

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

Estudo e Implementação de Ventiladores HVLS para Redução de Sensação Térmica em Galpão Logístico

Rômulo Moura Luiz

Prof. Orientador: Juliana Primo Basílio de Souza

**Rio de Janeiro
Novembro de 2018**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

Estudo e Implementação de Ventiladores HVLS para Redução de Sensação Térmica em Galpão Logístico

Rômulo Moura Luiz

Projeto final apresentado em cumprimento às
normas do Departamento de Educação Superior do
CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof.Orientador: Juliana Primo Basílio de Souza

**Rio de Janeiro
Novembro de 2018**

CEFET/RJ – Sistema de Bibliotecas / Biblioteca Central

L953 Luiz, Rômulo Moura
Estudo e implementação de ventiladores HVLS para redução de
sensação térmica em galpão logístico / Rômulo Moura Luiz.—2018.
x, 32f. : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2018.

Bibliografia : f. 32

Orientador : Juliana Primo Basílio de Souza

1. Engenharia mecânica. 2. Ventilação. 3. Eficiência energética.
4. Calor - Transmissão. I. Lima, Juliana Primo Basílio de (Orient.). II.
Título.

CDD 621

Agradecimento

Agradeço primeiramente a Deus e a Nossa Senhora da Conceição, minha mãe Miriam Pereira de Moura e minha tia Cleonice Pereira de Moura, meus amores eternos e principais responsáveis por toda a minha caminhada acadêmica e profissional. Sem vocês eu não seria absolutamente nada, meu amor por vocês é infinito.

Agradeço aos amigos, Paulo Victor Santos Teixeira e Leonardo dos Santos Rojas por todo o apoio, sem vocês esse trabalho não seria realidade.

Agradeço à todo o corpo docente do CEFET/RJ em especial à professora Juliana Primo Basílio de Souza, Luciana Loureiro da Silva Monteiro e Fernando Ribeiro da Silva, mais do que professores, exemplos em todos os sentidos para mim, eterna gratidão.

Agradeço aos professores do Colégio Guido de Fontgalland, em especial ao Padre Erich Maria George Hennings, por sua imensa solidariedade, não tenho palavras para expressar meu sentimento, nos reencontraremos na casa do Pai e dedicarei meu diploma ao senhor.

Resumo

Em pavilhões industriais, em casos onde a estrutura e principalmente o custo inviabilizam a instalação de sistemas de ar-condicionado, sistemas de ventilação industrial para grandes áreas se mostram desafiadores e complexos. No presente trabalho, temos como objetivo analisar um projeto de climatização implementado pelo autor em sua experiência de estágio na operação do Fluxo Logístico para redução da sensação térmica para os operadores de uma empresa de cosméticos, situada na Pavuna, Rio de Janeiro. Partindo primeiramente de uma pesquisa de mercado, muitas soluções foram encontradas, porém nenhuma satisfatória, como solução em desempenho e efetividade, a proposta de ventiladores HVLS (High Volume Low Speed) se mostrou a ideal. Consequentemente foi analisado todo o sistema de climatização vigente da planta, seu consumo energético, efetividade em deslocamento de ar e ergonomia para a operação. Analisado também todos os custos: aquisição, eficiência energética e custo operacional. Com todos os parâmetros levantados, o projeto foi aprovado pela Diretoria de Operações e implementado pelo autor, objeto de estudo desse trabalho de conclusão de curso.

Palavras Chaves: Ventilação Industrial. HVLS. Sensação Térmica. Eficiência Energética.

Abstract

In industrial pavilions, in cases where the structure and mainly the cost make impossible the installation of air conditioning systems, industrial ventilation systems for large areas are challenging and complex. In the present work, we aim to analyze a climate control project implemented by the author in his experience of trainee in the operation of Logistic Flow to reduce the thermal sensation for the operators of a cosmetics company located in Pavuna, Rio de Janeiro. Based on market research, many solutions were found, but none satisfactory, as a solution in performance and effectiveness, the proposal of HVLS (High Volume Low Speed) fans proved to be ideal. Consequently it was analyzed all existing climate control systems of the plant, its energy consumption for air displacement effectiveness and ergonomics for operation. Also analyzed all the costs: acquisition, energy efficiency and operational cost. With all parameters raised, the project was approved by the Operations Department and implemented by the author, object of study of this undergraduate thesis.

Keywords: Industrial Ventilation. HVLS. Thermal Sensation. Energy Efficiency.

Lista de Figuras

Figura 1: Efeitos da corrente de ar num ambiente.....	04
Figura 2: Considerações para a entrada de ar na construção de edifícios.....	05
Figura 3: Exemplo de Ventilador Axial Propulsor.....	08
Figura 4: Exemplo de Ventilador Axial Comum.....	08
Figura 5: Exemplo de Propulsor Turbo Axial.....	08
Figura 6: Exemplo de Ventilador HVLS e suas dimensões.....	09
Figura 7: Comparativo dimensional entre um Ventilador HVLS e uma pessoa.....	09
Figura 8: Ventilador HVLS em operação.....	10
Figura 9: Ilustração de Ventilador Centrífugo de pás para trás.....	11
Figura 10: Ilustração de Ventilador Centrífugo de pás radiais.....	11
Figura 11: Ilustração de Ventilador Centrífugo de pás para frente.....	12
Figura 12: Zona de bem-estar para valores da temperatura do ar local e velocidade do ar, segundo Roedler [2].....	16
Figura 13: Sensação de resfriamento equivalente.....	16
Figura 14: Psicrômetro.....	17
Figura 15: Carta Psicrométrica.....	18
Figura 16: Modelo TurboFlash 22''.....	20
Figura 17: Média anual de temperatura e índice pluviométrico na Pavuna.....	22
Figura 18: Ventilador - Tubo Axial Direto (Vazão de de até 135.000 m ³ /hora).....	23
Figura 19: Ventilador Eólico Modelo Ventileve 600 (Vazão de 4.000 m ³ /hora).....	23
Figura 20: Caixa de Ventilação com Ventilador Centrífugo Dupla Aspiração Rotor Sirocco (Vazão de até 100.000 m ³ /hora).....	23
Figura 21: Ventilador TurboFlash 22'' (Vazão de até 9600 m ³ /h).....	24
Figura 22: Modelo de ventilador HVLS Elefant.....	24
Figura 23: Sensação térmica resultante conforme especificação de velocidades possíveis do ar de acordo com o fornecedor do ventilador HVLS.....	25
Figura 24: Planta do galpão.....	26
Figura 25: Simulação EL-7000 e EL-5500.....	27
Figura 26: EL-7000 instalado na área de embarque (Foto tirada pelo autor).....	29
Figura 27: EL-5500 instalado na área da filmadora (Foto tirada pelo autor).....	29

Lista de Tabelas

Tabela 1: Modelos adquiridos para o projeto de climatização.....	27
Tabela 2: Premissa dimensional.....	27
Tabela 3: Horário de funcionamento.....	28
Tabela 4: Consumo Energético/Vazão (EL-7000/TurboFlash 22’’).....	28
Tabela 5: Consumo Energético/Vazão (EL-5500/TurboFlash 22’’).	28
Tabela 6: Consumo Energético Anual/Investimento.....	28
Tabela 7: Comparativo Custo Anual/Economia.....	30

Sumário

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Motivação.....	1
1.2	Justificativa.....	1
1.3	Objetivo.....	2
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1	CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE VENTILAÇÃO.....	3
2.1.1	Tipos de Ventilação.....	3
2.1.1.1	Ventilação Natural.....	4
2.1.1.2	Ventilação Geral.....	5
2.1.1.3	Ventilação Geral para Conforto Térmico.....	6
2.2	Tipos de Ventiladores.....	7
2.2.1	Ventilador Axial.....	7
2.2.1.1	Axial Propulsor.....	7
2.2.1.2	Axial Comum.....	8
2.2.1.3	Propulsor Turbo-Axial.....	8
2.2.1.4	Ventiladores HVLS (<i>High Volume Low Speed</i>).....	9
2.2.2	Ventilador Centrífugo.....	10
2.2.2.1	Centrífugo de pás para trás.....	10
2.2.2.2	Centrífugo de pás radiais.....	11
2.2.2.3	Centrífugo de pás para frente.....	11
2.3	EFEITO DO MOVIMENTO DO AR SOBRE O CONFORTO DE UMA PESSOA.....	12
2.3.1	Formas de Transmissão de Calor.....	12
2.3.1.1	Radiação ou Irradiação.....	12
2.3.1.2	Convecção.....	13
2.4	Psicrometria.....	17
2.4.1	Temperatura de Bulbo Úmido.....	17
2.4.2	Umidade Relativa.....	17
2.4.3	Carta Psicrométrica.....	18
3.	Metodologia de Cálculo.....	20
3.1	Vazão de Ar e Área de Cobertura.....	20
3.2	Consumo Energético.....	21
3.3	Manutenção.....	21
4.	Escolha do Tipo de Ventilador.....	22
4.1	Localização e Clima do Local de Projeto.....	22
4.2	Análise de opções em ventilação industrial no mercado.....	22

