

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

APERFEIÇOAMENTO DE TUBOS DE VÓRTICES PARA OPERAÇÃO EM BAIXAS PRESSÕES E POSSÍVEL ACIONAMENTO POR MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Thales Silva Ximenes de Aragão, tsximenes@gmail.com
Ully Beatriz Albuquerque Sousa, ullybeatriz@hotmail.com
Paulo Alexandre Costa Rocha, paulo.rocha@ufc.br
Maria Eugênia Vieira da Silva, eugenia@ufc.br
Diego Caitano de Pinho, diegopynho@gmail.com

Universidade Federal do Ceará, Avenida Mister Hull s/n- Pici, Cep: 60455-760, Fortaleza-CE

Resumo: O tubo de vórtice foi inventado em 1933 pelo físico francês Georges J. Ranque. O físico alemão Rudolf Hilsch melhorou o projeto e publicou em 1947, dando um nome para o dispositivo. É um equipamento que permite a produção de ar frio quando ar comprimido escoar tangencialmente para dentro da câmara de vórtice através de uma entrada estreita. Ele tem sido largamente utilizado nos campos de esfriamento industrial, como no resfriamento de partes de máquinas e de cabines, arrefecimento de alimentos e outras aplicações. O projeto, realizado no Laboratório de Refrigeração e Ar Condicionado do Departamento de Engenharia Mecânica da UFC, tem como finalidade o aperfeiçoamento desse tubo e o possível acionamento do compressor por módulos fotovoltaicos, esse último precisando de um estudo detalhado, visando saber o custo-benefício de sua instalação. A motivação principal do trabalho está na necessidade de operação em baixas pressões, que proporciona um menor consumo de energia elétrica para a produção de ar comprimido e, conseqüentemente, a possibilidade de acionamento pelos módulos fotovoltaicos. O tubo possui as seguintes partes: um ou mais bocais de entrada, uma câmara de vorticidade, um tubo para condução do ar quente, um tubo para condução de ar frio, uma válvula de controle para a saída de ar quente, e há ainda um compressor que vai alimentar o tubo. Ar comprimido entra na câmara de vorticidade e depois se divide em dois fluxos, um se desloca pelo lado maior do tubo, sendo essa a extremidade quente, ao encontrar a válvula reguladora uma parte desse ar volta e sai pela extremidade fria, tudo isso ocorrendo sem quaisquer partes móveis. Até hoje não há nenhuma teoria bem clara que possa explicar o fenômeno de separação de energia que ocorre dentro do tubo. Alguns aspectos podem influenciar na eficiência do tubo, como o número de bocais na câmara de vorticidade. Em testes realizados com 4 e 6 bocais, descobriu-se que as temperaturas máximas e mínimas alcançadas foram maiores com o tubo de 4 bocais. Para o tubo com 4 bocais as temperaturas máximas e mínimas alcançadas foram respectivamente 107,3°C e 0,1°C, enquanto que para o de 6 bocais as temperaturas máximas e mínimas obtidas foram 71°C e 5,2°C. Outro fator que influencia é a pressão do ar que está entrando no tubo, e também pelos testes foi possível ver que com o aumento da pressão a temperatura também aumenta. No tubo com 4 bocais, operando a 1 bar, as temperaturas alcançadas foram de 59,3°C e 17,4°C, para o mesmo tubo, porém operando a 2 bar, as temperaturas obtidas foram 72,5°C e 13,4°C, e assim sucessivamente de acordo com que se aumentava a pressão.

Palavras-chave: tubo de vórtice, aperfeiçoamento, fotovoltaico

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de refrigeração mais usados atualmente utilizam o conceito de operação do ciclo termodinâmico de compressão a vapor, sendo necessários para isso componentes básicos, tais como fluido refrigerante, trocadores de calor e compressor. No entanto, essa tecnologia tradicional de refrigeração apresenta problemas relativos aos danos ambientais provocados pelos fluidos refrigerantes e ao crescente aumento no consumo mundial de energia elétrica. Por isso o tubo de vórtice tem diversas vantagens, pois além de suas aplicações na indústria de refrigeração, ele não polui o ambiente com os conhecidos gases refrigerantes CFCs e HCFCs, causadores do efeito estufa, que conseqüentemente agravam os efeitos do aquecimento global, que é o processo de aumento da temperatura média dos oceanos e do ar perto

da superfície da Terra, causado pelas emissões humanas de gases do efeito estufa, amplificado por respostas naturais a esta perturbação inicial. Além disso, o tubo de Vórtice tem um baixo custo e facilidade de manutenção.

