perder uma quantidade maior de energia cinética o que causa a sua perda da temperatura. A baixíssima complexidade desse processo é exemplificada por Saidi e Valipour (2003) na figura 3.

Figura 3 Ilustração dos vórtices.



Fonte: Saidi e Valipour (2003)

1.2 Projeto

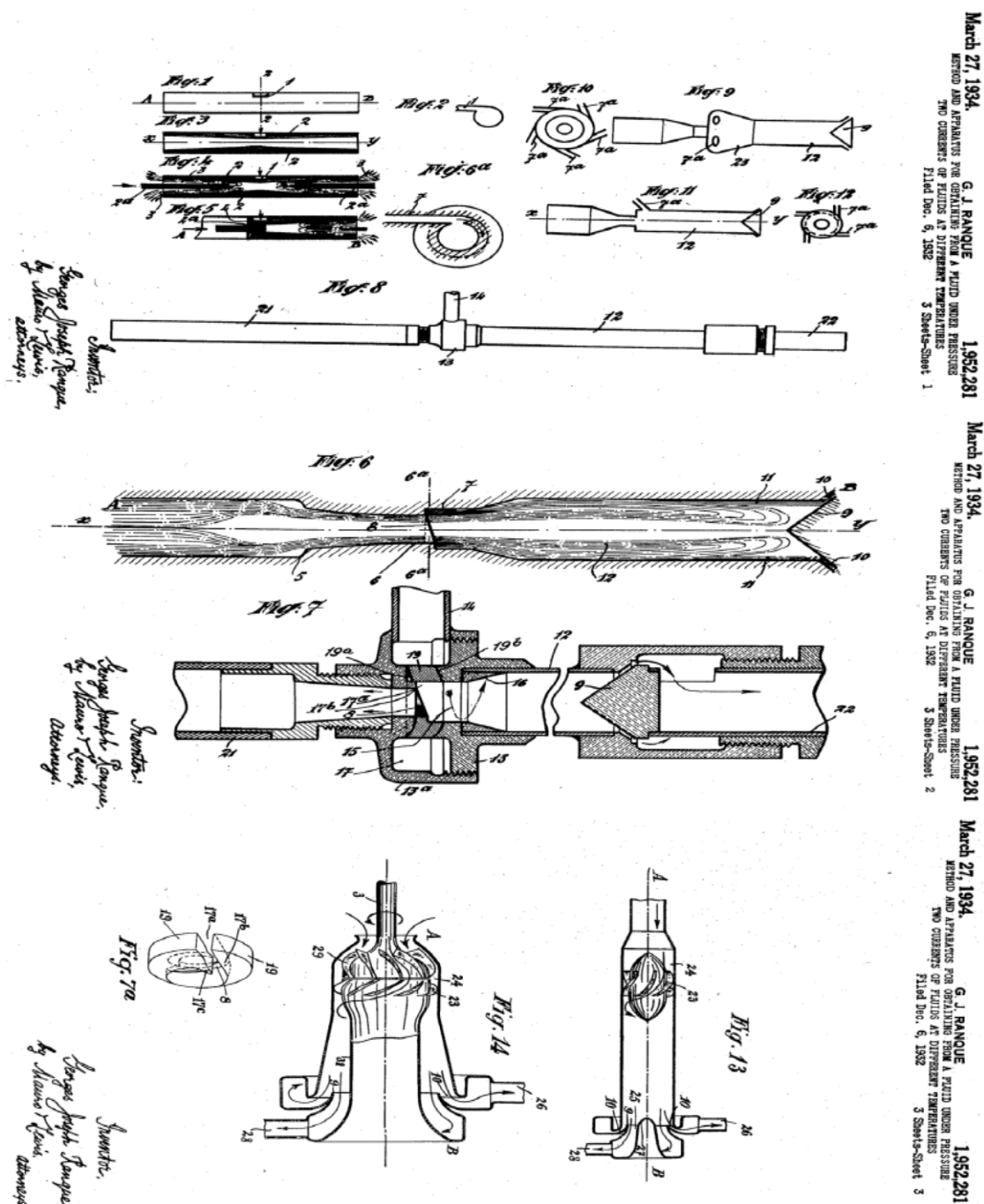
Entender a fabricação de um tubo é primordial para entendimento do trabalho e o projeto é uma etapa muito importante, nesta etapa tem como objetivo mostrar características de um projeto de engenharia sempre relacionando a um projeto de um tubo de vórtices de maneira geral.

A etapa do projeto é a responsável por definir as diretrizes do projeto, tomar as decisões de engenharia a serem tomadas antes da fabricação. Também são tomadas as decisões estéticas e tecnológicas sobre o produto a ser confeccionado (SIMMONS; MAGUIRE; PHELPS, 2009; MOTT, 2003).

Como o objeto desse trabalho se trata de um produto único, que a princípio não será produzido em série, algumas decisões desse projeto não têm aplicações como a parte de *marketing*, viabilidade econômica, etc. Esse projeto terá o foco no desenho industrial, escolha dos materiais e definições da fabricação.

O primeiro passo para o projeto é levantar os requisitos de fabricação. Essa etapa pode ser simplificada por meio de uma comparação com os projetos já existentes, elaborando alterações com o propósito de melhorar um projeto já existente, seja na eficiência do protótipo ou somente facilitando a sua confecção. No caso do tubo de vórtices existem vários projetos precedentes ao longo da história como no primeiro elaborado pelo inventor do mesmo Georges-Joseph Ranque (1947) retratado na figura 4.

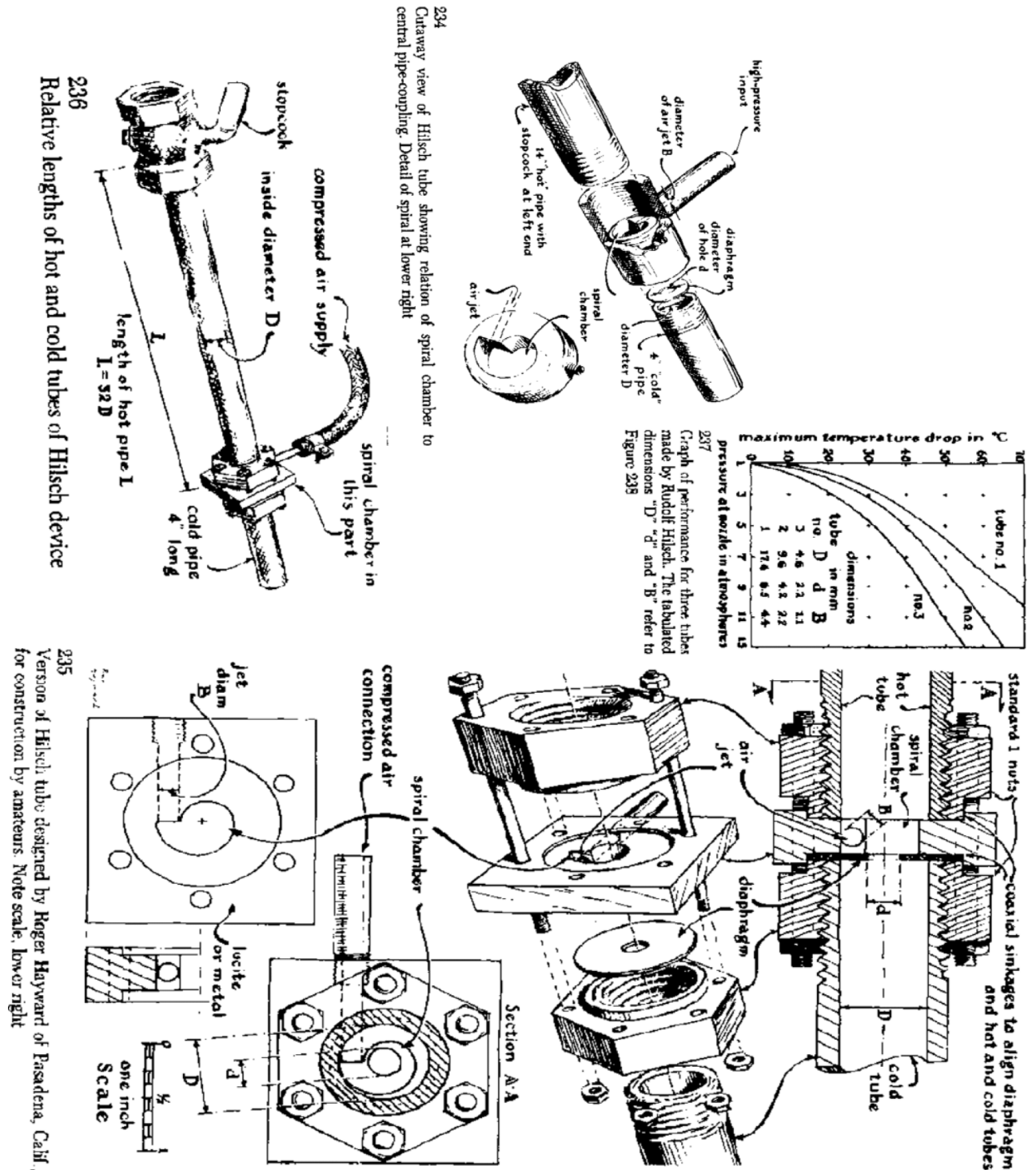
Figura 4: Tubo de Ranque



Fonte: Ranque (1933)

Há ainda o projetado pelo responsável por aprimorar o mesmo e até mesmo por isso também deu seu nome ao componente Rudolf Hilsch, o modelo de Hilsch é mais complexo e produzido em mais partes que o de Ranque, como retratado na figura 5.

Figura 5: Tubo de Hilsch



Outra alternativa a esse processo de comparação é uma concepção original que é um invento que não há precedentes para sua confecção.