4.3 Escolha do Modelo EL-7000	24
4.3 Projeto e Instalação	26
5. Conclusão e Trabalhos Futuros	29
5.1 Trabalhos Futuros	30
6. Referências	32

1. INTRODUÇÃO

É comum que em instalações logísticas e armazéns, o espaço ocupado seja relativamente grande, com muitos obstáculos para a circulação de ar, como grandes portapalletes e seu conteúdo armazenado. Máquinas tracionárias, envelopadoras, iluminação e os próprios operadores são fontes de emissão de calor. Dependendo da localização dessas instalações logísticas, o clima também será um grande fator para a baixa qualidade do ar e a alta temperatura do ambiente, causando efeitos negativos tanto em produtividade, segurança e eficiência energética. Em ambiente industrial, a produtividade e eficiência são essenciais para a eficácia da operação. Em um ambiente logístico, aonde se tem muito tráfego com máquinas pesadas, como empilhadeiras, transpaleteiras e demais máquinas tracionárias, e na maioria das vezes também atividades feitas à mão pelos operadores, como o ‘picking’, gera-se muito calor, especialmente em meses quentes de verão. Meses em que baias e docas de carga, ficam abertas, o que transfere calor para as instalações, conforme experiência vivida pelo autor em seu estágio profissional.

1.1 Motivação

Em grandes áreas, a instalação de sistemas de ar condicionado se torna muito onerosa e demanda grande quantidade de ajustes estruturais, já os sistemas de ventilação convencionais não tem sido satisfatórios. Para se obter uma ventilação necessária para a correta circulação do ar e conseqüente redução da sensação térmica pela operação, demanda-se de uma grande quantidade de ventiladores de pequeno diâmetro e trabalhando em alta rotação. Assim observa-se grande consumo de energia elétrica, ruído e conseqüente baixa ergonomia.

1.2 Justificativa

Objeto de estudo deste trabalho, é um tipo de ventilador mecânico com mais de 2,1 m de diâmetro. Os ventiladores HVLS são geralmente são instalados no teto, embora alguns sejam montados em postes. Os ventiladores HVLS movem-se lentamente e distribuem

grandes quantidades de ar a baixa velocidade de rotação, daí o nome "alto volume, baixa velocidade". [1]

O diferencial da tecnologia HVLS está no seu longo alcance de ventilação, pois um único ventilador pode performar até 1.300m² com um baixo consumo elétrico, comparando-se à quantidade de ventiladores industriais padrão, insufladores de ar e outros equipamentos existentes no mercado atual que seriam necessários para cobrir toda essa área. [1]

O longo alcance se deve ao grande diâmetro e às propriedades aerodinâmicas da hélice com pás em ângulo descendente, que maximizam o deslocamento de ar. Arranjados corretamente, é possível estabelecer correntes de ar contínuas em todas as direções, com potência e consumo elétrico muito menores. [1]

1.3 Objetivo

Este trabalho busca estudar os conceitos por trás do funcionamento dos ventiladores HVLS, sua construção e os benefícios em se usar essa tecnologia em pavilhões logísticos e demais áreas extensas que necessitem de ventilação e redução de sensação térmica. Usando como base, o estudo de caso aonde se adotou essa forma de ventilação em um galpão logístico de uma empresa de cosméticos. Para tal, será estudado e comparado às demais soluções hoje presentes no mercado nacional e internacional, também com o intuito de difundir tal tecnologia. Por fim, haverá uma investigação por melhoria na efetividade do projeto do ventilador e quais medidas podem ser tomadas concomitantes à adoção dessa nova forma de ventilação para que se tenha uma redução de sensação térmica ainda mais eficaz. Obtendo-se ainda mais ergonomia e produtividade para a operação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Como ventilação industrial entende-se o processo de retirar ou fornecer ar por meios naturais ou mecânicos de, ou para, um recinto fechado. O processo de ventilação têm por finalidade a limpeza e o controle das condições do ar, seja térmica ou não, para que homens e máquinas convivam num mesmo recinto sem prejuízo de ambas as partes.

Resolver o problema da vazão necessária a ventilação e sua distribuição requer conhecimento dos princípios físicos em que esta se baseia. Daí a necessidade de sistemas de ventilação industrial. [2]

2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE VENTILAÇÃO

Para classificar os sistemas de ventilação é necessário levar em consideração a finalidade a que se destinam. As finalidades podem então ser:

a) Ventilação para a manutenção do conforto térmico:

- ela restabelece as condições atmosféricas num ambiente alterado pela presença do homem
- refrigera o ambiente no verão
- aquece o ambiente no inverno

b) Ventilação para a manutenção da saúde e segurança do homem:

- reduz concentrações no ar de gases, vapores, aerodispersóides em geral, nocivos ao homem, até que baixe a níveis compatíveis com a saúde;
- mantém concentrações de gases, vapores e poeiras, inflamáveis ou explosivos fora das faixas de inflamabilidade ou explosividade,

c) Ventilação para a conservação de materiais e equipamentos

- reduz o aquecimento de motores elétricos, máquinas, armazéns ventilados com o fim de evitar deterioração.[2]

2.1.1 Tipos de Ventilação

Os tipos de sistemas de ventilação que vão atender as finalidades acima descritas são:

- a) Ventilação Natural
- b) Ventilação Geral
 - Para conforto térmico
 - Diluidora (Insuflamento ou exaustão)
- c) Ventilação Local Exaustora [2]

2.1.1.1 Ventilação Natural

A ventilação natural é o movimento de ar num ambiente provocado pelos agentes físicos pressão dinâmica e/ou temperatura, podendo ser controlado por meio de aberturas no teto, nas laterais e no piso. Ventilação natural não é infiltração, que é um movimento de ar provocado pelos mesmos agentes físicos, mas não é controlado. O fluxo de ar que entra ou sai de um edifício por ventilação natural ou infiltração depende da diferença de pressão entre as partes interna e externa e da resistência ao fluxo fornecido pelas aberturas. [2]

A diferença de pressões exercida sobre o edifício pelo ar pode ser causada pelo vento ou pela diferença de densidade do ar fora e dentro do edifício. O efeito da diferença de densidade, conhecido como "efeito de chaminé", é frequentemente o principal fator.[2]

Quando a temperatura no interior de um determinado ambiente é maior que a temperatura externa, produz-se uma pressão interna negativa e um fluxo de ar entra pelas partes inferiores, o que causa em seguida uma pressão interna positiva, e um fluxo de ar sai nas partes superiores do edifício. [2]

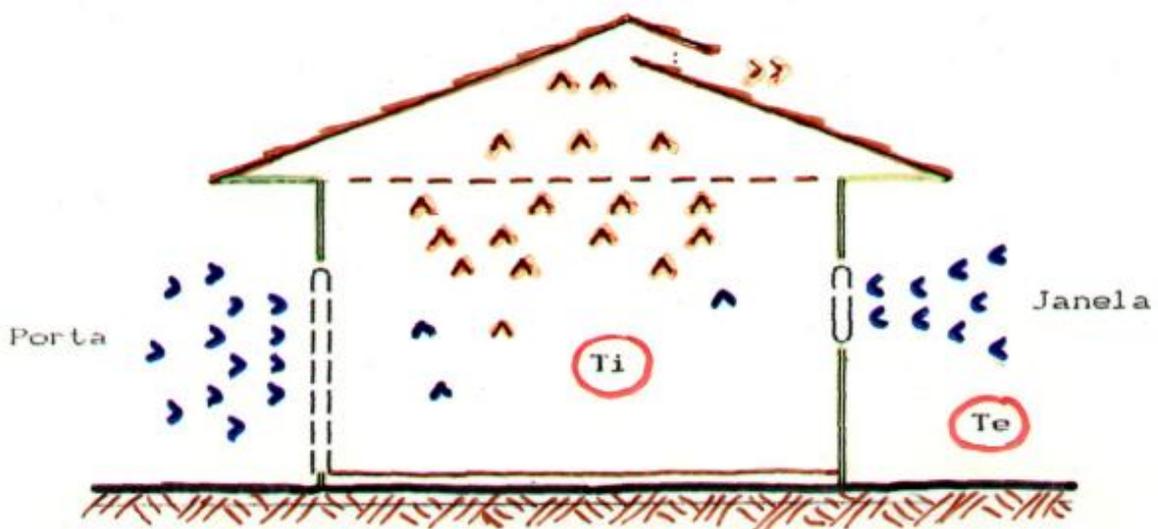


Figura 1: Efeitos da corrente de ar num ambiente

Os efeitos da corrente de ar num ambiente dependem dos seguintes fatores:

- movimento devido aos ventos externos;
- movimento devido a diferença de temperatura;
- efeito das aberturas desiguais.[2]

Na construção de edifícios deve-se fazer as seguintes considerações:

- edifícios e equipamentos em geral devem ser projetados para ventilação efetiva, independente das direções do vento;
- aberturas com portas, janelas, etc. não devem ser obstruídas;
- Uma quantidade maior de ar por área total de abertura é obtida usando-se áreas desiguais de aberturas de entrada e saída.[2]

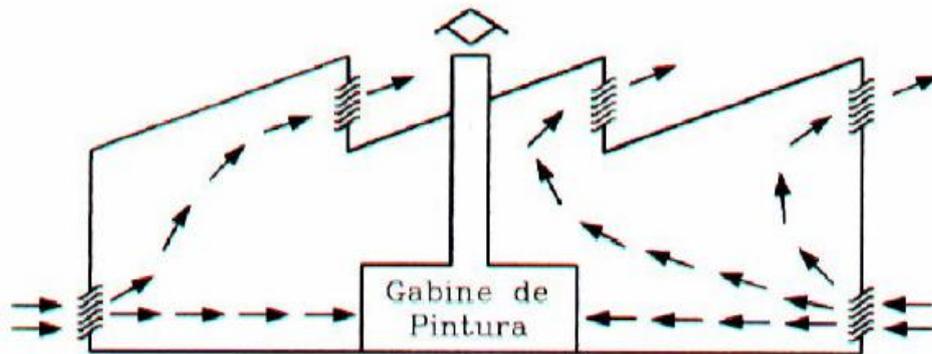


Figura 2: Considerações para entrada de ar na construção de edifícios

2.1.1.2 Ventilação Geral

A ventilação geral é um dos métodos disponíveis para controle de um ambiente ocupacional. Consiste em movimentar o ar num ambiente através de ventiladores. É também chamada de ventilação mecânica.

Um ventilador pode insuflar ar no ambiente, tomando ar externo, ou exaurir ar desse mesmo ambiente para o exterior. Quando um ventilador funciona no sentido de exaurir ar de um ambiente é comumente chamado de exaustor.[2]

Vazão: É o volume de ar que se desloca na unidade de tempo, num ambiente ou numa tubulação.[1]

$$Q = \frac{V}{t}$$

Q - vazão em [m³/h] ou [ft³/min]

V - volume em [m³] ou [ft³]

t - tempo em [h] ou [min]

Taxa de Renovação de ar: É o número de vezes que o volume de ar desse ambiente é trocado na unidade de tempo. É também chamado de número de trocas de ar. [2]

$$T = \frac{Q}{V}$$

T - taxa de renovação em [1/h] ou [1/min]

Q - vazão em [m³/h] ou [ft³/min]

V - volume em [m³] ou [ft³]

2.1.1.3 Ventilação Geral para Conforto Térmico

É sabido que o movimento do ar alivia a sensação de calor, uma vez que o mesmo abaixa a temperatura da pele. É importante que se façam umas considerações sobre as perdas de calor sofridas pelo corpo humano, para uma melhor compreensão do conforto relativo que se pode alcançar com a ventilação. O homem é um ser tropical por excelência, possuindo uma capacidade bastante desenvolvida de transpiração. Um grande número de indivíduos está parte do tempo, exposto a temperaturas mais altas que a temperatura ambiente, principalmente em seu ambiente de trabalho, onde uma série de fatores climáticos e não climáticos conduzem a um ganho ou a uma menor dissipação de calor pelo organismo. A esse estímulo o organismo responde fisiologicamente, refletindo a severidade da exposição ao calor. [2]

Para o equacionamento do equilíbrio térmico do indivíduo se faz necessário medir quantitativamente a ação do calor, bem como a resposta do organismo, correlacionando-as. Essa é uma tarefa difícil em função de vários parâmetros intervenientes, tais como a temperatura do ar, a umidade relativa, o calor radiante, a velocidade do ar, o tipo de trabalho exercido, a roupa utilizada e outros. Dessa forma, torna-se necessário a fixação de critérios que permitem estabelecer os limites de exposição ao calor em diferentes tipos de trabalho e a

redução da exposição para respostas excessivas do organismo. Os critérios assim desenvolvidos devem levar em conta não só a resposta fisiológica, mas também a psicológica, a produtividade e a ocorrência de desordens devido ao calor.[2]

Várias medidas podem ser tomadas para se evitar a exposição de pessoas a condições de alta temperatura. Por exemplo, enclausuramento e isolamento das fontes quentes, vestimentas, barreiras protetoras, diminuição do tempo de exposição, etc.[2]

2.2 Tipos de Ventiladores

São os responsáveis pelo fornecimento de energia ao ar, com a finalidade de movimentá-lo, quer seja em ambientes quer seja em sistema de dutos. A função básica de um ventilador é, pois, mover uma dada quantidade de ar por um sistema de ventilação a ele conectado. Assim, o ventilador deve gerar uma pressão estática suficiente para vencer as perdas do sistema e uma pressão cinética para manter o ar em movimento. Basicamente, há dois tipos de ventilador: os axiais e os centrífugos. [2]

2.2.1 Ventilador Axial

O ventilador de hélice consiste em uma hélice montada numa armação de controle de fluxo, com o motor apoiado por suportes normalmente presos à estrutura dessa armação. O ventilador é projetado para movimentar o ar de um espaço fechado a outro a pressões estáticas relativamente baixas. O tipo de armação e posição da hélice tem influência decisiva no desempenho do ar e eficiência do próprio ventilador.[2]

2.2.1.1 Axial Propulsor

É o tipo mais barato para mover grandes volumes de ar a baixas pressões, sendo frequentemente utilizado para circulação de ar ambiente. [2]

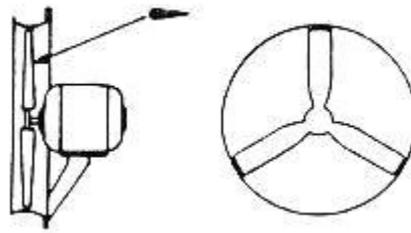


Figura 3: Exemplo de Ventilador Axial Propulsor

2.2.1.2 Axial Comum

Possui ampla calota central, que possibilita sua utilização a pressões mais elevadas. É freqüentemente usado em ventilação de minas subterrâneas e, em algumas ocasiões, em indústrias. Nesse tipo de ventilador, a forma das pás é muito importante, e eles não devem ser usados onde haja risco de erosão e corrosão. [2]

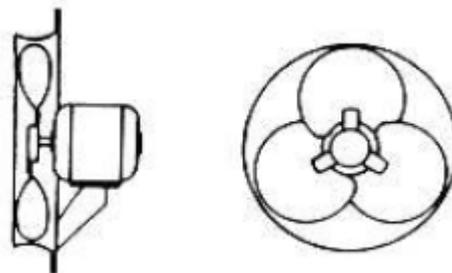


Figura 4: Exemplo de Ventilador Axial Comum

2.2.1.3 Propulsor Turbo-Axial

Trata-se de um propulsor, com pás mais grossas e mais largas, colocado dentro de um tubo, o que permite sua direta conexão como dutos. [2]

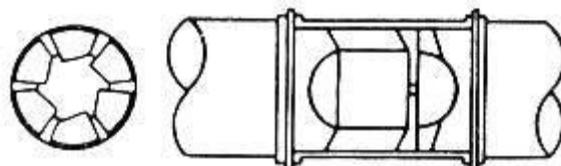


Figura 5: Exemplo de Propulsor Turbo Axial

2.2.1.4 Ventiladores HVLS (*High Volume Low Speed*)

Aplicações típicas para ventiladores HVLS se enquadram no ambiente industrial e comercial. Em aplicações industriais, o ar condicionado é muitas vezes inviável por seu custo elevado. Ventiladores instalados em espaços como armazéns, galpões, hangares e centros de distribuição podem prevenir o estresse por calor, aumentar o conforto do trabalhador e a produtividade tanto dos trabalhadores quanto da pecuária. Os ventiladores HVLS também são usados em espaços comerciais, onde o ar-condicionado é mais comum, mas o aumento do fluxo de ar dos ventiladores de teto pode aumentar o conforto dos ocupantes de maneira econômica ou impedir a estratificação. Aplicações comerciais típicas incluem shoppings, igrejas, edifícios de escritórios, terminais de aeroportos, academias e escolas. [1]