Diante da alta demanda de energia mundial, esse dispositivo também tem como vantagem o baixo consumo de eletricidade. Com um fornecimento comum de ar comprimido como fonte de energia, os tubos de vórtice criam dois fluxos de ar, um quente e um frio. Ele pode produzir temperaturas de -46 a 127°C . Entre suas aplicações estão a fixação de fundição quente e o esfriamento de controles eletrônicos, de operações em máquinas, partes de soldagem, amostras de gases, componentes eletrônicos, lacres quentes e câmaras ambientais.

O desenvolvimento de novas tecnologias é de grande importância justamente para diminuir as agressões ao meio ambiente por parte dos poluentes. Esse tubo é um dispositivo que opera através da introdução de um fluxo de ar comprimido e apresenta a vantagem de não se utilizar trocadores de calor nem fluidos refrigerantes, além de ser pequeno, leve, sem eletricidade ou química, livre de manutenção, barato e sem partes móveis.

Ele gera dois fluxos de ar em sentidos opostos, um quente e um frio. Os tubos de vórtice são dispositivos que trabalham em um padrão de fornecimento de ar comprimido. O ar entra no tubo e, literalmente, divide o fluxo de ar em duas partes: o ar frio em uma extremidade, e ar quente na outra tudo sem quaisquer partes móveis. Tubos de vórtice têm uma válvula no final da saída de ar quente que controla o volume de fluxo de ar na extremidade de ar quente. Ao ajustar a válvula, controla-se a fração de ar frio que sai pela outra extremidade.

Portanto, esse projeto tem por finalidade aperfeiçoar novos tubos de vórtice para operação em baixas pressões e acionamento por módulos solares fotovoltaicos, dando continuidade aos trabalhos que já foram realizados no Laboratório de Refrigeração e Ar Condicionado do Departamento de Engenharia Mecânica da UFC.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Princípios de Funcionamento

Os tubos de vórtice, também conhecidos como Tubos de Ranque-Hilsch é um dispositivo sem partes móveis, que possibilitam a divisão de um fluxo principal de fluido em dois fluxos secundários de vazões e temperaturas distintas. Fisicamente, tal dispositivo consiste em um tubo cilíndrico dotado de uma entrada de fluido, posicionada de forma que o fluxo entre no dispositivo radialmente, tangenciando a face interna do tubo.

O tubo de vórtice geralmente possui as seguintes partes: um ou mais bocais de entrada, uma câmara de vórtices, um tubo para condução de ar quente, um tubo para a condução de ar frio, um diafragma, uma válvula de controle no final do tubo quente.

A Fig. 1 mostra um esquema de como o fluxo se comporta dentro do tubo.

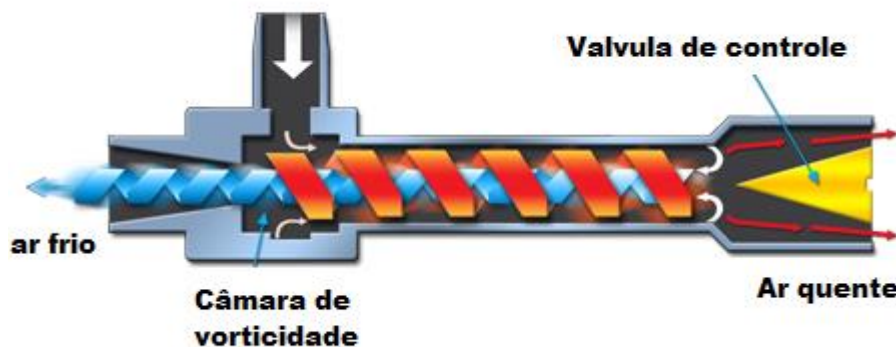


Figura 1. Esquema interno de como o fluxo de ar se comporta dentro do tubo

2.2 Primeira Lei da Termodinâmica

Com a 1ª Lei da Termodinâmica, verificou-se que a fração fria é um parâmetro que pode ser determinado pela relação entre as diferenças das temperaturas de saída quente e temperatura de entrada, de acordo com a equação (1), retiradas da literatura, a seguir:

$$\varepsilon = \frac{\Delta T_h}{\Delta T_{hc}} = \frac{T_h - T_g}{T_h - T_c} \quad (1)$$

Assim também, o balanço de massa possui uma razão com a qual é possível saber os valores de fluxo de ar frio e quente que sai do tubo.

