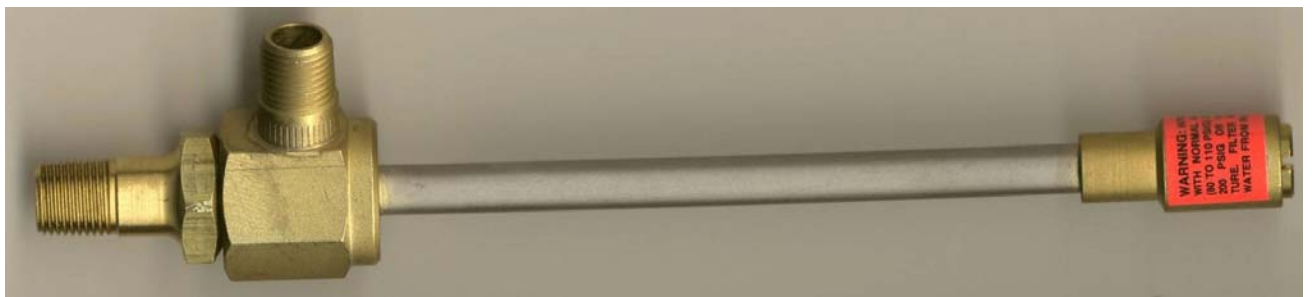




Princípio de Funcionamento dos Tubos Vortex e Notas sobre Aplicações





Índice

História	3
Movimento do ar num Tubo Vortex	3
Desempenho dos Tubos Vortex	4
Efeitos da Separação de Temperatura num Tubo Vortex	5
Efeito da Temperatura de Entrada	5
Usando a Tabela de Desempenho	6
A Fórmula de Equilíbrio Térmico	6
Efeitos da Humidade	7
NOTAS DE APLICAÇÃO	8
A Alimentação de Ar	8
Preparação do Ar	9
Afinações	9
Utilização do Ar Frio	9
Redução do Ruído	10
Manutenção	10
APÊNDICE	11
Calibre da Linha de Ar Comprimido	11
Capacidade dos Tubos Vortex	11
Escolhendo um Tubo Vortex	11
Fluxo de Ar	12
Potência de Ar Condicionado	12
Tubo Vortex Modelo 106	13
Versões do Tubo Vortex 106	13



História

Entre as muitas contribuições para a Ciência feitas pelo físico James Clerk Maxwell no Século XIX conta-se a Lei da Distribuição Aleatória que se aplica a fluidos.

Considerando o caso de uma caixa fechada, imóvel, contendo um gás, a temperatura a que o gás se encontra é devida ao movimento das moléculas de gás dentro da caixa. Uma vez que a caixa está parada, a soma (vectorial) das velocidades das moléculas de gás dentro da caixa tem que ser zero.

Em essência, a Lei de Maxwell da Distribuição Aleatória diz que para cada molécula de gás animada de movimento numa direcção a uma velocidade dada, tem que existir uma molécula de gás animada da mesma velocidade, porém na direcção oposta à molécula anterior.

Diz ainda que se a temperatura do gás aponta para uma velocidade média dada, o número de moléculas que se move a uma velocidade maior que a média deve ser igual ao número de moléculas que se move a velocidade menor.

O efeito do Tubo Vortex (ou Vórtice) foi observado pela primeira vez pelo estudante de Física Francês Georges G. Ranque, cerca de 1930. Além de patentear o seu invento ele constituiu, sem sucesso, uma pequena empresa para a sua exploração.

Apresentou uma comunicação em 1933 sobre o Tubo Vortex à sociedade científica em França, que a recebeu com desinteresse e desconfiança.

A partir daí o Tubo Vortex caiu no esquecimento durante alguns anos, até que, no decurso da segunda Grande Guerra o físico Rudolph Hilsch, então a estudar dispositivos de refrigeração integrado no esforço de guerra Alemão, estudou e ensaiou alguns protótipos executados por G. Ranque, tendo publicado os resultados dos seus ensaios nos meados dos anos 40.

A comunicação de Hilsch foi agora recebida com muito interesse. De tal modo que muitos dos leitores pensaram que tinha sido Hilsch a descobrir o dispositivo, que passou a chamar-se “Tubo de Hilsch”.

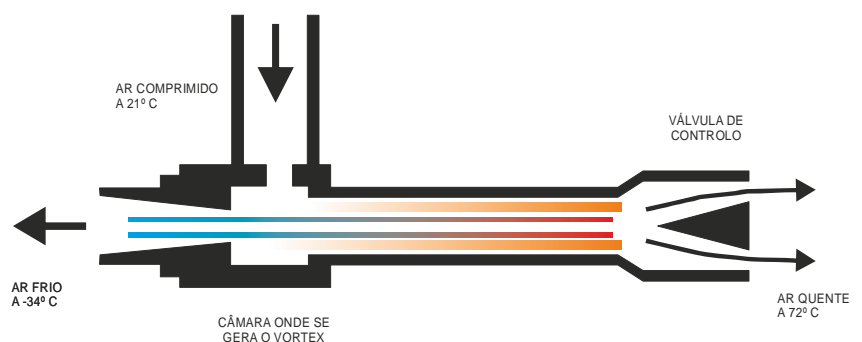
Desde então o Tubo Vortex passou a ser muito mais bem conhecido dos técnicos. Tem-se assistido a um pequeno mas constante aumento de pesquisa e publicações sobre esse assunto no mundo inteiro. Já foram publicados bem mais de cem estudos sérios em jornais científicos e de engenharia, porém de forma dispersa, de modo que é difícil reunir mais que uma pequena fracção desses estudos. Muitos comentários e artigos não especializados têm sido publicados. Muitas escolas de engenharia bem como grupos científicos e industriais estão a trabalhar no Tubo Vortex.