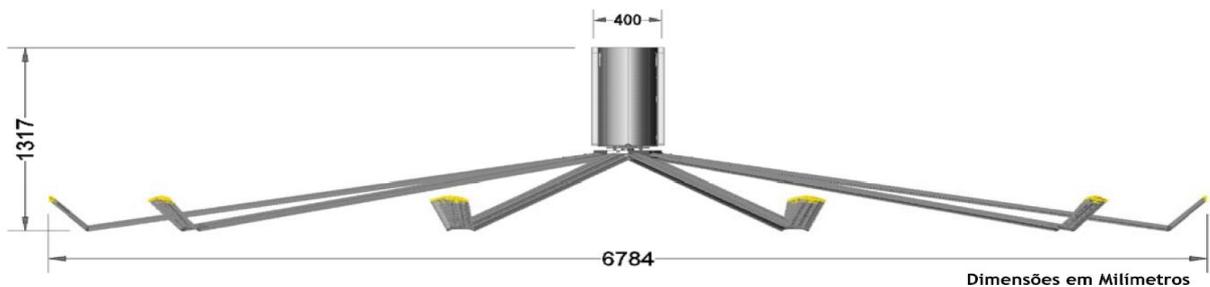


Figura 6: Exemplo de Ventilador HVLS e suas dimensões

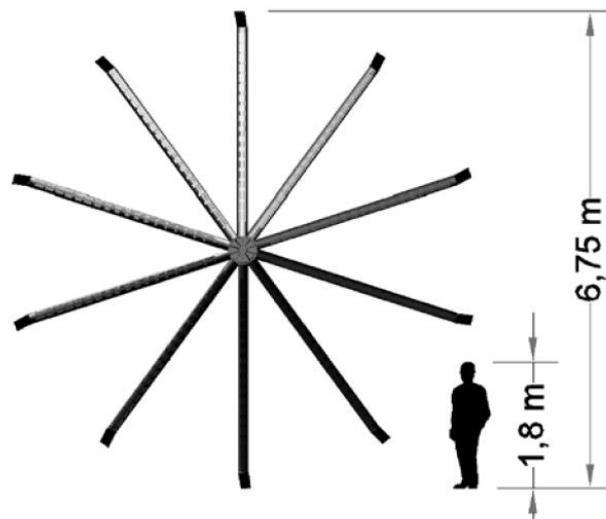


Figura 7: Comparativo dimensional entre um Ventilador HVLS e uma pessoa



Figura 8: Ventilador HVLS em operação

Embora originalmente desenvolvidos para celeiros de gado, os ventiladores HVLS foram inicialmente comercializados para aplicações industriais para manter os trabalhadores em grandes áreas refrigerados, aumentando a velocidade do ar através deles. Ventiladores HVLS também têm sido usados recentemente em galpões de aves e celeiros para fornecer resfriamento suplementar dos animais, aumentando a circulação de ar em baixa velocidade. Os ventiladores movem o ar gerando uma velocidade vertical para baixo. O fluxo de ar vertical atinge o chão e é então direcionado na direção horizontal e radialmente para longe da linha central do ventilador. [1]

2.2.2 Ventilador Centrífugo

Um ventilador centrífugo consiste em um rotor, uma carcaça de conversão de pressão e um motor. O ar entra no centro do rotor em movimento na entrada, é acelerado pelas palhetas e impulsionado da periferia do rotor para fora da abertura de descarga. [2]

2.2.2.1 Centrífugo de pás para trás

Possui duas importantes vantagens: apresenta maior eficiência e auto limitação de potência. Isso significa que, se o ventilador está sendo usado em sua máxima potência, o motor não será sobrecarregado por mudanças de sistema de dutos. É um ventilador de alta eficiência e silencioso, se trabalhar num ponto adequado. [2]

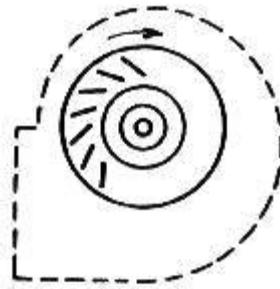


Figura 9: Ilustração de Ventilador Centrífugo de pás para trás

2.2.2.2 Centrífugo de pás radiais

É um ventilador robusto, para movimentar efluentes com grande carga de poeira, poeiras pegajosas e corrosivas. Apresenta menores possibilidades de "afogar", sendo usado para trabalhos mais pesados. A eficiência desse tipo de ventilador é baixa, e seu funcionamento, barulhento. [2]

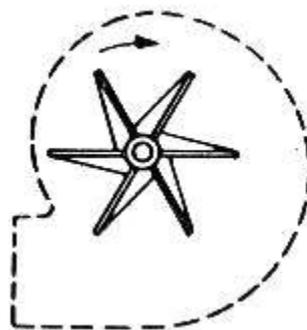


Figura 10: Ilustração de Ventilador Centrífugo de pás radiais

2.2.2.3 Centrífugo de pás para frente

É mais eficiente, tem maior capacidade exaustora a baixas velocidades, e não é adequado para trabalhos de alta pressão nem para altas cargas e poeira, apresentando problemas frequentes de corrosão, se mal utilizado. [2]

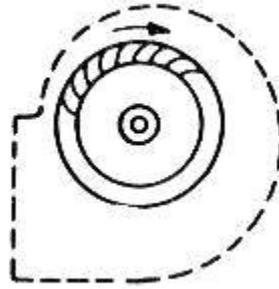


Figura 11: Ilustração de Ventilador Centrífugo de pás para frente

2.3 EFEITO DO MOVIMENTO DO AR SOBRE O CONFORTO DE UMA PESSOA

É sabido que o movimento do ar alivia a sensação de calor, uma vez que o mesmo abaixa a temperatura da pele. É importante que se façam umas considerações sobre as perdas de calor sofridas pelo corpo humano, para uma melhor compreensão do conforto relativo que se pode alcançar com a ventilação. [3]

Para que, em um clima tropical, seja possível trabalhar em condições ambientais necessárias primordialmente à saúde e secundariamente à produtividade, deve-se procurar atender a condições adequadas de ventilação. [3]

Entretanto, é preciso atentar para o fato de que condições ambientais adversas de calor, traduzidas por uma temperatura e grau de umidade elevados ou uma secura excessiva do ar e baixa temperatura, podem, em prazo maior ou menor, minar e abalar a resistência do organismo, favorecendo o estabelecimento de uma série de doenças. [3]

2.3.1 Formas de Transmissão de Calor

É de conhecimento público que a temperatura do corpo é regida por três processos físicos de transmissão de calor: a radiação, a convecção e a evaporação. A liberação de calor por convecção e evaporação é consideravelmente influenciada pelo movimento do ar. [3]

2.3.1.1 Radiação ou Irradiação

É sabido que a temperatura do corpo é regida por três processos físicos de transmissão de calor: a radiação, a convecção e a evaporação. [3]

O corpo humano transmite ou recebe calor por radiação, conforme sua temperatura seja maior ou menor que as das superfícies existentes no ambiente. Assim, se as paredes do ambiente forem frias, o corpo humano perderá calor por radiação ou irradiação. Se as superfícies forem mais quentes do que a pele, a temperatura do corpo aumentará por efeito da radiação. A transferência de calor por radiação depende pois das temperaturas do corpo e das superfícies circundantes, mas não necessita da movimentação do ar para que se processe, uma vez que a propagação se realiza sob a forma de energia radiante. Quando esta energia radiante atinge a superfície do corpo, transforma-se em calor. A emissão de calor por radiação pode ser calculada pela equação: [3]

$$Q_{rad} = \alpha_{rad} \cdot S_{rad} \varphi (t_{hv} - t_l)$$

Q_{rad} - emissão de calor por radiação (kcal/h);

α_{rad} - coeficiente de transmissão de calor por radiação pelo homem vestido (kcal/m²h°C);

S_{rad} - superfície do corpo (m²) eficaz para a radiação;

φ - relação de ângulos da radiação do homem sobre o volume ambiente total (coeficiente de radiação);

t_{hv} - temperatura superficial média do homem vestido;

t_l - temperatura superficial média das superfícies do local (°C)

2.3.1.2 Convecção

Quando a temperatura do ar ambiente é inferior à da pele, processa-se uma perda de calor do corpo para o ar por efeito de condução e de convecção. A condução se dá pelo contato do corpo com a película de ar que o envolve. Isto porque, na condução, o calor se propaga de molécula a molécula sem transporte de massa. Quando o corpo humano se encontra em repouso e o ar circundante se acha tranqüilo, o ar que estiver imediatamente em contato com a pele se aquece, de modo a ficar com a temperatura da pele. Inicialmente, verifica-se um fluxo de calor através dessa camada de ar por condução. À medida que isto vai ocorrendo, a transferência de calor da pele para o ar vai se amortecendo. Se o ar aquecido pela

pele for removido por uma corrente de ar, estabelece-se com o ar ambiente uma corrente de convecção; a velocidade da convecção aumentará e a temperatura do corpo irá diminuindo. Isto explica por que a corrente de ar proporcionada por um ventilador produz sensação de frescor.