A próxima etapa no projeto de engenharia é um *brainstorm*, essa tempestade de ideias é a primeira etapa da concepção, pois nela surgem os primeiros croquis do que um dia será um projeto pronto. Nesse processo se tomam decisões mais importantes como escopo, materiais e processos de manufatura.

Um exemplo dessa etapa é a escolha feita pelos fabricantes do tubo por tubos prismáticos, pois isso reflete que será utilizado o processo de usinagem por fresamento que provavelmente eles teriam maior acesso a tal processo (GROOVER, 2010).

Nessa etapa é importante definir quantas peças serão fabricadas, como será a montagem, qual material será utilizado, formas geométricas e ferramentas. Deve se levar em conta nessas decisões pontos importantes como a montagem, disponibilidade dos materiais, condições disponíveis para fabricação, facilidades na confecção. como será feita a união das tais peças e o escopo almejado.

Para o projeto de um tubo de vórtices talvez a parte mais importante seja o desenho industrial, os protótipos geralmente têm seu *design* todo desenvolvido em um *software* de modelagem 3D.

1.2.1 Etapas de um projeto de engenharia

A grande diversidade de tipos de projeto torna muito difícil exemplificar um passo a passo para realização de projetos. Existem diferentes tipos de projetos quanto aos seus tamanhos e até mesmo de sua natureza. Segundo Lima (1996), os projetos podem ter etapas em comum com diferenças entre as mesmas. Utilizando como base o estudo de projetos industriais quadro 1 mostra as etapas de um projeto:

Quadro 1 Etapas e características do projeto

ETAPAS	CARACTERÍSTICAS
Estudos preliminares	Realização de análise de viabilidade econômica e de oportunidade. Baixo custo e envolvimento de poucos técnicos. Divulgação restrita na empresa, por exigências de confidencialidade. Etapa em que ocorre a definição dos objetivos do projeto.
Estudos de base	Definição mais precisa dos meios de produção e de seu custo. Pequenas equipes, apesar do aumento do número de pessoas envolvidas. Elaboração de documentação funcional com os principais requisitos do projeto: especificações técnicas e memorial descritivo (anteprojeto). Etapa em que ocorre a decisão efetiva de investimento.
Detalhamento	Envolvimento de diversas especialidades (engenharias, arquitetura...), e aumento considerável do quadro de pessoas envolvidas. Rígida divisão de trabalho entre numerosos especialistas. Necessidade de compatibilização entre os diferentes subprojetos, com lógicas muitas vezes conflitantes. Custo elevado, representando até 30% do investimento. Produção de vasta documentação (plantas e cadernos de especificações técnicas). Etapa em que se definem os meios de trabalho com um grau de precisão tal que permita a realização do projeto.
Construção	Aumento do número de participantes e de equipes, com a inclusão de operários, tanto da empresa contratada quanto das empresas subcontratadas, o que exige importante trabalho de coordenação. Etapa de execução dos trabalhos e de reconcepção do projeto original em função da variabilidade no canteiro de obras e das próprias condições de trabalho de execução.
Testes e Partida	Testes, de acordo com procedimentos mais ou menos formalizados, de equipamentos e materiais instalados. Partida até a estabilização em funcionamento considerado estável e/ou obtenção da capacidade nominal.

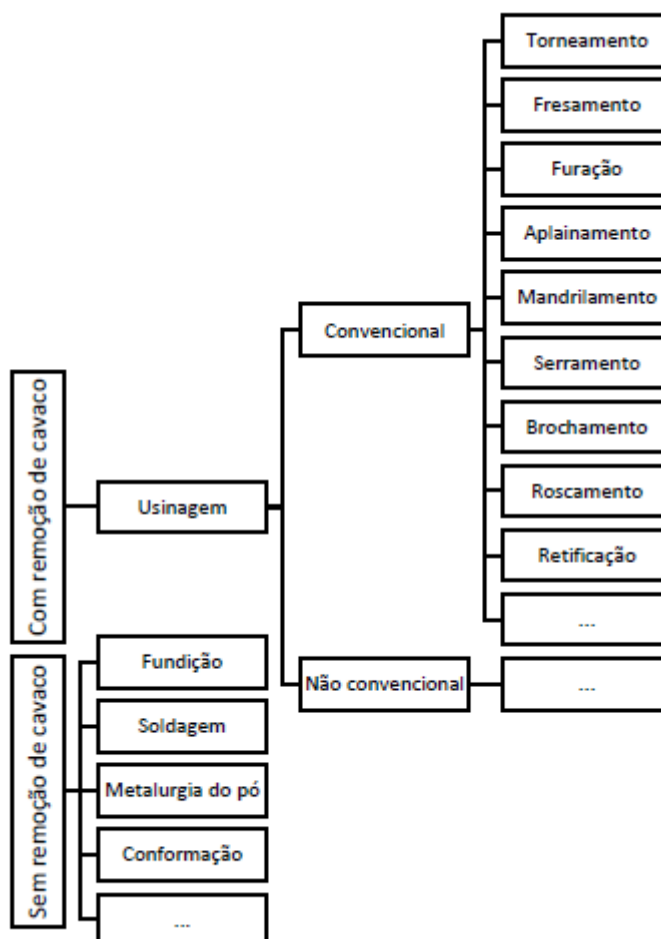
Fonte: Lima (1996)

O quadro 1 retrata passos que demonstrar retratar as boas praticas de um projeto de engenharia que se adequam ao projeto porém vale lembrar que o foco deste trabalho não é o projeto do tubo e sim o estudo dos seus efeitos termodinâmicos, o tubo já foi fornecido porém as etapas do projeto e a construção do mesmo estão sendo fundamentada para que o leitor tenha maior facilidade em entender os efeitos termodinâmicos do mesmo.

1.3 Fabricação de um Tubo de Vórtices

A matéria prima se transforma durante o processo de fabricação industrial de forma sistêmica, de tal forma que é possível montar um fluxograma desse processo como exemplificado na figura 6.

Figura 6: Fluxo dos processos de fabricação em geral.



Fonte: MACHADO et al, (2011)

A confecção de um tubo de vórtices passa pelo entendimento de técnicas de processos de fabricação que serão ferramentas neste processo. Processos de fabricação é uma área da engenharia mecânica muito extensa que consiste na transformação de metais considerados matérias primas em componentes projetados. Os processos de fabricação envolvem vários fatores entre eles a escolha das ferramentas, materiais adequados e condições de trabalho.

A confecção do tubo de vórtice deste trabalho é baseada em um processo amplamente utilizado na indústria metal mecânica que se denomina usinagem, que é considerada a prática de remover material de forma a esculpir o material, gerando grandes quantidades de cavacos, como é chamado o material removido (MACHADO et al, 2011). A usinagem é um processo de

fabricação vastamente utilizado na indústria desde de o século XVIII até mesmo os dias atuais, e tem sua utilização cada vez mais difundida em outros seguimentos (MCGEOUGH, 1988).

Existem vários projetos de tubo de vórtices, alguns já mostrados neste trabalho. Um importante parâmetro no projeto e fabricação do tubo é a quantidade de peças que vão compor o dispositivo, ela define os processos de fabricação que serão utilizados e a complexidade do projeto. Albuquerque (2018). Optou por realizar o projeto em sete peças considerando as condições que estavam disponíveis para fabricação.

Já Buchelt et al. (2016) fez um projeto diferente que contemplava a confecção de mais peças que o anterior citado, composto por 14 peças, fora os elementos de fixação, o projeto apresenta maior facilidade na confecção apesar de uma maior complexidade na montagem do dispositivo retratado na figura 7 mostra as peças e elementos de fixação confeccionadas no projeto.

Figura 7 Peças utilizadas no projeto de Bulchelt (2016)



Fonte: Buchelt et al. (2016)

Buchelt et al. (2016) não dá detalhes do processo de fabricação deste tubo mas é visível que foram utilizados menos recursos que os utilizados por Albuquerque (2018), suas peças podem ser confeccionadas através apenas de um processo o torneamento. Essas características tornam os dois tubos apesar de terem as mesmas funções, aparentemente muito diferentes como retrata as imagens 8 e 9.

Figura 8 Tubo de Albuquerque (2017)



Fonte: Albuquerque (2017)

Figura 9 Tubo de Bulchelt (2016)



Fonte: Buchelt et al. (2016)

A falta da disponibilidade de recursos de fresagem pode ter sido o motivo da diferença na aparência dos dois tubos, o processo de fresagem bastante utilizado para abertura de furos e canais permite que seja feito a câmara de giração do tubo em uma peça bruta, já no segundo a mesma foi projetada através da montagem de flanges o que pode gerar uma maior facilidade na confecção já que o processo de torneamento é facilmente encontrado no mercado de fabricação industrial, porém demanda maior quantidade de vedações o que pode ocasionar vazamentos no fluido.

1.4 Modelagem

A modelagem é uma ferramenta importante utilizada no trabalho, responsável por quantificar os limites que serão expostos em testes práticos. Com os dados obtidos através da modelagem é possível determinar os limites do tubo, para futuramente em um trabalho sequencial utilizar afim de determinar a aplicabilidade prática do dispositivo.

Modelagem matemática é um método que tem sido utilizado em larga escala nos últimos anos, em diversas áreas. Na maioria das vezes utilizadas com termos genéricos em várias áreas de conhecimento.

Segundo Niss (2001) modelagem é basicamente uma problematização de alguma situação específica, colocando em números as condições reais por meio de formulas ou resultados de testes práticos.

Modelagem é criar perguntas e/ou problemas que facilitem a seleção, busca, organização e manipulação dos dados obtidos (Barbosa, 2004).