A equação (2) representa a aplicação do balanço de massa aplicado ao tubo de vórtice:

$$\dot{m}_g = \dot{m}_h + \dot{m}_c \quad (2)$$

A fração de ar frio é definida pela Eq. (3):

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_g} \quad (3)$$

Com essas equações podem-se determinar as vazões mássicas de ar na extremidade fria e quente em função da vazão mássica de ar de entrada.

3. METODOLOGIA, INSTALAÇÃO E EXPERIMENTOS

Até hoje não se tem uma explicação bem clara sobre o funcionamento do tubo de vórtice, por isso algumas leis da termodinâmica foram utilizadas para auxiliar no projeto. Aplicando o balanço de massa para o volume de controle como sendo o tubo de vórtice, puderam-se obter relações entre as vazões mássicas na entrada e nas saídas, utilizando o conceito de fração de ar frio, que representa a relação entre a massa que sai pela extremidade fria do tubo e a massa de ar de entrada.

Inicialmente foram testados os tubos fabricados no projeto de sistema de refrigeração por tubos de Ranque-Hilsch com abastecimento de instalação de ar comprimido para alimentação com fonte solar fotovoltaica já realizado no Laboratório de Refrigeração e Ar Condicionado. Em seguida foram analisados os resultados obtidos e os que já haviam sido obtidos anteriormente para efeito de comparação, sendo possível comprovar que o tubo de quatro bocais é o mais eficiente. Uma nova câmara de vorticidade com quatro bocais foi fabricada. O desenho foi feito em um programa de CAE e fabricado através de maquinário próprio para a construção desse material. O novo tubo foi testado em pressões de um a quatro bar, os dados de temperatura foram coletados instantaneamente através de um datalogger.

Através da análise dos resultados obtidos foi possível identificar diferenças entre os resultados obtidos e resultados antigos. Os valores de pressões e temperaturas de entrada e saída o tubo foram coletados através de um datalogger. Esses valores servirão de base para a utilização das equações termodinâmicas, para com isso permitir a obtenção da fração de massa fria que sai do tubo. Na figura 2 pode-se ver o novo tubo fabricado.



Figura 2. Tubo de vórtice utilizado nos testes

4. RESULTADOS

Os testes foram feitos com dois tipos de entradas de ar, um de 4 e outro de 6 bocais de entrada. As pressões testadas variaram de 1 a 6 bar. Através das figuras a seguir é possível ver que os melhores resultados foram obtidos quando o tubo utilizou os 4 bocais. Esse resultado confirma o que já foi estudado anteriormente no Laboratório de Refrigeração e Ar Condicionado da UFC. Em testes realizados com o tubo de 4 bocais e a pressão de 4 bar foi possível chegar a resultados como $-4,1^{\circ}\text{C}$ na saída fria e $57,1^{\circ}\text{C}$ na saída quente, sendo esses os melhores resultados obtidos quando esse tipo de bocal foi utilizado. Esse diferencial de temperatura pode aumentar a partir da influência de outros fatores, como aumento de pressão, tamanho do tubo, válvula de controle, entre outros. Através do desenvolvimento do novo tubo foi possível ver como esses fatores influenciam no funcionamento do mesmo.

Além disso, percebe-se que à medida que a pressão aumenta, a diferença entre a temperatura de ar quente e frio vai aumentando.

O gráfico apresentado na Fig. 3 são de temperaturas nas saídas de ar quente e frio do tubo e da diferença entre elas.