Convém repetir que se a temperatura ambiente do ar for inferior à da pele, haverá uma transferência de calor por condução e convecção para o ar. Se entretanto a temperatura do ar for sensivelmente maior que a da pele, o calor do corpo sofrerá um aumento por efeito da convecção que a temperatura do corpo é regida por três processos físicos de transmissão de calor: a radiação, a convecção e a evaporação. [3]

2.3.1.3 Evaporação

Nem sempre a perda de calor do corpo humano por radiação e convecção é suficiente para regular a temperatura do corpo. Então, entram em atividade as glândulas sudoríparas, de modo que o corpo possa vir a perder calor por efeito da evaporação da umidade que se forma na pele. Simultaneamente com a transpiração, ocorre um fenômeno de mudança de estado físico, com a transformação do suor em vapor d'água. Mas para que isto aconteça, é necessário que ocorra uma certa absorção de energia. Essa energia é fornecida pelo calor da superfície da pele, cuja umidade está sendo evaporada, e vem a ser o calor latente de vaporização. De um modo simples podemos dizer que à medida que a umidade evapora sobre uma superfície quente, extrai calor, resfriando a superfície. Calor latente é calor aplicado na mudança de estado físico, sem que ocorra simultaneamente variação da temperatura, e que calor sensível é aquele que se manifesta pela existência de certa temperatura ou por uma variação da mesma. A eliminação desse calor latente do corpo se realiza, portanto pela evaporação do suor da pele. A velocidade segundo a qual o calor é eliminado depende da rapidez com que se processa a evaporação, a qual por sua vez depende da capacidade que o ar possui de eliminar a umidade que nele vai se formando com a evaporação. Quando o ar se encontra parado, a camada do mesmo em contato com a pele e a que fica entre a roupa e a pele ficam praticamente saturadas de umidade e, portanto não possuem mais condições de absorver a umidade existente na pele. Por conseguinte, o suor evapora mais lentamente do que vai sendo formado, e a pele fica molhada de suor. Nessa situação, há uma transferência de calor por condução através da camada superficial de ar sobre a pele. Fazendo-se incidir correntes de ar sobre a pele, a camada de ar junto à mesma, saturada de umidade, dispersa-se, e portanto a perda de calor por evaporação melhora. Desde que o ar do ambiente não esteja

excessivamente impregnado de umidade, e, evidentemente, não esteja saturado, um movimento de ar, com certa velocidade, conseguirá evaporar o suor sobre a pele mais rapidamente do que o mesmo está sendo produzido, conduzindo a uma sensação de certo bem-estar.

O movimento do ar tem por efeito:

- a) acelerar a perda de calor por convecção;
- b) auxiliar o corpo a dissipar o calor fornecido por condução na camada de ar superficial da pele;
- c) auxiliar a perda de calor por transpiração, permitindo ao homem suportar temperaturas até certo ponto elevadas.

O movimento do ar é necessário não somente para remover o calor por evaporação, mas também para controlar a intensidade da transpiração. Uma transpiração excessiva debilita o organismo humano, principalmente devido à perda de sais minerais. Até mesmo em temperaturas moderadas é conveniente provocar-se certo movimento de ar para acelerar a perda de calor do corpo por convecção, de modo a reduzir a transpiração. Em locais onde a temperatura varia de 21 a 24°C, um deslocamento de ar com velocidade de 12 m/min provoca uma sensação refrescante, confortável, desde que as pessoas estejam realizando atividades fracas. Em locais mais quentes, proximidade de fornos, estufas etc. ou onde se realizem trabalhos mais intensos, a velocidade do ar poderá ter que chegar a 30 e até 130m/min e até mais para que se possam obter condições suportáveis. [3]

EFEITO DO MOVIMENTO DO AR SOBRE O CONFORTO DE UMA PESSOA

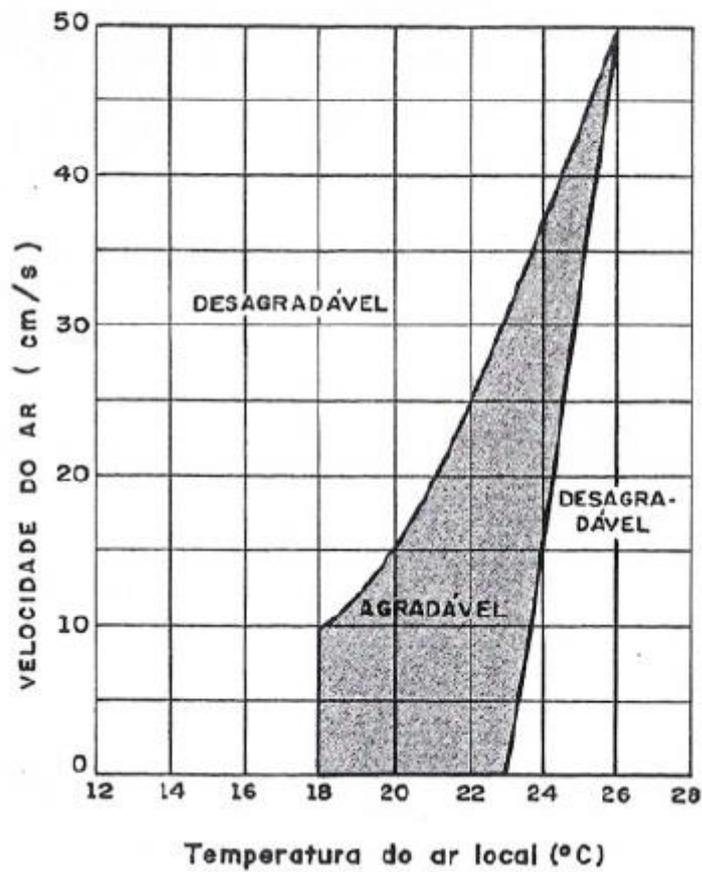


Figura 12: Zona de bem-estar para valores da temperatura do ar local e velocidade do ar, segundo Roedler [3]

Velocidade do ar			Sensação de resfriamento equivalente
m/s	m/min	ft/min	
0,1	6	20	0° (ar parado)
0,3	18	59	1°
0,7	42	138	2°
1,0	60	197	3°
1,6	96	315	4°
2,2	132	432	5°
3,0	180	590	6°
4,5	270	885	7°
6,5	390	1.279	8°

Figura 13: Sensação de resfriamento equivalente [3]

2.4 Psicrometria

Psicrometria é o estudo das propriedades e características do ar e da determinação das mesmas. Em Ventilação Industrial são feitas referências ou utilizadas grandezas denominadas psicrométricas, razão pela qual serão apresentadas as informações que se seguem. Em instalações de conforto ambiental e ar condicionado, a psicrometria se acha sempre presente na elaboração de projetos e na execução e manutenção das instalações. [3]

2.4.1 Temperatura de Bulbo Úmido

Obtida com um termômetro em cujo bulbo é colocado uma gaze umedecida e que se faz girar ou sacudir, provocando a evaporação da água colocada na gaze. Pode ser determinado também com o psicrômetro, instrumento que se vê a seguir:

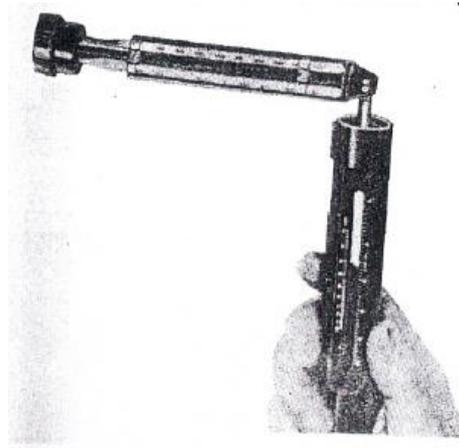


Figura 14: Psicrômetro

2.4.2 Umidade Relativa

É a relação entre o peso de vapor d'água existente em 1 kg (ou 1m³) de ar úmido a uma determinada temperatura e o peso da umidade que deveria existir se o quilograma de ar estivesse saturado, de umidade na mesma temperatura. Define-se também como "a relação entre a pressão real do vapor d'água existente em certo volume (ou peso de ar), a uma determinada temperatura, e a pressão de vapor d'água que deveria existir se a mesma quantidade de ar estivesse saturada à mesma temperatura". [3]

2.4.3 Carta Psicrométrica

O diagrama ou carta psicrométrica relaciona várias grandezas que se consideram em instalações de ventilação e, principalmente, nas de ar condicionado. Corresponde, em princípio, ao chamado diagrama de Mollier para o ar úmido. A carta psicrométrica foi elaborada referida à pressão do nível do mar, ou seja, de 760 mm de mercúrio, e pode ser usada com suficiente exatidão para pressões compreendidas entre 736 e 787 mm Hg.