1.5 Exemplificação de um sistema tradicional de climatização

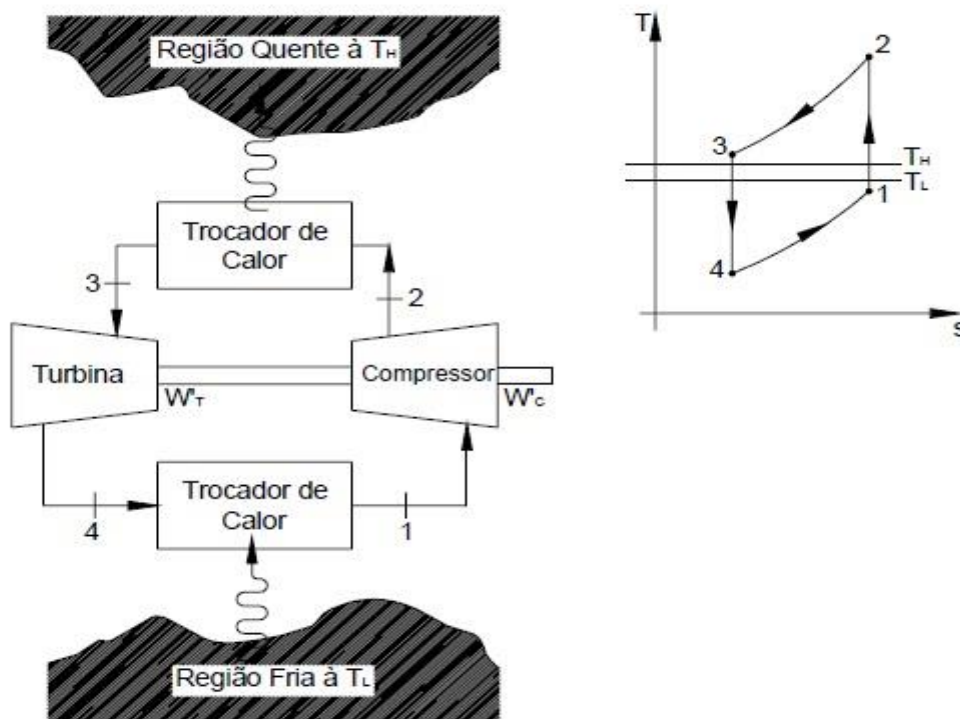
Apesar do trabalho não se tratar apenas de uma aplicação foi escolhido o ar condicionado automotivo por ser muito comum para exemplificar os sistemas de ar condicionados tradicionais.

Segundo Kaynakli e Horuz (2003), sistemas de ar condicionado não se trata apenas de conforto, eles também proporcionam segurança aos seus usuários principalmente em aplicações automotivas pois aumentam o nível de concentração dos motoristas através do controle de temperatura. Já Forrest e Bhatti (2002), listam as funcionalidades em cinco principais funções como controle de temperatura, umidade, circulação, ventilação e limpeza do ar.

Nesta seção serão abordados os sistemas de climatizações não só a parte refrigerante, mas também seus sistemas auxiliares e subconjuntos que promovem o funcionamento de todo o sistema.

Existem vários tipos de ciclos de refrigeração. Segundo Moran e Shapiro (2004) os mais comuns são o ciclo de Brayton e o ciclo refrigeração por compressão de vapor. O ciclo de Brayton está exemplificado na figura 10.

Figura 10 Ciclo de refrigeração de Brayton.



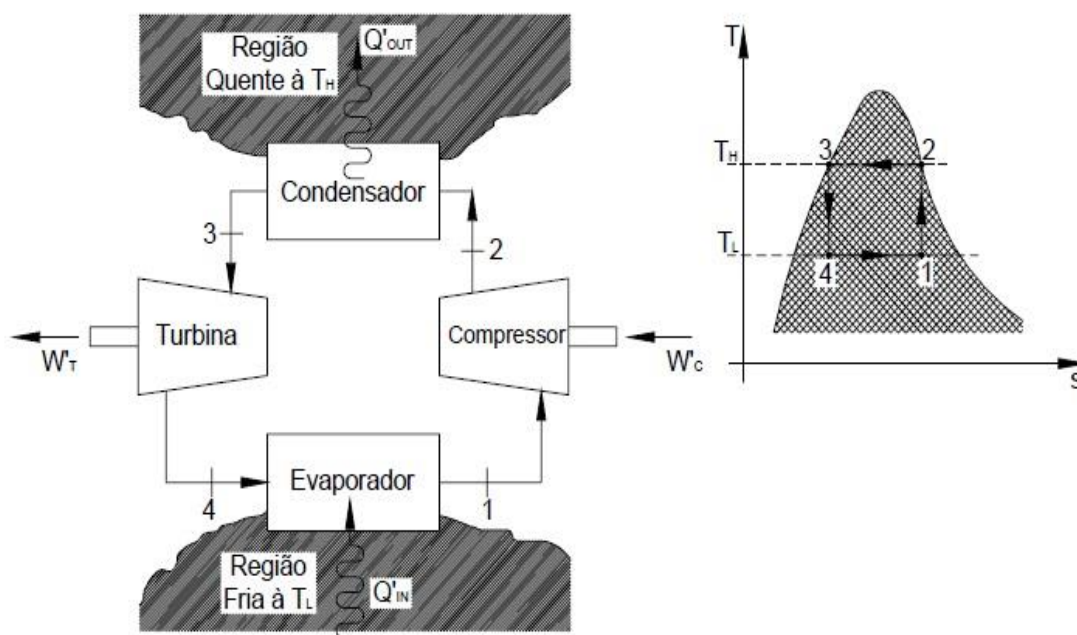
Fonte: Moran e Shapiro (2004)

Segundo Moran e Shapiro (2004) no ciclo de Brayton o fluido circula em uma malha totalmente fechada dividido em duas distintas linhas uma de baixa pressão como retrata o gráfico de pressão por entalpia das etapas 1 e 4.

Outra de alta pressão (2 e 3) sendo o compressor o componente responsável por comprimir e assim aumentar a pressão do sistema seguindo para um trocador de calor onde o fluido perde calor para o sistema indo em direção a turbina responsável por descomprimir o fluido tornando o ainda mais frio. Já no último trocador de calor é o resultado final do processo onde o fluido absorve calor do ambiente externo tornando a região fria.

De todos os ciclos utilizados atualmente, o mais comum é o de compressão de vapor popularmente utilizado em ar condicionados de todas as aplicações conforme citado por Moran e Shapiro (2004). O Ciclo de vapor é baseado no ciclo de Carnot retratado na figura 11.

Figura 11 Ciclo de refrigeração de Carnot



Fonte: Moran e Shapiro (2004)

Diferente do ciclo de Brayton, retratado na Figura 10, o ciclo de Carnot é mais eficiente como o gráfico da figura 11 demonstra em que as pressões são mais uniformes. Isso se deve a substituição dos trocadores de calor por componentes que apesar, de terem a mesma função são mais eficientes como o condensador e o evaporador.

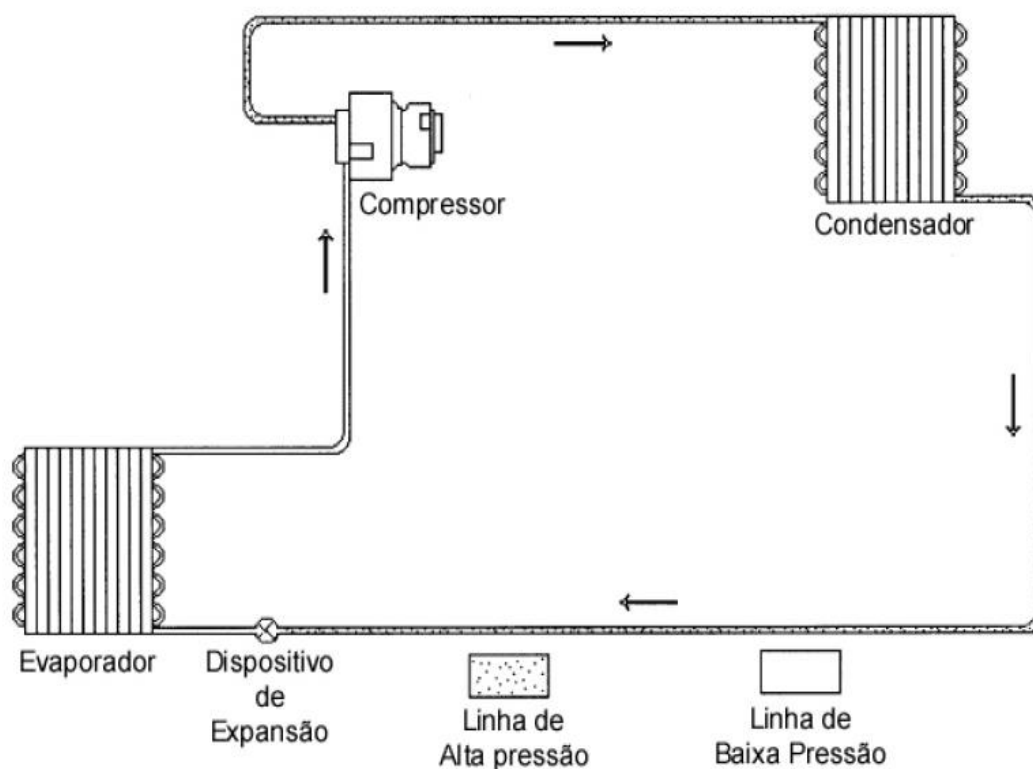
Para exemplificar os sistemas tradicionais foi escolhido o veicular, pois está mais presente no nosso cotidiano e são basicamente compostos pelos mesmos componentes das outras

aplicações estudadas, tais sistemas têm seu principal objetivo oferecer um conforto térmico aos ocupantes, conforme Gimenez et al. (2006), a busca pelo conforto térmico faz com que busque métodos que maximizem a sensação de conforto dos usuários.

O ciclo de compressão de vapor é baseado no ciclo de Carnot com uma diferença significativa de não possuir uma turbina que é substituída por um componente de Expansão geralmente é utilizado uma válvula Moran e Shapiro (2004).