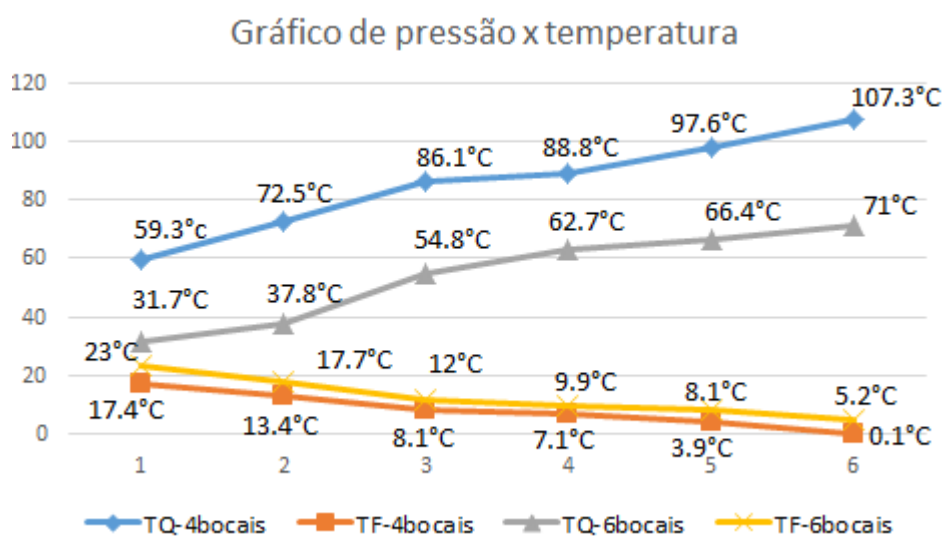


Figura 3 . Imagem do gráfico de pressão x temperatura com 4 e 6 bocais de entrada

Como pode ser visto pelo gráfico, com o aumento da pressão o diferencial de temperatura aumenta. Além disso, os tubos de 4 bocais tiveram maior faixa de temperatura do que o tubo que utilizou 6 bocais, tendo uma diferença de $107,2^{\circ}\text{C}$ para o tubo de 4 bocais, enquanto que o de 6 bocais teve algo em torno de $65,8^{\circ}\text{C}$.

Como já foi citado antes, não há uma explicação exata para o fenômeno que ocorre no tubo para que exista essa diferença tão grande de temperatura, porém pode-se entender sobre alguns fatores que podem aumentar essa diferença, como o comprimento do tubo. Para dois tubos de diâmetros constantes e comprimentos diferentes, a maior variação será gerada no tubo de comprimento menor. Outro fator é a pressão; como já foi mostrado anteriormente. Há ainda o comprimento do bico da câmara de vorticidade que é por onde o ar entra, para comprimentos de bico maiores as variações de temperatura aumentam.

Uma das vantagens do tubo de vórtice fabricado no Laboratório é que ele tem um baixo custo de fabricação e consumo de eletricidade, e ainda tem a facilidade na sua manutenção, o que faz dele um equipamento de baixo custo.

5. CONCLUSÃO

A partir do apresentado, foi possível iniciar o entendimento e promover o aperfeiçoamento do tubo e através disso a sua possível utilização no mercado, custando cada vez menos. Os objetivos de aperfeiçoamento do tubo e o estudo do seu funcionamento foram conseguidos. O dimensionamento fotovoltaico para o seu acionamento foi estudado e segue em avaliação, pois é necessário que seja feita uma análise de custo benefício de sua utilização. Como estes sistemas podem ser caros, podem não ser viáveis economicamente para o projeto. Alguns testes continuam sendo

feitos a fim de concluir os estudos e possibilitar o cálculo das massas de ar que entram e saem pelas saídas quente e fria, além do cálculo da eficiência do tubo fabricado no laboratório.

É importante notar que a principal motivação do projeto tem sido dar continuidade aos trabalhos que já vêm sendo realizados, como foi citado anteriormente, de tal forma que esses projetos sejam melhorados. Isto pode ser comprovado com aprofundamento na discussão de resultados. Quando comparado aos antigos resultados, a diferença de temperatura no tubo de vórtice fabricado anteriormente e o atual, os valores são maiores para o atual, o que indica que ele foi aperfeiçoado a partir de um projeto já idealizado a priori.

Vale notar ainda que o equipamento se mostra como uma ótima alternativa para os sistemas de refrigeração que utilizam gases do efeito estufa, pois ele não utiliza no seu funcionamento estes gases que prejudicam o meio ambiente.