Hoje em dia os Tubos Vortex servem num largo espectro de aplicações industriais, incluindo unidades de refrigeração, arrefecimento de equipamento eléctrico e electrónico e em muitas aplicações de processo com refrigeração.

Movimento do ar num Tubo Vortex

Apresenta-se abaixo um desenho esquemático de um Tubo Vortex mostrando a disposição interna bem como os nomes comuns de certas características importantes.

O ar comprimido passa pelo tubo de admissão onde alcança o espaço anular à volta do gerador. Passa depois pelos injectores, onde perde parte da sua pressão enquanto se expande, atingindo a velocidade do som ou próxima da velocidade do som, animado de movimento de





rotação de até 1.000.000 r.p.m. Os injectores estão dispostos de modo que o ar é injectado tangencialmente à circunferência da câmara de geração do vórtice. Todo o ar sai da câmara de geração do vórtice para o tubo quente. O ar faz esta escolha (entre as extremidades quente e fria) porque a abertura para tubo quente é sempre maior do que a saída para o tubo frio (no centro do gerador). A força centrífuga mantém o ar junto à parede do tubo quente à medida que este se desloca na direcção da válvula na extremidade.

Quando o ar alcança a válvula a sua pressão é algo menor do que a pressão nos injectores, mas superior à pressão atmosférica (assumindo que a saída fria está à pressão atmosférica). *Verifica-se sempre que a pressão imediatamente antes da válvula é mais elevada do que a pressão no ponto de exaustão do ar frio.*

A posição da válvula determina a quantidade de ar que sai pela extremidade quente. Para que exista separação calor-frio, a válvula deve deixar sair apenas parte do ar. O ar restante é forçado para o centro do tubo quente, onde, continuando a rodar, se move para trás, na direcção da saída fria. Ele percorre sucessivamente toda a extensão do tubo quente, através do centro da câmara onde se gera o vórtice, até alcançar a saída fria.

Recorde-se que a corrente original de ar no tubo quente não ocupou o centro do tubo devido à força centrífuga. Portanto define um percurso ideal para a corrente de ar interior seguir. Isto, combinado com a mencionada diferença de pressão entre a válvula e a saída fria, constitui a razão para a existência de duas correntes giratórias no mesmo sentido, uma dentro da outra, mas que se movem em direcções lineares opostas dentro do tubo quente.

Desempenho dos Tubos Vortex

Consoante a posição da válvula é alterada, assim mudam as proporções de ar quente e ar frio, mas o fluxo total de ar permanece inalterado. Deste modo a quantidade de ar que sai pela ponta fria pode ser amplamente variada para um dado Tubo Vortex. Esta quantidade de ar é conhecida como “fracção fria”.

Como se pode imaginar, um dos segredos de um bom projecto de um Tubo Vortex é evitar misturar qualquer parte da corrente interior (a fracção fria) com a corrente externa de ar quente. Se um tubo operar com uma fracção fria elevada, a passagem no centro do gerador precisa ser suficientemente grande para permitir a passagem do fluxo de ar frio. Caso contrário provocará que algum do ar frio seja deflectido do seu percurso e misturado com a corrente de ar quente, desperdiçando assim refrigeração. Com fracções frias baixas o resultado desejado é usualmente uma pequena corrente de ar muito frio. Uma saída muito grande convidará ao arrastamento de algum do ar quente circundante, aumentando a temperatura da saída fria.

Portanto para qualquer Tubo Vortex dado, com uma capacidade fixa de fluxo total, *existe um tamanho de abertura ideal para qualquer fracção fria*. Na prática, o utilizador de um Tubo Vortex querará usar normalmente um dos seguintes modos de operação: Ou refrigeração máxima (que ocorre quando a fracção fria atinge cerca de 70 %) ou a temperatura o mais baixo possível (que ocorre quando a fracção fria se fica por cerca de 20 %). Assim, a Vortec oferece casquilhos designados H (high) para fracção fria elevada, correspondentes a abertura óptima para refrigeração máxima e casquilhos designados L (low) para fracção fria reduzida, com a abertura óptima para criar as temperaturas mais baixas possível.