Os componentes do ciclo de compressão de vapor têm as mesmas funções dos da figura 11, mas para melhor entendimento são mostrados na figura 12:

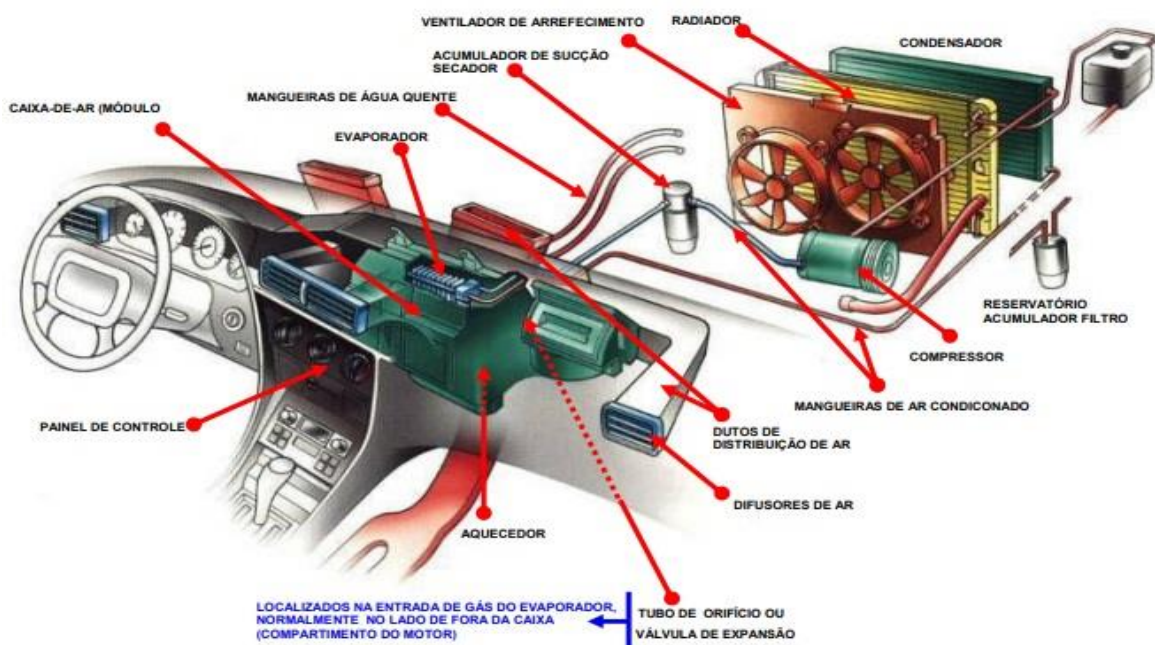
Figura 12 Esquema simplificado de ar condicionado automotivo.



Fonte: Kaynakli e Horuz (2003)

O primeiro veículo a possuir tal sistema foi no ano de 1939 do fabricante Packard Motor Car Company (Al Kargilis, 1996) e desde então cada vez mais presentes nos veículos comercializados na prática eles apresentam os componentes listados na figura 13.

Figura 13 Desenho esquemático sistema de climatização



Fonte: Sacamoto (2006)

A figura 12 mostra os itens da figura 11 alojados no veículo e suas ligações feitas através de tubulações geralmente fabricadas em alumínio. A parte fria se concentra praticamente dentro do habitáculo onde é feita a troca de calor que é a finalidade do sistema.

2 METODOLOGIA

Partindo do princípio que o método é o caminho que a seguir com o propósito de atingir algum resultado pré-definido, e que a ciência sempre busca atingir através de seus estudos algum conhecimento específico, não seria exagero dizer que o método é uma importante ferramenta utilizada pela ciência para alcançar o objetivo pré-estabelecido antes mesmo do início do trabalho.

De acordo com Trujillo e Ferrari (1974) o método é um traço da ciência, que compõe um instrumento básico que organiza os pensamentos em subconjuntos e quantifica-os de forma que se facilite a obtenção do resultado almejado pelo cientista ou pesquisador, que foi pré-definido anteriormente com êxito.

O método predominante adotado no trabalho é o método experimental e todos os dados apresentados neste será baseado neste método, esse método se resume a submeter algum objeto no trabalho em questão o tubo de vórtices, a experimentos controlando as variáveis e condições que possam influenciar no resultado. Segundo Gil (2008) esse método experimental seria responsável por grande parte dos avanços tecnológicos nos últimos anos e pode ser classificado como um método de excelência nas ciências naturais.

O estudo das aplicações do tubo de vórtices será subdividido em duas partes principais e ambas serão desenvolvidas sequencialmente durante o decorrer deste trabalho. A primeira aborda um problema que foi identificado pelos fabricantes do tubo que notaram um aumento de temperatura na parte fria após um período de aproximadamente um minuto de funcionamento o que estava tornando o tubo pouco eficiente em suas aplicações. A temperatura se mostra instável o que torna praticamente impossível quantificar as temperaturas obtidas. Já a segunda parte do trabalho trata de, após corrigida a instabilidade térmica de temperatura fria do tubo, foi iniciado uma coleta de dados em diversos experimentos com o tubo alternando o tempo do experimento e variando as pressões, colhendo resultados para entender a influência de cada item no resultado final, que no caso deste trabalho é a temperatura fria que é o principal objeto de estudo.

A primeira parte deste trabalho, como dito anteriormente, consiste em uma análise de um tubo já existente e produzido nos laboratórios da Universidade Federal de Goiás, que, em testes feitos pelos fabricantes, apresentou uma falha de instabilidade na temperatura fria, após algum período de funcionamento o mesmo apresenta uma instabilidade na temperatura e começa a apresentar um aumento significativo em sua temperatura fria, nosso principal objeto de estudo.

Por meio de novos testes práticos, com o tubo alimentado em uma rede estabilizada e com maior precisão dos dados a fim de constatar se o defeito está no tubo ou em algum periférico, foi diagnosticada a causa desse fenômeno e então foi expostos os métodos para que corrigir tal instabilidade tornando o tubo estável para a segunda fase dos experimentos.

Nessa fase também foram coletados dados para comparação aos dados obtidos após corrigir a instabilidade do equipamento e para expressar em números os efeitos das alterações sugeridas. Essa comparação remete ao método comparativo que consiste em estudar as semelhanças e diferenças entre os dois estágios do estudo. Gil (2008) diz que o método comparativo procede pela investigação de fenômenos ou no caso desse experimento, com o objetivo de destacar suas divergências e similaridades.

Já na segunda fase através do método experimental, após corrigidas as instabilidades foi feita uma série de experimentos semelhantes aos feitos anteriormente com o tubo em diversas situações controlando variáveis conhecidas e condições do ambiente, coletando vários dados como pressão, temperaturas e dados da rede pneumática que alimenta o tubo.

O tubo foi montado em uma bancada de madeira de forma que na entrada de ar fosse instalada uma válvula reguladora de pressão com reservatórios de lubrificação de água e óleo , porém não será utilizado nenhum tipo de lubrificação pois a única função da válvula foi controlar a pressão de ar admitido, além de mostrar através de um manômetro a pressão de entrada do tubo. Além do manômetro que teve função de registrar a pressão de entrada, foi utilizado um termopar tipo “J” com visor digital previamente calibrado para coletar dados de temperatura de ambas as extremidades do tubo de vórtices.

O principal alvo de estudo dessa segunda fase é quantificar através de experimentos práticos e modelagem matemática relacionando as variáveis controladas tais como pressão de entrada no tubo, temperatura do ar da rede e temperatura ambiente com os limites do tubo de vórtices quanto a sua eficiência e capacidade de climatização, resultando em um ou um conjunto de equações que serão utilizadas para continuidade do estudo, estudar a influência dos parâmetros variáveis envolvidos, tais como pressão, temperatura fria, temperatura quente, temperatura da rede e ambiente.

A partir deles já desenvolvido um embasamento técnico para ser definido com propriedade quais seriam as aplicações mais viáveis tecnicamente do sistema. Também foram traçados gráficos que indicam o comportamento da linha *pressão x temperatura x tempo*, tanto as equações quanto os gráficos ajudam a dimensionar a capacidade de climatização do tubo. Também foi possível identificar quais desses parâmetros influenciam mais na temperatura fria

do tubo de vórtice, principal objeto de estudo assim descoberto pontos no quais será necessário elaborar melhorias ao processo.

3 DISCUSSÃO, ANÁLISE E AVALIAÇÃO DOS DADOS COLETADOS

3.1 O estudo de caso

Para entendermos melhor o estudo, como já relatado anteriormente a produção do tubo não foi objeto de estudo deste trabalho, então já foi entregue pronto fabricado nos laboratórios da UFG, e gentilmente nos cedido pelo professor Dr. Daniel Fernandes da Cunha porém quando realizaram testes no mesmo, não haviam acompanhamento da rede pneumática que abastecia o tubo, como o foco do trabalho deles era a fabricação não teria relevância tais dados, já este trabalho tem o enfoque termodinâmico então foi montado um sistema para acompanhamento da rede conforme foto 14 a exibida na sequência.

Figura 14 Bancada do tubo de vórtices



Fonte: Autoria própria.

Foi utilizado uma válvula do tipo “Lubrífil” que também tem função de lubrificar o sistema com água e óleo, porém tal função não será exercida pois influenciaria no resultado do nosso trabalho os fluidos lubrificantes poderiam realizar uma troca de calor e influenciando a temperatura final do ar. A válvula é capaz de regular o fluxo de ar comprimido o que é bastante importante, pois possibilita o teste em diversas pressões. O ar comprimido é gerado por um compressor do tipo “parafuso” da marca Atlas Copco que está montado em uma indústria de gêneros alimentícios. O mesmo está calibrado e é capaz de fornecer à rede de toda a planta

fabril uma pressão de 6 bar que foi a máxima utilizada nossos testes, porém não foi a única pois foi variado através da válvula e foi utilizado três pressões diferentes com o intuito de gerar um resultado diferente, exibido na imagem 15.