Existem diversas cartas psicrométricas, publicadas pela Carrier, pela Trane Company, por outras empresas fabricantes de equipamentos de ar condicionado e pela ASHRAE (American Society for Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc.)

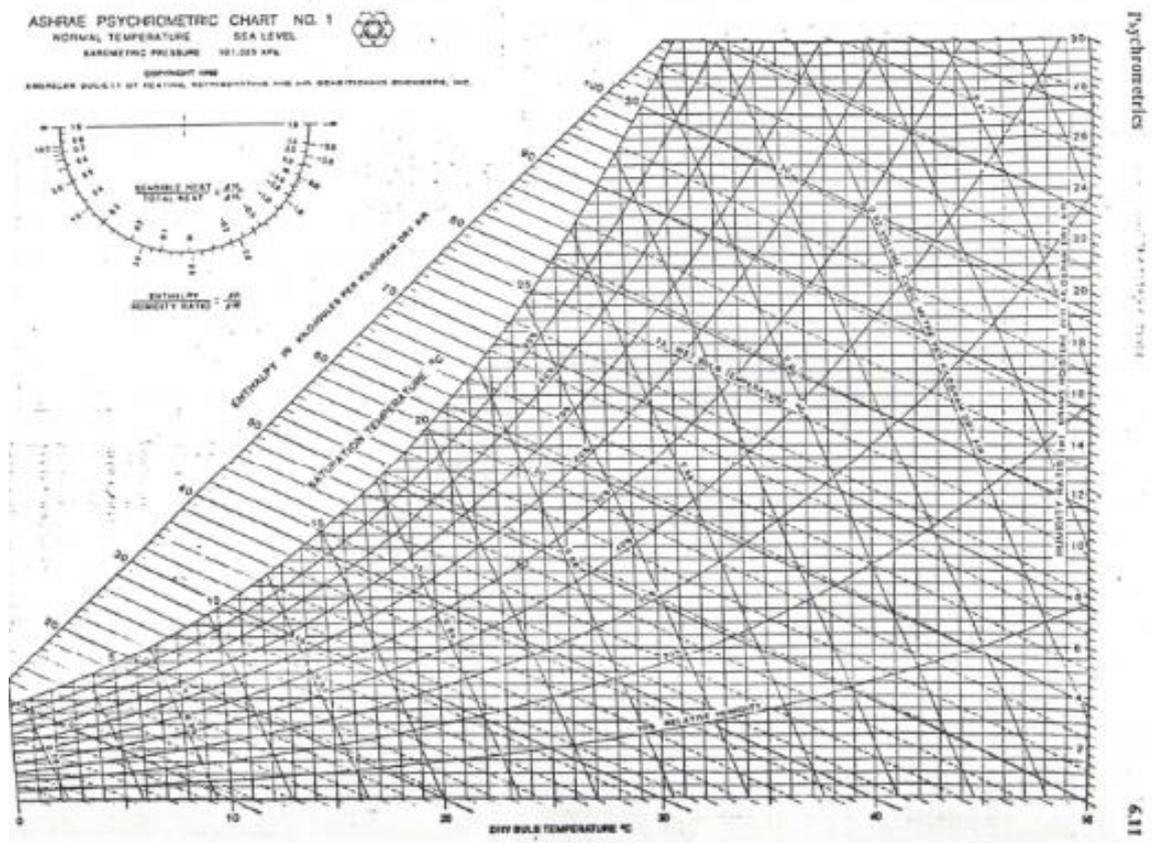


Figura 15: Carta Psicrométrica

As grandezas representadas nas cartas costumam ser:

- Temperatura lida no termômetro de bulbo seco (TBS);
- Temperatura lida no termômetro de bulbo úmido (TBU);
- Umidade relativa (UR). É determinada a partir dos itens a e b;

- d) Umidade específica, expressa em grãos de umidade por lb de ar seco ou gramas de umidade por kg de ar seco;
- e) Volume específico (volume de unidade de peso de ar), expresso em pé cúbico por lb de ar seco ou metro cúbico por kg de ar seco;
- f) Entalpia ou calor total, expressa em Btu por lb de ar seco e umidade combinados. É também designada como entalpia de saturação;
- g) "Ponto de orvalho" (PO) ou temperatura de saturação, que, como vimos, é a temperatura com a qual o vapor d'água contido no ar se condensa sobre uma superfície;
- h) "Pressão de vapor", isto é, pressão reinante sobre a água numa determinada temperatura, abaixo da qual a mesma entra em ebulição. É expressa em polegadas de coluna de mercúrio ou mm de coluna de mercúrio.

3. Metodologia de Cálculo

Foram calculados a vazão máxima de ar obtida pelos ventiladores que estavam instalados na planta e o consumo energético para serem comparados com a proposta de instalação/substituição pelo ventilador HVLS (EL-7000). Assim possibilitando uma análise de custo benefício entre efetividade, redução de sensação térmica, investimento e custo com manutenção.

3.1 Vazão de Ar e Área de Cobertura

No cenário anterior, tínhamos 5 unidades do modelo TurboFlash 22” , conforme imagem abaixo:



Figura 16: Modelo TurboFlash 22” (Foto tirada pelo autor)

Capacidade de vazão de 9600 m³/h, utilizando uma potência de 1,5 HP, atinge 35 m com a ventilação e cobre uma área de 360 m², cada um. [4]

Levou-se em consideração recorrente reporte dos operadores quanto ao desconforto térmico na operação e baixa efetividade do sistema vigente de ventilação, visto que a área de abrangência era menor do que a necessária, pela baixa quantidade de aparelhos instalados. Assim gerando-se um cenário pouco motivador e pouco propício para uma maior produtividade e consequente efeito motivacional.

3.2 Consumo Energético

O modelo TurboFlash 22” é munido de um motor com potência de 1,5 HP, seguindo com o cálculo de consumo energético:

$$\begin{aligned}1 \text{ HP} &= 745,7 \text{ Watts} \\1,5 \text{ HP} &= 1118,55 \text{ Watts}\end{aligned}$$

Logo um consumo de 0,7457 Kw/h para cada unidade.

3.3 Manutenção

Com equipe própria de manutenção da planta, a manutenção preventiva se resume em observação das partes móveis para identificação de áreas oxidadas ou resíduos que dificultem o funcionamento do ventilador. Resume-se em limpeza constante de todo o sistema conforme manual do fabricante.

4. Escolha do Tipo de Ventilador

4.1 Localização e Clima do Local de Projeto

Indústria de cosméticos localizada na região da Pavuna, no Rio de Janeiro. O projeto de ventilação foi implementado no galpão do Fluxo Logístico, responsável pela recepção de insumos e expedição dos produtos finalizados para os centros de distribuição. Área com 8 docas abertas para a recepção de caminhões e carretas, com área aproximada de 3000 m².