Cada um dos Tubos Vortec standard pode também usar geradores com diferentes capacidades de fluxo (expressas em CFM - Cubic feet per minute). Portanto é necessário oferecer casquilhos H e L para cada capacidade CFM, para um tubo dado. Desta forma os casquilhos são escolhidos baseados em dois parâmetros, capacidade e modo. Por isso se adopta a nomenclatura 2-H, 4-L, 8-H, etc.

O tubo modelo 328 é fabricado com vários geradores, bem como casquilhos, mas é tão raro que alguém queira um tubo tão grande para gerar temperaturas extremamente baixas, que nós não apresentamos as versões L na lista de preços. Todos os tubos constantes na lista têm casquilhos tipo H, mas os casquilhos tipo L podem ser fornecidos para encomendas específicas especiais.



Efeitos da Separação de Temperatura num Tubo Vortex

Até agora acompanhámos o movimento do ar num Tubo Vortex. Agora passamos a analisar porque é que o ar quente aquece e o ar frio arrefece.

Recorde-se que no tubo quente o ar tem um movimento complexo. Um anel exterior de ar move-se para a ponta quente, enquanto o núcleo interior de ar se move para a ponta fria. Ambas as correntes de ar rodam na mesma direcção. E, mais importante, ambas as correntes de ar rodam com a *mesma velocidade angular*. Isto acontece porque a turbulência intensa que existe na fronteira entre as duas correntes de ar e ao longo do curso das duas correntes de ar as bloqueia uma em relação à outra tornando-as numa única massa, no que respeita ao movimento rotacional.

De facto o termo correcto para a corrente interior será “*vórtice forçado*”. Isto é distinto de um “*vórtice livre*” na medida em que o seu movimento rotacional é controlado por alguma influência externa e não pela conservação do momento angular. No nosso caso é a corrente exterior de ar quente que força a corrente interior (fria) a rodar a uma velocidade angular constante.

Na situação que ocorre ao esgotar a água de uma banheira (que a maioria das pessoas associa com a palavra “vórtice”), forma-se uma vórtice livre. À medida que a água sai a sua velocidade de rotação aumenta para conservar o momento angular. A velocidade linear de qualquer partícula é inversamente proporcional ao seu raio. Assim, num **Vórtice Livre**, ao se mover do raio de 1 unidade na direcção do esgoto para um raio de $\frac{1}{2}$ unidade, uma partícula **dobra a sua velocidade linear** (tangencial). Num **Vórtice Forçado** com velocidade angular constante **a velocidade linear diminui** para metade quando a partícula se move no sentido do esgoto (ou da saída) de um raio de 1 unidade para um raio de $\frac{1}{2}$ unidade.

Portanto, para a situação descrita acima, a velocidade com que as partículas num vórtice livre chegam à saída com uma velocidade linear 4 vezes maior do que num vórtice forçado. Como a energia cinética é proporcional ao quadrado da velocidade linear, num vórtice forçado as partículas alcançam a saída com $\frac{1}{16}$ da energia cinética com que as partículas alcançam a saída no vórtice livre deste exemplo.

Para onde vai esta energia ($\frac{15}{16}$ da energia cinética total) reside o segredo do Tubo Vortex. A energia abandona o núcleo interior sob a forma de calor, que se transmite ao núcleo (ou anel) exterior.

Pode-se argumentar que o ar que está agora na corrente interior de arrefecimento teve antes que percorrer a corrente (quente) exterior de ar. Porque é que não aqueceu na mesma quantidade que está agora a arrefecer, sem nenhum efeito total de arrefecimento? Há no entanto que não esquecer que o caudal da corrente exterior é sempre maior do que na corrente interior, uma vez que parte da corrente exterior é descarregada pela válvula quente. Se as Calorias que saem da corrente interior igualem as Calorias adquiridas pela corrente exterior, a queda de temperatura da corrente interior tem que ser maior do que o aumento de temperatura da corrente exterior porque seu caudal é menor.

Se este conceito ficar claro no espírito, uma pequena reflexão permite compreender porque é que a temperatura da ponta quente aumenta com o aumento da fracção fria, e porque a temperatura da ponta fria baixa quando a fracção fria diminui.

Efeito da Temperatura de Entrada

É muito simples prever as quedas e aumentos de temperatura num Tubo Vortex para várias temperaturas do ar na admissão. A regra básica a ter em conta é que as quedas ou aumentos de temperatura *são proporcionais à Temperatura Absoluta de admissão*. Qualquer temperatura expressa em °C pode ser convertida em temperatura Absoluta (graus Kelvin) adicionando 273.

Isto é $0^{\circ}\text{C} = 273(,.)^{\circ}\text{K}$, ou $21^{\circ}\text{C} = 294^{\circ}\text{K}$.

Portanto toda a tabela se baseia numa temperatura de admissão de 294°K . Se a temperatura absoluta de admissão dobrar, o mesmo sucede à queda ou aumento de temperatura. Como exemplo suponha que se quer



calcular a queda de temperatura associada a um Tubo Vortex que opera com uma fracção fria de 30 % e com uma pressão de 7,03 Kg/cm² (100 psi), e Temperatura [(°F - 32) * 5/9] de 200° F <> 93° C na admissão.