Figura 15 Compressor utilizado no experimento



Fonte: Autoria própria.

Também foi necessário utilização de um termômetro que foi responsável por registrar as temperaturas obtidas. Foi utilizado um termopar do tipo “J”, com visor digital que foi recentemente calibrado, também conhecido no mercado como termômetro “espeto” abaixo na figura 16 que retrata a calibração:

Figura 16 Termopar calibrado



Fonte: Autoria própria.

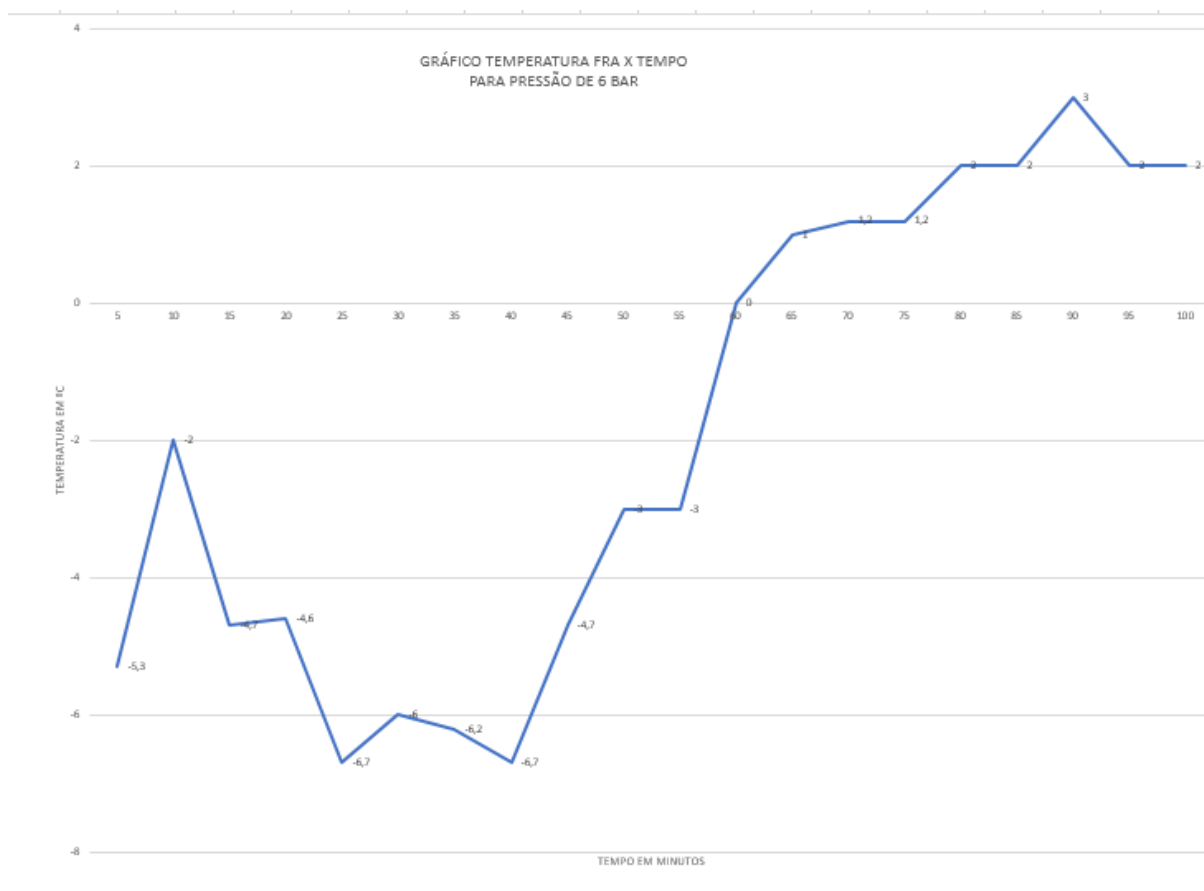
Segundo Albuquerque (2017), apesar de calibrado, o termopar pode apresentar variações conforme o indicado abaixo essa são as faixas de variação das leituras nos termômetros digitais:

- De -20 °C a 10 °C, incerteza de $\pm$ (2% da leitura + 4 °C)
- De 10 °C a 200 °C, incerteza de $\pm$ (1% da leitura + 3 °C)
- De 200 °C a 1000 °C, incerteza de $\pm$ (3% da leitura + 2 °C)

Em todos os experimentos a parte fria, se enquadra na primeira faixa, ou seja, nos dados apresentados neste trabalho pode haver variações de $\pm$ 2%.

O trabalho começou estudando a instabilidade térmica do tubo que, quando testado pelos fabricantes do mesmo, aproximadamente um minuto após atingir a temperatura de 0° C o tubo começava a elevar a temperatura na sua parte fria, mostrando-se ineficiente. Nos testes executados no decorrer deste trabalho também foi notado tal comportamento apesar de o componente ter atingido temperaturas inferiores a 0 °C, uma vez que em seu primeiro teste parametrizado o tubo apresentou o comportamento apresentado no gráfico que podemos ver no gráfico 1.

Gráfico 1 Variação temperatura no tempo para pressão de 6 bar, antes da correção



Fonte: Autoria própria.

Ao realizar este primeiro teste observou-se que, no momento em que a temperatura começava a subir após um momento de estabilidade, o som reproduzido pelo tubo na parte quente, mais especificamente na válvula de controle mudava, como na mesma há uma passagem muito grande de ar por alguns orifícios, a mudança foi facilmente notada. Ao movimentar o parafuso novamente a temperatura voltava a cair e tendia a temperatura de estabilidade ar, então concluiu-se que, após algum período ligado, o piloto da válvula se movimentava e perdia a regulagem que havia inicialmente, o que acarretava o aumento da temperatura na parte fria uma vez que a desregulagem causava uma descoordenação entre os vórtices internos do tubo.

Foi feito um trabalho de substituição do conjunto rosca e parafuso da válvula de controle afim de reduzir a folga entre eles, assim tornando o ajuste entre esses componentes mais finos, tal procedimento tornou mais confiável o componente que não cedeu nos testes com uma pressão de admissão de até 6 bar.

Após o reparo mecânico do tubo foram executados mais três testes de 7 minutos com um intervalo de trinta segundos, variando as pressões com o propósito de constatar as alterações,

as condições eram as mesmas e a rede pneumática variava sua pressão através da válvula instalada na bancada de teste, foram utilizadas três pressões a menor de 3 bar, uma intermediária de 4 bar e a pressão nominal da rede 6 bar, para os testes demonstraram os resultados exemplificados a seguir.

Um aspecto importante é que foi medido a temperatura ambiente e rede pneumática em todos os testes as condições eram as mesmas que são demonstradas na tabela 1.

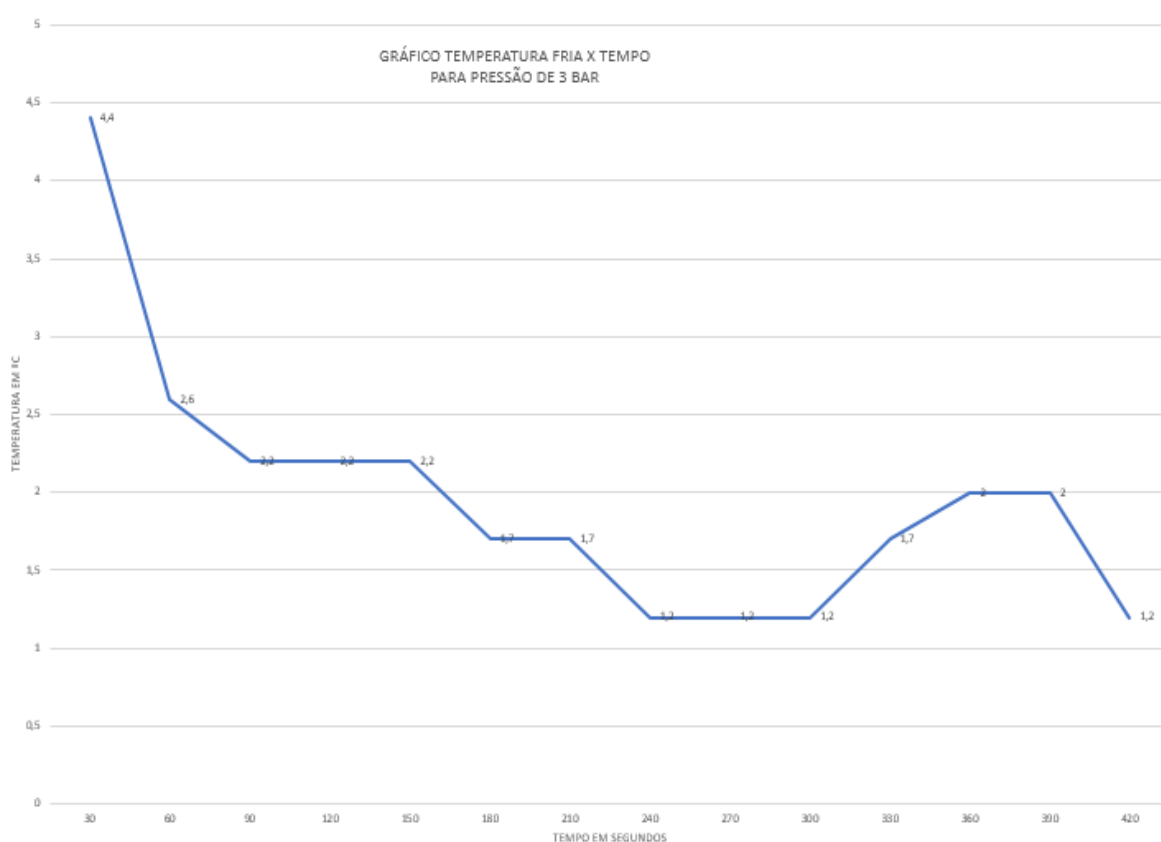
Tabela 1 Condições do ambiente

Temperatura do ar da rede :	18,8 °C
Temperatura ambiente :	30 °C

Fonte: Autoria própria.