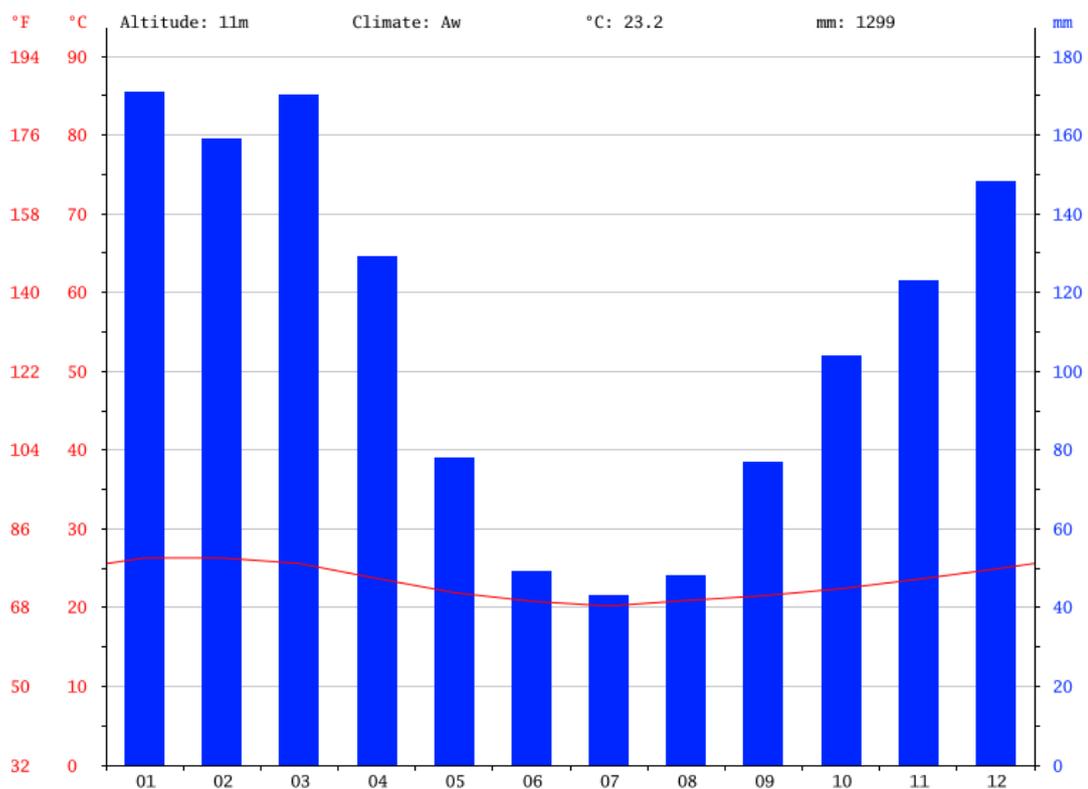


Figura 17: Média anual de temperatura e índice pluviométrico na Pavuna/Duque de Caxias

[5]

Em dias de pico de temperatura, a sensação térmica pode ultrapassar 50°C, medições realizadas *in loco* registraram 55°C no solo e 72°C na superfície do telhado, feita de liga de alumínio.

4.2 Análise de opções em ventilação industrial no mercado

Feita pesquisa de mercado, foi identificada ampla gama de produtos, porém maioria com pouca vazão, necessitando de maior número de unidades, conseqüente aumento de consumo energético pela planta e aumento de ruído. Considerando o cenário atual de crise

econômica e necessidade de viés sustentável nos projetos à serem implementados, não atenderam à necessidade previamente definida. Em todos os casos demandariam mudanças estruturais no galpão, também não conforme com a diretriz inicial do projeto, como por exemplo: recorte do telhado para a instalação do modelo Ventileve, obra de adequação e instalação na parede para os modelos Axial Direto e Sirocco. Exemplos de soluções encontradas, porém longe do ideal:



Figura 18: Ventilador - Tubo Axial Direto (Vazão de de até 135.000 m³/hora)



Figura 19: Ventilador Eólico Modelo Ventileve 600 (Vazão de 4.000 m³/hora)



Figura 20: Caixa de Ventilação com Ventilador Centrífugo Dupla Aspiração Rotor Sirocco (Vazão de até 100.000 m³/hora)



Figura 21: Ventilador TurboFlash 22'' (Vazão de até 9600 m³/h)

4.3 Escolha do Modelo EL-7000

O ventilador selecionado para otimização da climatização do galpão logístico foi o EL-7000 e o EL-5500, da fabricante Elefant.



Figura 22: Modelo de ventilador HVLS Elefant

O ábaco abaixo, referente ao modelo, permite calcular a temperatura que o ser humano realmente sente, que é chamada de Temperatura Efetiva, conforme estabelece a NR-17. Para calcular, basta entrar com a temperatura de Bulbo Seco (escala da esquerda), com a temperatura de Bulbo Úmido (escala da direita) e traçar uma reta ligando os dois valores. Na intersecção da reta resultante com a curva da velocidade do ar, obtem-se a Temperatura Efetiva ou Temperatura de Sensação Térmica. [6] [7]

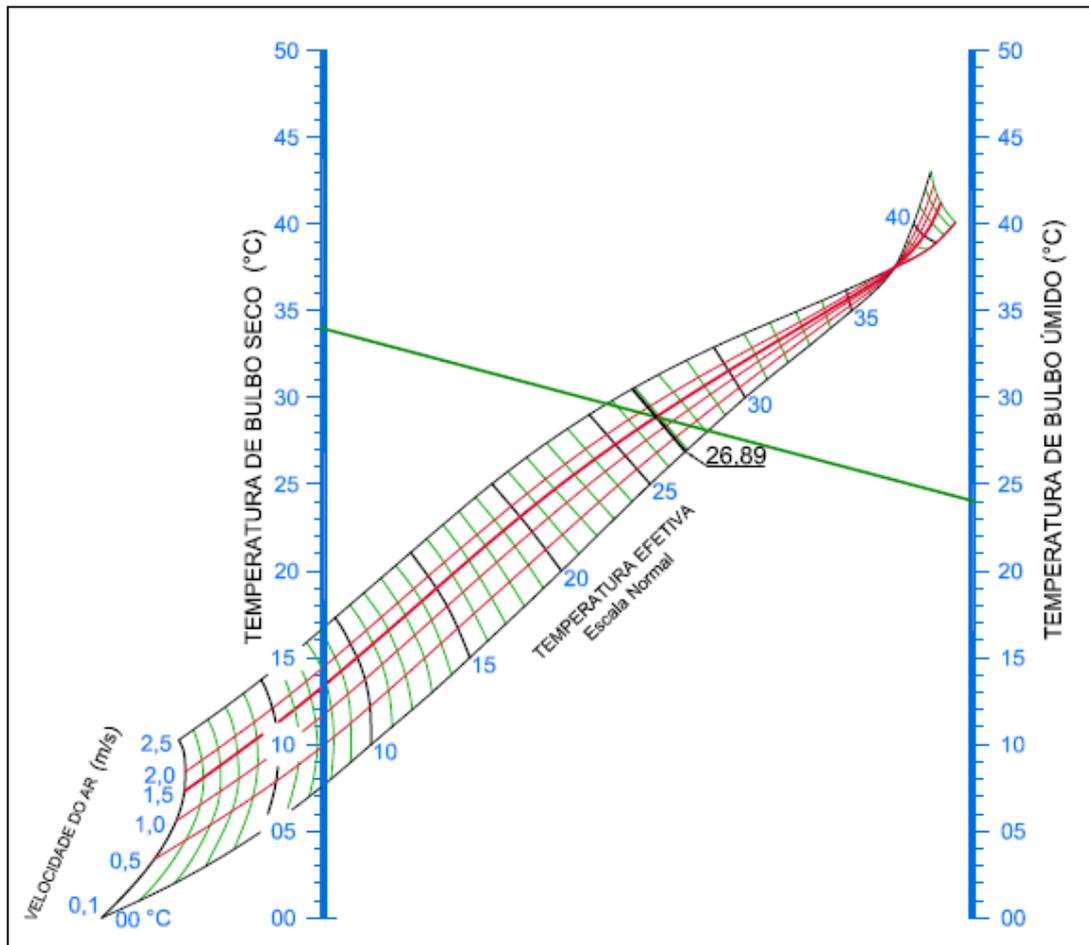


Figura 23: Sensação térmica resultante conforme especificação de velocidades possíveis do ar de acordo com o fornecedor do ventilador HVLS

As curvas indicam a velocidade mínima, média e máxima que os ventiladores HVLS produzem no ambiente. O ábaco acima não leva em consideração o calor radiante do telhado. Válido ressaltar que o galpão onde o ventilador foi instalado conta com manta térmica instalada.

- Temperatura de Bulbo Seco – 34°C
- Temperatura de Bulbo Úmido – 24°C

- Velocidade do ar - 1.5 m/s
- Sensação térmica resultante – 26,89°C

Com velocidade máxima de 2,5 m/s ou 150 m/min, estimamos uma redução de sensação térmica na faixa de 5 a 6 °C.