1. A tabela indica uma Queda de Temperatura (°F * 5/9) de 118° F <> 65(,5...)° C para uma pressão de 100 psi <> 7 Kg/cm² e uma temperatura de 70° F <> 21(,1...)° C na admissão para um Tubo Vortex afinado para uma fracção fria de 30 %.

2. A relação de temperaturas de admissão absolutas é dada por

$$(93 + 273)/(21 + 273) = 1,245$$

3. A queda de temperatura será de 65,56 x 1,245 = 81,62° C

4. A temperatura da ponta fria é de 93 - 81,6 = 11,3° C

Esta relação pode ser usada igualmente quando a temperatura de admissão é inferior aos 21° C em que a tabela é baseada. Por exemplo, se a temperatura de admissão fosse -17,8° C a relação seria:

$$(-17,8 + 273)/(21 + 273) = 0,87$$

Neste caso a queda de temperatura é reduzida.

Exactamente o mesmo princípio pode ser aplicado para converter os Aumentos de Temperatura indicados na tabela. Serão maiores para temperaturas de admissão maiores que 21° C e menores para temperaturas de admissão abaixo de 21° C.

Deve-se fazer um comentário adicional sobre este método. O mesmo aplica-se apenas para a gama de pressões indicadas na tabela. Sempre que as pressões sejam consideravelmente maiores do que as consideradas na tabela o efeito de Joule Thomson já altera o resultado de modo apreciável. Este efeito é pequeno para pressões até 10 kg/cm² e pode ser ignorado, como no exemplo dado acima. O arrefecimento explicado pelo efeito de Joule Thomson é o arrefecimento muito ligeiro que ocorre quando os gases passam através de uma válvula.

Usando a tabela de desempenho

Duas limitações algo relevantes na tabela de desempenho (ver pág. 12) devem ser assinaladas.

Primeiro, a tabela parece levar à conclusão de que a as reduções e os aumentos de temperatura dependem da pressão de admissão. Isso não é exactamente verdadeiro. De facto essas variações estão relacionadas de modo complexo com a *relação absoluta de pressões* entre a admissão e a exaustão da saída fria. A tabela foi construída na presunção de que a *exaustão fria se encontra à pressão atmosférica*. Para qualquer outra pressão da ponta fria a tabela não pode ser usada.

Pode-se apreciar a variação das quedas e das subidas de temperatura se atentarmos quão rápido a relação de pressões absolutas muda com as variações de pressão da ponta fria. Uma pressão de admissão de 6,3 kg/cm² de manómetro, ou 7,4 kg/cm² de pressão absoluta, dá uma relação de 7 para 1 quando o tubo tem a sua exaustão à pressão atmosférica (0 kg/cm² de manómetro ou 1,05 kg/cm² de pressão absoluta). Se a pressão de entrada permanecer inalterada e a pressão da saída fria subir para 1,05 kg/cm², ou 2,1 kg/cm² de pressão absoluta, a relação de pressões cai para metade (3,5 para 1).

É possível efectuar os cálculos dos acréscimos ou abaixamentos de temperatura para pressões diferentes das indicadas na tabela mas os mesmos caem fora do âmbito deste breve curso. Para encarar tais problemas é favor contactar a Vortec.

A Fórmula de Equilíbrio Térmico

O facto da energia extraída do ar frio pelo Tubo Vortex aparecer no ar quente proporciona o uso de uma fórmula muito cómoda:



$$FF \times (t_i - t_c - JT) = (100 - FF) \times (t_h - t_i + JT) \text{ onde}$$

FF = Fracção Fria, em %

t_i = Temperatura de admissão, em ° C

t_c = Temperatura da saída fria, em ° C

t_h = Temperatura da saída quente, em ° C

JT = A correcção de temperatura devida ao efeito Joule-Thomson é de 2,(2)° C, para uma pressão de admissão de 7 kg/cm².

Usando esta fórmula a fracção fria pode ser calculada a partir apenas da leitura de três termómetros, sem ter que se medir qualquer fluxo de ar.

Suponha-se, por exemplo, que $t_i = 38$ ° C, $t_c = 10$ ° C e $t_h = 149$ ° C.

Substituindo na fórmula obtém-se

$$FF \times (38 - 10 - 2) = (100 - FF) \times (149 - 38 + 2), \text{ que resulta } FF = \sim 81,5 \%$$

Os Tubos Vortex obedecem muito aproximadamente a esta fórmula não obstante a sua eficiência particular, desde que o tubo quente esteja isolado.

A fórmula pode tomar a apresentação seguinte:

$$FF = 100 (t_h - t_i + 2,(2)) / (t_h - t_c)$$

esta é a apresentação mais cómoda para calcular a Fracção Fria.

Efeitos da Humidade

O Tubo Vortex não separa a humidade entre o ar quente e o ar frio. A humidade absoluta quer do ar frio quer do ar quente, em grãos/libra, é a mesma que a existente no ar comprimido na admissão.

NOTA: Por uma questão de simplicidade, nesta secção, mantiveram-se as unidades inglesas.