No primeiro exemplo após correção, é um gráfico e tabela com os dados do teste quando submetido a pressão de 3 bar conforme mostrado no gráfico 2 e tabela 2.

Gráfico 2 Variação temperatura no tempo para pressão de 3 bar.



Fonte: Autoria própria

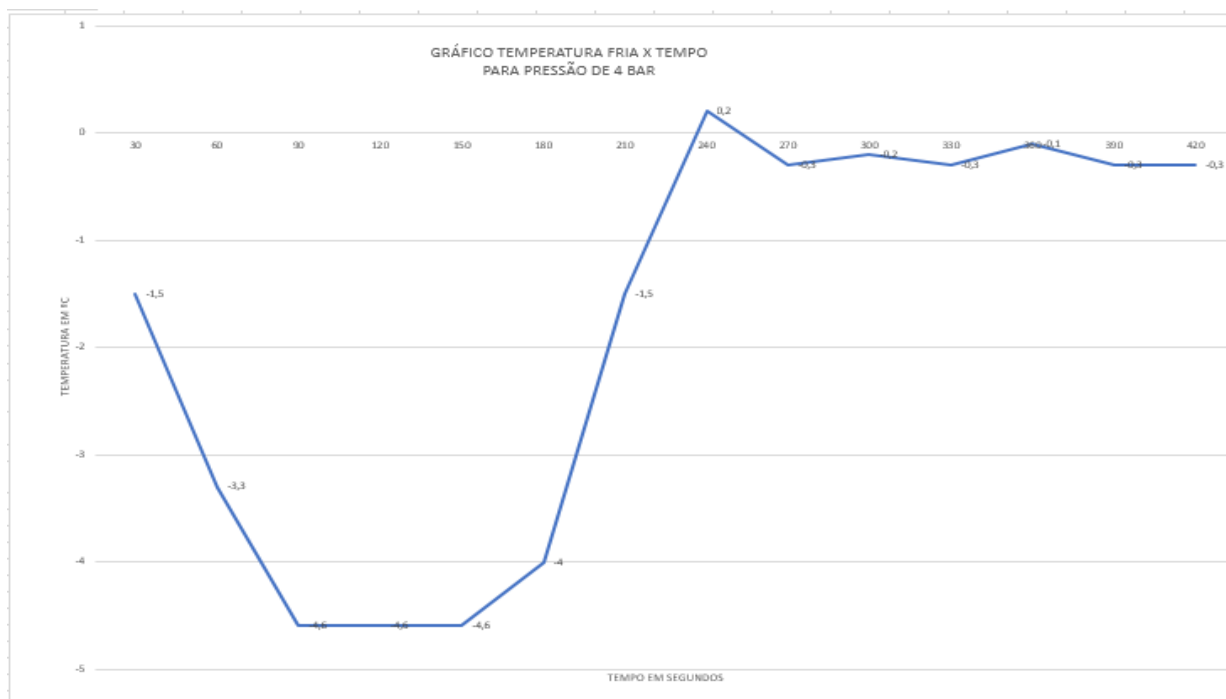
Tabela 2 Temperatura a 3 bar.

PRESSÃO DE 3 BAR		
TEMPERATURA QUENTE EM °C	TEMPERATURA FRIA EM °C	TEMPO EM SEGUNDOS
30,5	4,4	30
30,2	2,6	60
30	2,2	90
30,4	2,2	120
30,4	2,2	150
29,9	1,7	180
30,1	1,7	210
30	1,2	240
30,1	1,2	270
30	1,2	300
30,1	1,7	330
30,1	2	360
30,1	2	390
30	1,2	420

Fonte: Autoria própria.

O segundo teste, foi realizado com uma pressão de 4 bar e as medições nos mesmos intervalos de 30 segundos, com as mesmas condições do ambiente do teste anterior apresentou os resultados abaixo conforme o gráfico 3 e tabela 3.

Gráfico 3 Variação temperatura no tempo para pressão de 4 bar.



Fonte: Autoria própria.

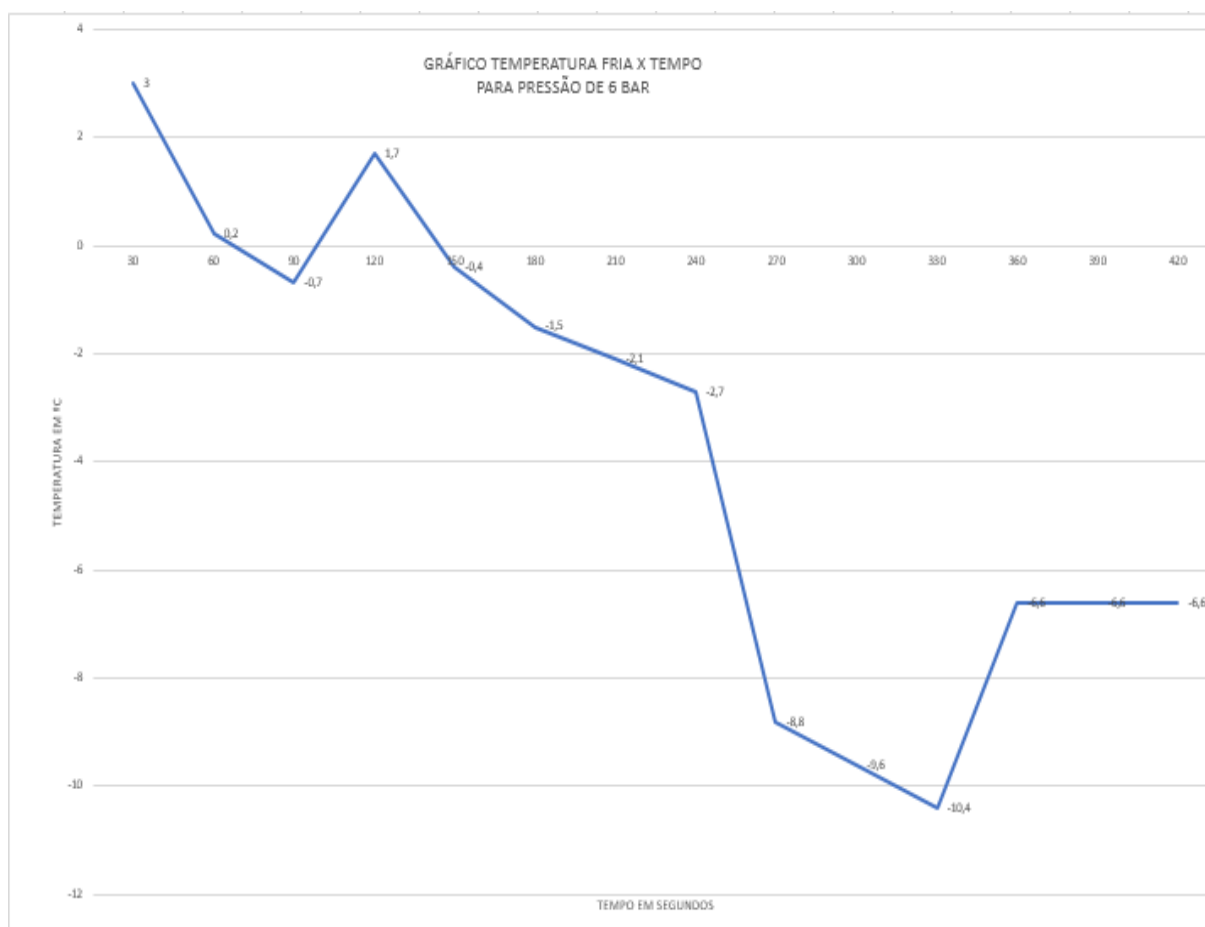
Tabela 3 Temperatura a 4 bar.

PRESSÃO DE 4 BAR		
TEMPERATURA QUENTE EM °C	TEMPERATURA FRIA EM °C	TEMPO EM SEGUNDOS
32,5	-1,5	30
32,2	-3,3	60
31,8	-4,6	90
32,11	-4,6	120
31,5	-4,6	150
32	-4	180
31	-1,5	210
30,6	0,2	240
30,6	-0,3	270
30,8	-0,2	300
30,6	-0,3	330
30,8	-0,1	360
30	-0,3	390
30,5	-0,3	420

Fonte: Autoria própria.

Resultado do teste com pressão a 6 bar são indicados no gráfico e tabela 4.

Gráfico 4 Variação temperatura no tempo para pressão de 6 bar.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 Temperatura a 6 bar.