Como base em alguns trabalhos foi possível obter em medições experimentais, temperaturas abaixo do ponto de congelamento da água por meio da combinação de diferentes fatores, possibilitando que esse sistema de climatização seja utilizado de maneira eficiente e sem gerar grandes gastos de energia (Oseas Carlos da Silva).

6. AGRADECIMENTOS

Ao LESGN, à UFC e ao CNPq pelo espaço onde os testes foram realizados, aos orientadores que auxiliaram e sanaram as dúvidas e ao financiamento para a compra de materiais.

7. REFERÊNCIAS

SILVA.O.C. Sistema de refrigeração por tubos de Ranque- Hilsch com abastecimento de instalação de ar comprimido para alimentação com fonte solar fotovoltaica. 2013. Dissertação de Mestrado – UFC, Fortaleza

MORAN, MICHAEL J, SHAPIRO, HOWARD N. Princípios de Termodinâmica para Engenharia. LTC, 4 ed. 2002.

HILSCH, R. The Use of Expansion of Gases in a Centrifugal Field as a Cooling Process. Rev Sci Instrum 18(2). 1947.

GAO C. Experimental Study on the Ranque-Hilsch Vortex Tube. PhD Thesis, Technische Universiteit Eindhoven. 2005.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(is) pelo conteúdo deste trabalho.

VORTEX TUBES ENHANCEMENT TO OPERATE AT LOW PRESSURES AND POSSIBLY BE DRIVEN BY PHOTOVOLTAIC MODULES

Thales Silva Ximenes de Aragão, tsximenes@gmail.com
Uly Beatriz Albuquerque Sousa, ulybeatriz@hotmail.com
Paulo Alexandre Costa Rocha, paulo.rocha@ufc.br
Maria Eugênia Vieira da Silva, eugenia@ufc.br
Diego Caitano de Pinho, diegopinho@gmail.com

Universidade Federal do Ceará, Avenida Mister Hull s/n- Pici, Cep: 60455-760, Fortaleza-CE

Abstract. Vortex tubes were invented in 1933 by the French physicist Georges J. Ranque. Another physicist, a German, Rudoulf Hilsch, improved the prototype and published it in 1947, naming the device. It's an equipment which allows the production of cold air when compressed air flows tangentially towards the inside of a vortex chamber through a narrow entrance. It has been widely used in industrial cooling fields, as in cooling of machine parts and booths, cooling food and other applications. The present project, conducted in the Laboratory of Refrigeration and Air Conditioning of the Mechanical Engineering Department of the Federal University of Ceará (UFC), aims to enhance this tube and the possibility of the compressor to be driven by photovoltaic modules, the latter requiring detailed studies in order to estimate the cost-effectiveness of its installation. The main motivation for this project is in the need for operation at

lower pressures, which provides a lower electric power consumption for production of compressed air, and consequently the possibility to drive it by PV modules. The tube has the following parts: one or more inlet nozzles, a vortex chamber, a pipe for hot air conduction, a tube for cold air conduction, a control valve for the hot air outlet, and also a compressor which feeds air to the tube. Compressed air enters the vortex chamber and then it's divided into two streams, one moves through the longest side of the pipe, that being the hot end. When it finds the control valve, part of this air returns and exits through the cold end, all of this occurs without any moving parts. To date, there is no clear theory that can explain the phenomenon of energy segregation that occurs inside the tube. Some aspects may influence the efficiency of the tube, such as the number of nozzles in the vortex chamber. In tests conducted with 4 and 6 nozzles, it was found that the maximum and minimum temperatures achieved were higher with the 4-nozzles tube. For the tube with 4 nozzles, the maximum and minimum temperatures reached were respectively 107.3 °C and 0.1 °C, while for the 6-nozzles tube the maximum and minimum temperatures obtained were 71 °C and 5.2 °C. Another influencing factor is the pressure of the air entering the tube. Through the tests was also possible to observe that with an increasing pressure the temperature also increases. At the tube with 4 nozzles, operating at 1 bar, temperatures achieved were 59.3° C and 17.4° C. For the same tube, but operating at 2 bar, the obtained temperatures were 72.5° C and 13.4° C, and so on according to that increased pressure.

Keywords: vortex tube, enhancement, photovoltaic