A humidade condensará e/ou gelará no ar frio se o seu ponto de orvalho for mais alto do que a sua temperatura. A tabela seguinte mostra a quantidade de humidade que o ar pode suportar no estado de vapor saturado em função da temperatura do ar, à pressão atmosférica de referência de 14,7 psia

Temperatura, °F	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	-10	-20	-30
Saturação*	375	295	217	154	111	77	54	37	24	15	9	5,5	3,2	1,8	1,0

* Conteúdo de Humidade de Saturação em grãos/lb. Ar. (1 grão = 1/7000 lb.)

Por exemplo, a tabela acima mostra que se o conteúdo de humidade for de 14 grãos/lb., a condensação começará quando a temperatura do ar frio cair abaixo de 19 °F. A 5grãos/lb., ocorrerá condensação a - 1°F.

O conteúdo de humidade saturada de ar comprimido a 100 psig é dada na tabela seguinte:

Temperatura, °F	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20
Saturação*	48	38	28	20	14	9,9	6,9	4,7	3,1	1,9

Comparando as duas tabelas é possível prever a quantidade de humidade no ar comprimido, bem como a temperatura à qual a humidade começará a precipitar ou formará gelo no ar frio.

Suponhamos, como exemplo, que o ar comprimido é arrefecido a 80 °F (27 °C) a seguir à compressão e se purga a água de precipitação. Então a segunda tabela mostra que o ar comprimido carregará 20 grãos/lb. de vapor de água. Quando o ar se expande no tubo vortex, a 1ª tabela mostra que a precipitação começará



no ar frio quando a temperatura cair abaixo de 26 °F (- 3 °C), se a sua pressão for de 14,7 psia.

Se o ar comprimido for arrefecido sob pressão com um refrigerador até 40 °F (4 °C), a segunda tabela mostra que o ar carrega então 4,7 grãos/lb. de vapor de água. Quando esse ar expande no tubo vortex a precipitação ocorrerá se a temperatura do ar frio cair abaixo de -3 °F (-19 °C) a 14,7 psia.

Se, em condições pouco usuais, alguma humidade se precipitar no ar frio, a temperatura do ar frio aumentará aproximadamente 3/4 °F por cada grão de humidade precipitada. Isto ocorre porque uma parte da sensível refrigeração do ar frio é consumida na produção de refrigeração latente da humidade. Esta refrigeração não é perdida mas reaparece no ar frio conforme ele aquece ao desempenhar a sua tarefa de ar condicionado depois de abandonar o tubo vortex, quando a humidade precipitada volta a evaporar.

As tabelas mostram que não ocorrerá condensação para temperaturas moderadas da ponta fria. Quando as temperaturas são suficientemente baixas para causar condensação, esta aparece sob a forma de neve. Esta neve é algo pegajosa devido ao vapor do óleo, formando-se e bloqueando gradualmente as passagens do ar frio. O funcionamento contínuo a baixas temperaturas pode ser assegurado por meio de um secador de ar ou pela injeção de névoa anti-congelante no ar comprimido que alimenta o tubo vortex.

Ao seleccionar secadores deve-se considerar os tipos refrigerantes e deliquescentes(*). Apesar das suas capacidades de secagem serem limitadas (factos que precisam ser considerados) estes secadores são bastante compatíveis com o tubo vortex. Os secadores dessecantes químicos tais como a sílica gel e os filtros moleculares são exotérmicos e tendem a aquecer o ar comprimido provocando perdas de refrigeração.

(*) - Um secador deliquescente, um sal por exemplo, derrete ou torna-se líquido ao absorver humidade do ambiente.

NOTAS DE APLICAÇÃO

A Alimentação de Ar

Pressão. Os tubos standard fabricados pela Vortec Corporation são desenhados para utilizar uma fonte de ar comprimido normal de oficina, com pressão compreendida entre 5,5 e 7,7 kg/cm². A menos que as pressões sejam consideravelmente maiores que 7,7 kg/cm² não se deve usar um regulador para reduzir a pressão de admissão. Pressões maiores que 17,5 kg/cm² não podem ser usadas. Pressões inferiores a 5,5 kg/cm² ainda produzirão alguma refrigeração. No entanto, quer a queda de temperatura quer o caudal serão reduzidos devido à menor pressão de admissão.

Dimensionamento das linhas. Para consumo até 0,7 m³/min e extensões de tubo de menos de 3 m de comprimento, pode-se usar tubos de 1/4" Ø sem perda de pressão excessiva. Até 15 m use tubo de 3/8" Ø e use tubo de 1/2" Ø para comprimentos superiores a 15 m. Pode-se usar mangueira de borracha adequada para a pressão. Considere a mangueira de 3/8" equivalente ao tubo de 1/4" e mangueira de 1/2" no lugar de tubo de 3/8". Tenha em atenção que pressões mais baixas provocam perdas de carga ainda maiores, de modo que é necessário cuidado para evitar perdas elevadas na tubagem de admissão.