PRESSÃO DE 6 BAR		
TEMPERATURA QUENTE EM °C	TEMPERATURA FRIA EM °C	TEMPO EM SEGUNDOS
38	3	30
39	0,2	60
36	-0,7	90
35	1,7	120
34	-0,4	150
33	-1,5	180
33	-2,1	210
32	-2,7	240
32,8	-8,8	270
31,9	-9,6	300
32,3	-10,4	330
33	-6,6	360
32,5	-6,6	390
33,5	-6,6	420

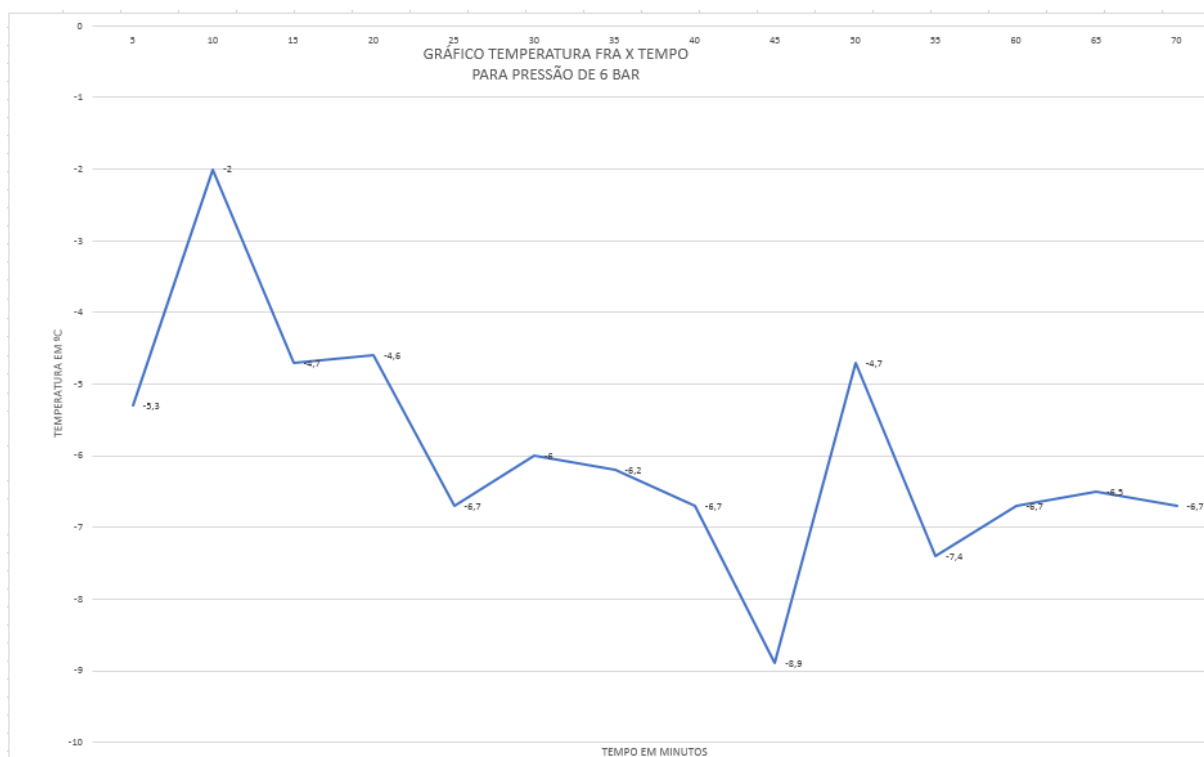
Fonte: Autoria própria.

Conforme dito anteriormente todas as condições e variáveis foram controladas e a extensão dos testes atingindo 7 minutos foi o necessário para de vez provar que não há mais a existência da instabilidade relatada pelos fabricantes do tubo de vórtices. Outro ponto importante a ser observado é que a influência da pressão do ar admitido é fator impactante na temperatura fria obtida.

A variação na temperatura fria não é totalmente proporcional a variação na temperatura quente, o que não foi objeto de estudo deste trabalho, mas, uma hipótese é que se dissipe bastante energia térmica por meio de condução ao tubo, que nos testes apresentou um alto grau de elevação em sua temperatura. Apesar de mostrar resolvido o problema inicial deste trabalho, um questionamento sobre como o tubo de vórtices se comportaria em um período maior era pertinente até porque se fosse utilizado em alguma aplicação poderá ter seu funcionamento por mais de 7 minutos.

Foi realizado um teste utilizando da capacidade máxima da rede, que é 6 bar por um período de uma hora porém com seus intervalos de medição maiores, no caso de 5 minutos as condições tais como temperatura ambiente e temperatura do ar da rede foram mantidas as mesmas dos testes anteriores e apresentaram o seguinte resultado retratado no gráfico 5 e tabela 4.

Gráfico 5 Temperatura a 6 bar, experimento de uma hora.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 5 Temperatura a 6 bar, teste de uma hora.

PRESSÃO DE 6 BAR		
TEMPERATURA QUENTE EM °C	TEMPERATURA FRIO EM °C	TEMPO EM MINUTOS
27,8	-5,3	5
25,4	-2	10
34,9	-4,7	15
33,6	-4,6	20
33	-6,7	25
31,5	-6	30
32	-6,2	35
33,6	-6,7	40
33,5	-8,9	45
31,5	-4,7	50
35	-7,4	55
33,7	-6,7	60
35	-6,5	65
34	-6,7	70

Fonte: Autoria própria.

Esse último teste de extensão de uma hora mostrou em seu gráfico um comportamento interessante, há uma variação de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ porém se mostrou estável no decorrer do teste, informação de muita importância pois é de suma importância essa estabilidade para que o tubo de vórtices seja de fato eficiente em possíveis aplicações futuras.

3.2 A discussão do caso

Como objetivo principal deste trabalho era a colocar em números os resultados obtidos de forma a medir a capacidade de refrigeração e temperaturas deste componente, esse resultado passa pela modelagem matemática dos dados obtidos empiricamente.

Um fluido comprimido foi inserido tangencialmente no tubo de vórtices. Procedimentos experimentais, tais como o deste trabalho, demonstraram que, qualitativamente, o movimento é axial na direção da saída quente (região periférica) e rotativo na região fria (na região central) (STEPHAN et. al, 1984)

A fração de frio C_F é definida como a porcentagem do ar direcionada para a saída fria. Na maior parte das aplicações, uma fração de ar frio de 80% maximiza a capacidade de refrigeração. Esse valor máximo equivale a uma queda de temperatura de 28°C em relação à temperatura do ar comprimido.

3.2.1 Modelagem

Os parâmetros que podem ser avaliados no tubo de vórtice são:

- Diâmetro do bocal
- Diâmetro do orifício frio
- Comprimento do tubo
- Área na saída quente

Para análise do desempenho do tubo de vórtices, são considerados os seguintes fatores:

1. Efeito de refrigeração ΔT_F , que determina a diferença entre temperatura do ar de entrada T_a e o ar na seção fria T_F na equação 1:

$$\Delta T_F = T_a - T_F \quad (1)$$

2. Efeito do aquecimento, que determina a diferença entre a temperatura do ar na saída do ar quente T_q e a temperatura do ar na entrada T_a na equação 2:

$$\Delta T_q = T_q - T_a \quad (2)$$

Adicionando ambas as equações, a diferença de temperatura total é a equação 3:

$$\Delta T = T_q - T_F \quad (3)$$

Para um processo isentrópico, a máxima variação de temperatura possível se dá pela equação isentrópica da equação 4:

$$\frac{T_s|_{iso}}{T_e} = \left(\frac{P_s}{P_e} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (4)$$

Sendo P_e a pressão de entrada do ar, P_s a pressão de saída (atmosférica), T_e a temperatura de entrada do ar, T_s a temperatura de saída isentrópica e $k = 1,4$ para o ar. Dessa forma, o cálculo da máxima diferença de temperatura possível na equação 5:

$$\Delta T_{iso} = |T_s|_{iso} - T_a| \quad (5)$$

Conforme o ar escoar no tubo de vórtices, ocorre uma expansão isentrópica. A eficiência isentrópica será conforme a equação 6:

$$\eta_{is} = \frac{\Delta T}{\Delta T_{is}} \quad (6)$$

3.2.2 Balanço de massa e energia

Do balanço de massa temos:

$$\dot{m}_e = \dot{m}_Q + \dot{m}_F \quad (7)$$

$$\dot{m}_e h_e = \dot{m}_Q h_Q + \dot{m}_F h_F \rightarrow h_e = \frac{\dot{m}_Q}{\dot{m}_E} h_Q + \frac{\dot{m}_F}{\dot{m}_E} h_F \quad (8)$$

$$Mas C_F = \frac{\dot{m}_F}{\dot{m}_E} e 1 - C_F = \frac{\dot{m}_Q}{\dot{m}_E} \quad (9)$$

Logo:

$$C_F = \frac{T_e - T_Q}{T_F - T_Q} \quad (10)$$

3.2.3 Capacidade de refrigeração

Para a capacidade máxima de refrigeração, consideramos a temperatura ambiente como limite:

$$Q_{ref} = \dot{m}_F (h_\infty - h_F) \quad (11)$$

Mas:

$$h = cpT \quad (12)$$

Logo:

$$Q_{ref} = \dot{m}_F cp (h_\infty - T_F) \quad (13)$$

O trabalho consumido por um compressor isentrópico para levar a pressão ambiente para a pressão desejada na equação 7:

$$W_{comp}|_{iso} = \dot{m} (h_s - h_e) \quad (14)$$

Sendo h_s a entalpia de saída e h_e a entalpia de entrada no compressor. Novamente, podemos reescrever a equação 8 em função da temperatura:

$$W_{comp}|_{iso} = \dot{m} c_P (T_s - T_e) \quad (15)$$

Aplicando as equações isentrópicas, podemos reescrever a variação de temperatura em função da variação de pressão:

$$\frac{T_s}{T_e} = \left(\frac{P_s}{P_e} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (16)$$

Logo:

$$W_{comp}|_{iso} = \dot{m} c_p T_e \left[\left(\frac{P_s}{P_e} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (17)$$

A eficiência da parte de refrigeração será calculada pelo coeficiente de performance (COP) isentrópico:

$$COP_R|_{iso} = \frac{Q_{ref}}{W_{comp}} = \frac{\dot{m}_F c_p (T_\infty - T_F)}{\dot{m} c_p T_e \left[\left(\frac{P_s}{P_e} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} \quad (18)$$

O termo $\frac{\dot{m}_F}{\dot{m}}$ é a fração fria C_F .

Logo:

$$COP_R|_{iso} = C_F \frac{(T_\infty - T_F)}{T_e \left[\left(\frac{P_s}{P_e} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} \quad (19)$$

Considerando a eficiência isentrópica do processo de compressão η_c , chega-se a

$$W_{comp} = \frac{W_{comp}|_{iso}}{\eta_c}.$$

Assim:

$$COP_R = \frac{Q_{ref}}{W_{comp}|_{iso}} \eta_c \quad (20)$$

3.3 Resultados obtidos

A partir dos testes e desenvolvimentos chegou-se aos seguintes resultados exibidos na tabela 6.