4.3 Projeto e Instalação

O local de trabalho dos operadores resume-se às áreas de embarque A, B e C, concentrando-se nas áreas B e C, com operação também na área da filmadora, conforme figura abaixo:



Figura 24: Planta do galpão

Analisada a área de atuação, de acordo com a movimentação dos operadores e necessidade de ventilação para redução de sensação térmica, foi feita simulação da instalação e área de cobertura de cada ventilador:

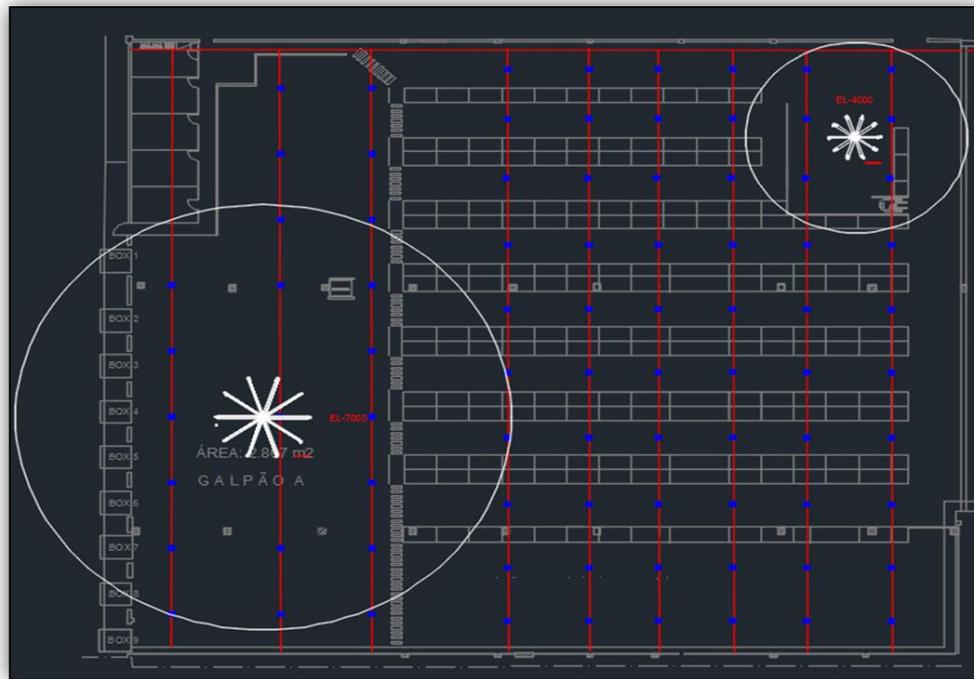


Figura 25: Simulação EL-7000 e EL-5500

De acordo com a simulação, verificou-se que, com apenas um ventilador EL-7000 na área de embarque e um EL-5500 na área da filmadora, teríamos um ambiente com ventilação uniforme e abrangente em grande parte da área da operação, sendo assim a medida adotada.

Foram adquiridos então, dois modelos de ventilador HVLS para a planta em questão, um de modelo EL-7000 e outro modelo EL-5500 conforme tabela abaixo:

Tabela 01: Modelos adquiridos para o projeto de climatização

Dados Técnicos				
Modelo	Diâmetros (mm)	Potência (cv)	Peso (Kg)	Vazão Máxima de Ar (m ³ / h)
EL-5500	5237	2	112	280.500
EL-7000	6784	2	139	398.430

Com base nos valores de tarifas energéticas vigentes de Julho de 2018, a seguinte análise foi feita:

Tabela 02: Premissa dimensional

Área (m ²)	1365
Pé direito (m)	7,7
Volume Total (m ³)	13583

Tabela 03: Horário de Funcionamento

Horário de Funcionamento	
Horas por dia	8
Dias por mês	22
Horas por mês	176

Para uma vazão igual ao modelo EL-7000, seria necessários 42 ventiladores do modelo TurboFlash 22”:

Tabela 04: Consumo Energético/Vazão (EL-7000/TurboFlash 22”)

	TurboFlash 22"	Total TurboFlash 22" (42 unidades)	HVLS EL-7000
Vazão (m ³ /h)	9600	403.200	398.430
Potência (HP)	1,5	63	2
Consumo Energético (kW/h)	1,11855	46,9791	1,4914
Valor R\$ (kW/h)	0,42	0,42	0,42
Custo Energético Mensal (R\$)	82,68	3472,69	110,14

Para uma vazão igual ao modelo EL-5500, seria necessários 30 ventiladores do modelo TurboFlash 22”:

Tabela 05: Consumo Energético/Vazão (EL-5500/TurboFlash 22”)

	TurboFlash 22"	Total TurboFlash 22" (30 unidades)	HVLS EL-5500
Vazão (m ³ /h)	9600	288000	280500
Potência (HP)	1,5	45	2
Consumo Energético (kW/h)	1,11855	33,5565	1,4914
Valor R\$ kW/h	0,42	0,42	0,42
Custo Energético Mensal (R\$)	82,68	2.480,49	110,14

Quantificando os gastos com o investimento e o consumo energético anual, temos o seguinte cenário:

Tabela 06: Consumo Energético Anual/Investimento

Ventilador	EL-7000	EL-5500	Total TurboFlash 22" (72 unidades)
Custo de Aquisição (R\$)	14.521,00	11.980,00	68.400,00
Consumo Energético Anual (R\$)	1.321,68	1.321,68	71.438,16

5. Conclusão e Trabalhos Futuros

Após toda a análise, foram adquiridos os dois ventiladores HVLS e instalados na planta, conforme figuras 26 e 27:



Figura 26: EL-7000 instalado na área de embarque (Foto tirada pelo autor)



Figura 27: EL-5500 instalado na área da filmadora (Foto tirada pelo autor)

Dentre as inúmeras vantagens dos equipamentos HVLS ELEFANT, vemos o benefício de um único equipamento executar a total e homogênea ventilação no ambiente dimensionado como um todo, possibilitando a redução da sensação térmica para a operação em até 6°C e sendo equivalente de até 42 equipamentos comuns de acordo com a aplicação exercida. Em comparação a equipamentos convencionais de alta rotação, é notável a economia energética e o retorno financeiro a quem opta pela tecnologia de ventilação HVLS. Feita análise do investimento, consumo energético mensal e anual, levando em consideração o custo por kw/h, chegamos à seguinte conclusão:

Tabela 07: Comparativo Custo Anual/Economia

	HVLS (EL 7000 e EL-5500)	TurboFlash 22" (72 und)	Economia no 1º Ano
Custo de Aquisição (R\$)	26.501,00	68.400,00	41.899,00
Custo Energético Anual (R\$)	2643,36	71.438,16	68.794,80
Consumo Energético Anual (kW)	6299,67	170091,19	163791,51

No primeiro ano, comparando as duas soluções e vazões de ar semelhante, teríamos uma economia de R\$ 110.693,80. Em 5 anos de utilização do produto, considerando o mesmo valor de tarifa de energia elétrica, a economia salta para R\$ 385.873,00.

Em termos energéticos, considerando 176 horas de uso por mês, anualmente teremos uma economia de aproximadamente 164 mW de energia elétrica. Mostrando-se uma tecnologia com grande viés de sustentabilidade, gerando menos impacto para o meio ambiente na questão de geração de energia e redução de custo operacional, tornando-se uma possibilidade para pequenas e médias empresas no sentido de climatização.

5.1 Trabalhos Futuros

Com as conclusões tiradas do projeto, existe a possibilidade de estudo e melhorias quanto à utilização da tecnologia HVLS, tais como:

- Promover o estudo do uso da tecnologia HVLS concomitante com sistemas de ar condicionado para redução de carga do mesmo.
- Análise de motorização dos ventiladores HVLS para um menor consumo energético.

- Análise aerodinâmica das pás para maior arrasto e conseqüente maior deslocamento de ar.
- Análise do formato e quantidade de *winglets* nas pás do ventilador *HVLS* para maior arrasto e efetividade.
- Análise estrutural e de efetividade para ventiladores de maior diâmetro.

6. Referências

- [1] **VENTILADORES INDUSTRIAIS HVLS**. RITE-HITE. Disponível em: <https://www.ritehite.com/pt/am/products/industrial-fans/hvls-fans>. Acesso em: 27/06/2018.
- [2] MEDEIROS DE OLIVEIRA, Jaime. **Noções de ventilação industrial**. Universidade Federal Paraná. Disponível em: http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/TM120/VENTILACAO_INDUSTRIAL.pdf. Acesso em: 18/06/2018.
- [3] MACINTYRE, Archibald Joseph: **Ventilação Industrial e Controle da Poluição**; 2ª edição Rio de Janeiro: Ed. Guanabara. 1990.
- [4] **APLICAÇÕES: VENTILADORES TURBOFLASH**. Tecnoflash Climatização. Disponível em: <http://www.tecnoflash.com.br/turboflash.php>. Acesso em: 02/06/2018
- [5] **CLIMA DUQUE DE CAXIAS**. Climate-Data.org. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-de-janeiro/duque-de-caxias-4040/> . Acesso em: 31/06/2018.
- [6] **MODELO INDUSTRIAL**. Elefant. Disponível em: <https://elefant.com.br/industrial/>. Acesso em: 27/06/2018.
- [7] **NORMA REGULAMENTADORA 17**: Ergonomia. Guia Trabalhista. Disponível em: <http://www.guiatrabalhista.com.br/legislacao/nr/nr17.htm>. Acesso em: 27/06/2018
- D.W. Kammel; M.E, Raabe; J. J. Kappelman: **Design of high volume low speed fan supplemental cooling system in dairy free stall barns** - University of Wisconsin–Madison.