Tamanho do compressor. Na maior parte das instalações grandes o tamanho do compressor é suficiente para alimentar muitos tubos vortex simultaneamente. Para instalações menores a estimativa em cavalos necessária baseia-se na capacidade nominal da tubagem. Para um sistema de 7 kg/cm² é necessário 1 Cv para comprimir 113 l/min de ar.

Preparação do Ar

Humidade. Todos os sistemas de ar comprimido têm água condensada a menos que esteja a ser usado um secador. Para remover a água condensada do ar tem que se usar um filtro-separador. Recomenda-se o uso de purgas automáticas a menos que a área seja assistida por um empregado responsável que esvazie as



purgas periodicamente. Coloque os filtros separadores tão próximo dos tubos vortex quanto possível.

Secadores. Normalmente não é necessário o uso de secador para as aplicações normais dos tubos vortex. No entanto, ocasionalmente, quando as temperaturas na saída fria são muito baixas, a formação de gelo causará problemas. Também algumas aplicações podem exigir uma corrente de ar frio totalmente isenta de humidade ou de gelo. Um secador químico (silica-gel, “heatless”, ou de outro tipo) pode ser usado na linha de alimentação para eliminar água condensada ou gelo na corrente de ar frio. O secador deve ser dimensionado para produzir um ponto de orvalho à pressão atmosférica mais baixo que a temperatura mais baixa esperada para a saída fria.

Sujidade. Por causa da água nas linhas de ar comprimido existe sempre ferrugem e sujidade. Os filtros separadores da Vortec removem eficientemente estes contaminantes à custa de um filtro de 5 μ . Filtros de substituição são disponíveis a custo nominal, tornando-se necessário para o usuário determinar a respectiva frequência de substituição baseado nas condições existentes na sua instalação.

Óleo. Nunca use tubos vortex a jusante de um lubrificador. O óleo que foi introduzido no ar pelo sistema de lubrificação do compressor não é usualmente um problema para os produtos vortec, porém ocasionalmente compressores mais antigos produzem ar com muito óleo. Se o ar da instalação contiver muito óleo use um filtro para o remover a jusante do filtro separador. O filtro para remover o óleo removerá sujidade, água e aerossóis de óleo com uma filtragem efectiva de 0,01 μ .

Afinações

Refrigeração Máxima. A refrigeração máxima é alcançada quando um tubo vortex trabalha com 60 a 70 % de fracção fria. Nestas condições o produto da massa de ar frio pela queda de temperatura é máxima. Muitas aplicações, tais como refrigeração de controles eléctricos, banhos líquidos e ar condicionado pessoal usam esta afinação de máxima refrigeração. Para obter refrigeração máxima use casquilhos do tipo H.

Temperatura Mínima. Algumas aplicações requerem a temperatura de saída mais baixa possível. Exemplos são arrefecimento de vidro, refrigeração de peças quentes e o uso de ar frio para refrigerar operações de maquinação. Estas aplicações com jacto de ar, funcionam usualmente melhor com ar muito frio e os resultados parecem não depender do fluxo de refrigeração. Para estas aplicações o melhor é usar casquilhos do tipo L e fracções frias na faixa de 20 a 40 %.

Utilização do Ar Frio

Pressão de Reacção. Um dos erros mais frequentes no uso de tubos vortex é estrangular a saída fria. Isto provoca uma perda de rendimento. Uma pequena pressão de reacção na saída fria para conduzir o ar através de tubagem ou ductos é aceitável, mas a pressão de reacção medida no tubo deve ser limitada a menos de 0,35 kg/cm². Mantenha presente que o funcionamento do tubo depende da relação de pressões absolutas e pressão de reacção tão baixa como 1 kg/cm² reduz essa relação para metade. Alguma pressão está disponível na ponta quente e pode ser usada para compensar os ajustes efectuados na válvula de controlo.

Isolamento. Como em qualquer dispositivo termodinâmico o uso adequado de isolamento melhorará o desempenho do tubo vortex. Evite conduzir o ar frio através de grandes massas térmicas, tais como tubos pesados, furos abertos em blocos grandes, etc. Se possível use tubos plásticos. Isolamento com espuma pode ser também bastante útil.

Redução de Ruído

Geral. Um conceito erróneo comum é de que um tubo vortex emite um “grito” ou apito devido às velocidades sónicas dentro de si. De facto tal ruído é raramente observado, mas o som do ar de escape está sempre presente e em alguns casos precisa ser abafado. Usualmente o ar frio será conduzido para um



recipiente ou passa através de algum tubo ou cano. Só isso pode chegar para reduzir o nível de ruído para limites aceitáveis. Na maior parte das aplicações o escape de ar quente envolve quantidades menores e pode não causar problemas. No entanto, jactos de ar de escape podem ser inconvenientes se durarem muito tempo junto de uma pessoa. Nessas condições existem abafadores que devem ser usados.

Amortecimento Frio. Os abafadores usados no ar frio não podem ser do tipo recheado (com lã de vidro por exemplo) nem poroso. As suas pequenas aberturas ficariam rapidamente bloqueadas com gelo proveniente de água que se condensa e gela na corrente de ar frio. Abafadores do tipo reflector ou silencioso são os melhores para o ar frio. Evite seleccionar qualquer tipo de abafador que aplique uma pressão de reacção elevada ao tubo vortex.