Tabela 6 Resultados.

P [bar]	T^∞	TE [K]	TQ [K]	TF [K]	ΔTq [K]	ΔTF [K]	ΔT	ΔT_{iso} [K]	η [%]	CF [%]	$COPR _{iso}$	$COPR$ ($\eta = 0,8$)
3	303	291,95	303,2	274,4	11,2	17,6	28,8	78,65	36,62	38,89	0,10019	0,08
4	303	291,95	303,7	272,8	11,7	19,2	30,9	95,48	33,36	37,86	0,078	0,063
6	303	291,95	306,2	266,6	14,2	25,4	39,6	117	33,85	35,86	0,065	0,052

Fonte: Autoria própria.

Foi obtido resultados interessantes como um decréscimo de temperatura máximo de 25,4°C que tem um grande potencial de aplicação, além de resultados semelhantes a obtidos em outros trabalhos já citados no decorrer deste trabalho.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos por este trabalho chegaram há algumas conclusões interessantes sobre o componente relatadas na sequência como no início do estudo foi determinado algumas metas tais como a resolução da instabilidade térmica e a quantificação dos limites e capacidades do dispositivo, ambos foram satisfeitos e além disso observados pontos e características interessantes do tubo de vórtices, que podem ser explorados.

A correção da instabilidade do dispositivo, afetava a temperatura fria após um minuto de funcionamento, produzindo grande oscilação e um aumento gradativo na temperatura fria foi corrigida com sucesso, se tratava de um defeito mecânico corrigido com um simples procedimento de refazer a rosca de fixação na válvula de controle de fluxo.

A nova rosca feita apresenta maior ajuste entre o parafuso e a porca, o que corrigiu a instabilidade que era causada pela variação na válvula de controle que causava uma desordenação nos fluxos, a mistura entre o vórtice frio que segue pelo centro do tubo e do vórtice das extremidades causavam tal efeito.

A correção da instabilidade, apesar de apresentar-se a curto prazo, pouco mais que um minuto de acordo com os fabricantes do tubo, foi posta a prova em um teste superior de 7 minutos que pode se mostrar perfeitamente nos gráficos. Após a correção além dos testes semelhantes aos anteriores de 7 minutos também foram feitos testes de uma hora, o que constatou que realmente de fato estava corrigido.

Os resultados obtidos após a correção são satisfatórios em comparação aos resultados coletados anteriormente pois a temperatura fria se mostrou estável apesar de apresentar uma variação pequena de dois graus celsius tanto para mais como para menos, a temperatura fria atingiu valores bem menores em comparação aos valores pré-correção chegando a registrar uma temperatura mínima de $-10,4^{\circ}\text{C}$ que chega ser extremamente expressiva em comparação aos trabalhos mencionados anteriormente.

De maneira geral, a temperatura fria teve uma variação maior em relação à temperatura do ar comprimido admitido, chegou a registrar um decréscimo acima de 20°C , o que é bastante interessante.

Tais características abre uma série de possibilidades para futuros trabalhos, servem como ferramentas para novos estudos que se possam ser feitos com o tubo de vórtices.

A principal variável dos testes foi a pressão, variável essa que foi alternada entre três valores, 4, 5, e 6 bar e foi facilmente retratada por meio de gráficos que relacionam a pressão com a temperatura que sua variação impacta diretamente nas temperaturas obtidas, deixando

claro que essa é a variável mais importante no processo, que somente trabalhando sua variação conseguimos valores de temperaturas frias diferentes.

Utilizando a pressão máxima da rede, o tubo atingiu seu ápice na temperatura fria de $-10,4^{\circ}\text{C}$, em um teste com coleta de dados de 30 em 30 segundos, porém só conseguiu a manter por pouco tempo e logo retornou a sua capacidade estável que pode ser considerada nominal.

Em todos os testes por mais que se mostrem estáveis em uma faixa de temperatura há uma pequena variação que não ultrapassam a variação média de $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

O tubo tende se estabilizar dentro dos cinco minutos iniciais atingindo uma temperatura “nominal” que pode ser utilizada como temperatura de trabalho para dimensionamento em futuras aplicações práticas e tende no decorrer do tempo reduzir seu intervalo de variação se tornando cada vez mais estável, mas esse intervalo nunca deixa de existir.

Foi possível construir uma modelagem, e construir uma forma de relacionar as variáveis envolvidas no processo, e colocar em números dados importantes sobre o dispositivo.

Agora a partir da formulação desenvolvida neste trabalho é possível estimar informando as variáveis e condições aplicadas a temperatura fria que pode ser atingida por esse dispositivo em específico.

A parte quente do tubo, não tem sua variação totalmente proporcional a variação na parte fria, o que não foi estudado, mas foi levantado uma hipótese que possa ter haver com a temperatura do tubo, que tende aumentar no durante o funcionamento.

Outra sugestão para futuros trabalhos é estudar a influência da geometria na eficiência do tubo, nesse projeto devido a limitação nos processos de fabricação não pode ser testado mais variações geométricas para que se possa realizar esse estudo.

A maior diferença de temperatura é de $25,4^{\circ}\text{C}$ na seção fria e de $14,2^{\circ}\text{C}$ na seção quente.

Com o aumento da pressão de entrega a eficiência reduziu. A máxima eficiência foi de 36,6%

A fração de ar frio nos experimentos realizados foi de, no máximo $\text{CF}=38,89\%$, bem menor que o valor sugerido de 80% para maior capacidade de refrigeração.

Por não se tratar de um ciclo, o tubo demonstra uma ineficiência quando se trata de refrigeração de um ambiente.

Por atingir um decréscimo de temperatura em relação a temperatura do ar admitido o tubo de vórtices se mostra uma alternativa bastante viável a refrigeração pontual.

O aumento da fração de ar frio está relacionado a ajustes na válvula de saída de ar. Os resultados de variação de temperatura e eficiência estão condizentes com os apresentados. Apesar das dimensões do tubo.

Para os próximos trabalhos, o foco deve ser nas aplicações uma vez que as ferramentas matemáticas desenvolvidas neste trabalho podem ser de valor para que se possam estimar sua eficiência.

REFERÊNCIAS

- AL KARGILIS, P. E. **Design & Development of Automotive Air Conditionig Systems**. Munich: University Consortium for Continuing Education, 1996.
- ALBUQUERQUE, F. M. **Projeto e fabricação do tubo de Ranque-Hilsch**. Goiânia: EMC/UFG, 2017.
- BARBOSA, J. C. **Modelagem Matemática: O que é? Por que? Como?**. Veritati, n. 4, p. 73-80, 2004.
- BUCHELT, Erinson Danilo et al. **PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM TUBO DE VÓRTICE**. Teresina: XXIII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, 2016
- COCKERILL, T. **Fluid Mechanics and Thermodynamics of a Ranque-Hilsch Vortex Tubes** . 1998. 294p. Dissertação (Mestrado). Universidade de Cambridge. Cambridge, 1998.
- FORREST, W.; BHATTI, M. **Energy efficient automotive air conditioning system**. Detroit: PROGRESS IN CLIMATE CONTROL TECHNOLOGIES. SAE 2002 World Congress, 2002.
- FULTON, C. D. **Ranque's tube**. Journal of the ASRE, Refrigerating Engineering, 1950.
- GAO, C. **Experimental study on the Ranque-Hilsch vortex tube**. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, China, 2005. 151 p.
- GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- GIMENEZ, Rogério Reder; FELIX, Victor Barbosa; TRIBESS, Arlindo, **Avaliação do nível de conforto térmico global e local em automóveis com ar condicionado utilizando manequim**. XV Congresso e Exposições Internacionais da Tecnologia da Mobilidade, SAE, São Paulo, 2006.
- GROOVER, Mikell P. **Automação Industrial e Sistemas de Manufatura**. [s.l]: Pearson Prentice Hall, 2010.
- HILSCH, R. **The Use of the Expansion of Gases in a Centrifugal Field as Cooling Process. Review of Scientific Instruments**, v. 18, n. 2, p. 108-113, 1947.
- KAYNAKLI, O; HORUZ, I. **An experimental analysis of Automotive Air Conditioning System**. [s.l]: International Community of Heat and Mass Transfer, Vol. 30, N.2, p. 273-284, 2003.
- LIMA, F. P. A. **Considerações a respeito da base tecnológica da Engenharia de Produção**. Belo Horizonte: Texto para discussão, 1996.
- MACHADO, Álisson Rocha. ABRÃO, Alexandre Mendes. COELHO, Reginaldo Teixeira. SILVA, Márcio Bacci da. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Blucher, 2011.

MCGEOUGH, J. A. **Advanced Methods of Machining**. [s.l]: Springer Science & Business Media, 1988.

MORAN, M.; SHAPIRO, H. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 5. ed. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2004, 874.

NISS, M. **Issues and problems of research on the teaching and learning of applications and modelling**. Chichester: Ellis Horwood, 2001.

RANQUE, Georges-Joseph. Experiences sur la detente giratoire avec productions simultanees d'un echappement d'air chaud et d'air froid. [s.l]: **Le journal de physique et le Radion**, 1933

SACAMOTO, Flávio S. **Sistema de ar condicionado automotivo**. [s.l]: Treinamento Delphi: Piracicaba, 2006.

SAIDI, M.; VALIPOUR, M. **Experimental modeling of vortex tube refrigerator**. [s.l]: Applied Thermal Engineering, 2003.

SIMMONS, Colin H., MAGUIRE, Dennis E., PHELPS, Neil. **Manual of Engineering Drawing**: a guide to ISO and ASME standards. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2009.

STEPHAN et al. **A similarity relation for energy separation in a vortex tube**. [s.l]: International Journal of Heat and Mass Transfer, 1984.

FERRARI, Trujillo A. **Metodologia da ciência**. Rio de Janeiro: Kennedy, 1974.