Amortecimento Quente. Quase qualquer tipo de silencioso ou abafador funcionará na saída quente. Deve-se evitar usar escolher um silencioso de plástico ou de outro material com baixa resistência ao calor uma vez que as temperaturas da saída quente podem exceder facilmente os 95 °C.

Manutenção

Uma vez que os tubos vortex não têm peças móveis eles são altamente confiáveis e requerem pouca ou nenhuma manutenção.

O uso prolongado com ar sujo ou com óleo pode provocar desgaste ou acumulação de lixo no tubo. As únicas actividades de manutenção requeridas serão desmontagem, inspecção e limpeza dos componentes.



APÊNDICE

Indicam-se a seguir algumas ferramentas úteis para trabalhar com Tubos Vortex

Calibre da Linha de Ar Comprimido

Comprimento instalação (m)	Caudal máximo de ar (l/min) na instalação para perda de pressão de 0,35 kg/cm ² Pressão da linha 7 kg/cm ² a 21 °C Ø nominal do tubo - Clibre 40								
	1/4	3/8	1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2
3	821	1840	3396	7188	13584	27677	42117	81023	128369
6	594	1302	2406	5094	9622	19584	29687	57279	90786
9	481	1047	1981	4160	7839	15990	24225	46780	74118
12	425	906	1698	3594	6792	13839	20999	40497	64184
15	368	821	1528	3226	6085	12367	18763	36224	57421
18	340	736	1387	2943	5547	11292	17150	33083	52412
21	311	708	1302	2717	5122	10471	15877	30621	48535
24	283	651	1217	2547	4811	9792	14829	28640	45393
27	269	623	1132	2406	4528	9226	13980	26998	42790
31	255	594	1075	2264	4302	8745	13273	25612	40611

Capacidade dos Tubos Vortex

Modelo	Pressão de Entrada kg/cm ² no manómetro	Consumo de ar L/min	Capacidade BTU/hr
106-2-H	7,03	56,6	100
106-4-H	7,03	113,3	200
106-8-H	7,03	226,5	400
208-11-H	7,03	311,5	600
208-15-H	7,03	424,8	900
208-25-H	7,03	707,9	1500
328-50-H	7,03	1415,8	3000
328-75-H	7,03	2123,8	4500
328-100-H	7,03	2831,7	6000

BTU - British Thermal Unit. Unidade padrão inglesa de energia. 1 Btu é igual à quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de 1 libra de água de 1 °Fahrenheit à sua densidade máxima, que ocorre à temperatura de 3,94 °C. 1 BTU é igual a aproximadamente 251.9 calorias ou 1055 joules.

Escolhendo um Tubo Vortex

A tabela seguinte mostra as quedas ou acréscimos de temperatura que se podem esperar em tubos Vortex ajustados para várias fracções frias. A determinante principal de um tubo vortex, para além da afinação da fracção fria, é a pressão de entrada.

A tabela considera uma temperatura de entrada de 21 °C. Recorde que o desempenho de arrefecimento de um tubo vortex é prejudicada por temperaturas de entrada mais elevadas, por humidade no ar de alimentação que pode condensar e gelar, ou por pressão excessiva de reacção quer na saída quente quer na saída fria. Um tubo vortex limpo trabalhando com temperatura e pressão constante de entrada manterá as temperaturas de saída dentro de $\pm 0,6$ °C.



Tabela de Desempenho dos Tubos Vortex

Pressão de Entrada kg/cm ² 80	Fracção Fria, %						
	20	30	40	50	60	70	
1,4	34,2	33,1	30,8	28,1	24,2	20	15,3
	8,1	13,6	20	27,5	35,6	45,8	59,4
2,8	48,9	47,2	44,4	40,6	34,7	28,6	21,1
	11,4	19,4	28,6	39,4	50,8	65	81,7
4,2	57,8	55,6	51,7	46,7	40,6	33,1	24,7
	13,1	22,2	32,5	44,4	57,8	73,3	93,3
5,6	63,9	61,1	56,7	51,1	44,4	36,4	27,2
	13,9	23,9	35	47,8	62,8	79,4	100,6
7,0	68,3	65,6	61,1	55	47,8	39,2	29,4
	14,4	25	36,9	50,6	66,1	83,9	106,7
8,4	71,7	68,9	64,4	57,8	50,3	41,1	30,6
	14,4	25,6	38,3	52,2	68,3	86,7	108,3
9,8	75	71,7	67,2	60,6	52,2	42,2	31,4
	14,2	25,6	39,2	53,3	68,9	86,7	107,2

Os números sobre fundo azul indicam a queda de temperatura do ar frio, em °C.

Os números sobre fundo branco indicam o aumento de temperatura do ar quente, em °C.

NOTA: Esta tabela é válida desde que a pressão na ponta fria seja a pressão atmosférica.

Fluxo de ar

Para as pressões de alimentação usuais pode-se usar a fórmula aproximada:

$$\text{Fluxo (L/min)} = \{[\text{pressão (manómetro)} + 1,0546] \times \text{consumo nominal (L/min)}\} / 8,0854$$

Potência de Ar Condicionado

Para encontrar os valores aproximados de potência de refrigeração e de aquecimento use as seguintes fórmulas simplificadas:

$$FF = \text{Fracção Fria}$$

$$FFM_t = \text{Fluxo Total de Ar}$$

$$FFM_f = \text{Fluxo de Ar Frio} = FFM_t (FF)$$

$$FFM_q = \text{Fluxo de Ar Quente} = FFM_t (100-FF)$$

$$t_i = \text{Temperatura de Admissão}$$

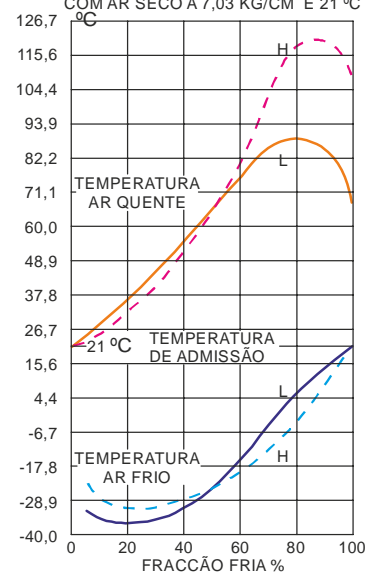
$$t_f = \text{Temperatura da Saída de Ar Frio}$$

$$t_q = \text{Temperatura da Saída de Ar Quente}$$

$$\text{Para Arrefecimento: BTU/hr} = 1,0746 FFM_f (t_i - t_f)$$

$$\text{Para Aquecimento: BTU/hr} = 1,0746 FFM_q (t_q - t_i)$$

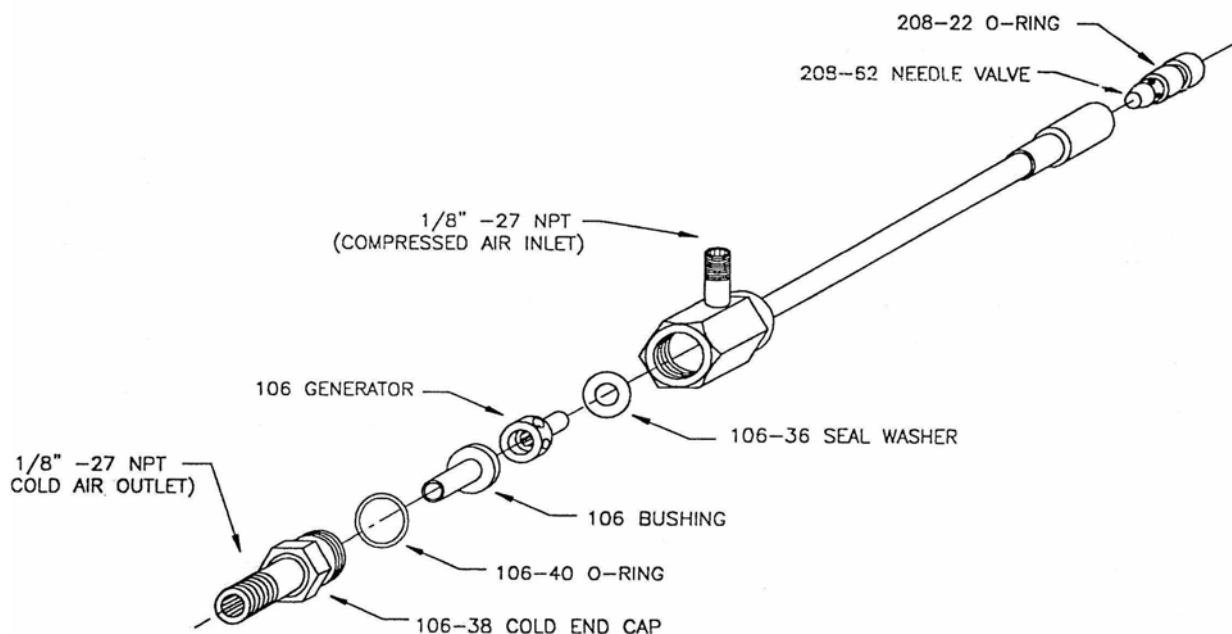
TEMPERATURAS DO AR OBTIDAS NUM TUBO VORTEX MODELO 106-4 ISOLADO, COM AR SECO A 7,03 KG/CM² E 21 °C





Tubo Vortex Modelo 106

Vista de Montagem do Conjunto de Peças



Versões do Tubo Vortex 106

Modelo	Gerador	Injector (bushing)
2 H	106-23	106-14
2 L	106-23	106-17
4H	106-24	106-15
4 L	106-24	106-18
8 H	106-25	106-16
8 L	106-25	106-19

Outras Aplicações do Efeito Vortex

Ver documentação da Vortec.