



Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

Trabalho de Conclusão de Curso

Eficiência Energética na Climatização de Ambientes  
Através do Método de Resfriamento Evaporativo

Campina Grande-PB, abril de 2008.

Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

Trabalho de Conclusão de Curso

Eficiência Energética na Climatização de Ambientes  
Através do Método de Resfriamento Evaporativo

Aluno: André Martins Albuquerque      Mat.:20621478

Professor Orientador:      Professor Dr. Luis Reyes Rosales

*Trabalho apresentado ao Curso de Graduação em  
Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina  
Grande, em cumprimento parcial às exigências para  
obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.*

Campina Grande, abril de 2008



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

## Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado ao longo da vida a força necessária para lutar por meus objetivos, a graça das vitórias e aprendizado e gana pra superação nas derrotas.

Agradeço eternamente aos meus pais, Luiz Mendes e Liana, por serem os meus maiores exemplos de determinação, compromisso, hombridade, serenidade, qualidades inerentes ao bom engenheiro e bom homem. Agradeço eternamente o apoio e incentivo, fundamentais pra esta vitória.

Às minhas irmãs Ana Paula e Ana Luisa e meu irmão Lucas pelo companheirismo, amizade e encorajamento.

Ao professor Dr. Luis Reyes Rosales pela orientação deste trabalho.

Ao Rossiano e ao pessoal da JCS Funilaria Industrial que forneceram informações e materiais importantes para o estudo teórico e prático do equipamento de climatização evaporativa.

Aos amigos e colegas que ao longo da graduação compartilharam comigo o esforço, determinação, conhecimentos e memoráveis lembranças do curso de Engenharia Elétrica.

Aos inúmeros professores, do Departamento de Engenharia Elétrica e das disciplinas básicas, pelos ensinamentos preciosos para a formação de um engenheiro e um cidadão do mundo.

Aos funcionários, em especial Adail e Rosilda, por sempre se mostrarem prestativos e eficientes.

# Índice

<b>Capítulo 1 – Introdução</b> .....	1
1.1 – Considerações Gerais.....	1
1.2 – Estrutura do Trabalho.....	2
<b>Capítulo 2 – Conforto Térmico, Stress Térmico e Renovação de Ar</b> ...4	
2.1 – Introdução.....	4
2.2 – Definições.....	4
2.2.1 – Conforto Térmico.....	4
2.2.2 – Neutralidade Térmica.....	5
2.2.3 – Stress Térmico.....	5
2.3 – Princípios Fisiológicos.....	5
2.4 – Conseqüências do Stress Térmico.....	6
2.5 – Condições de Conforto Térmico.....	8
2.6 – Normalização.....	9
2.6.1 – Conforto Térmico.....	9
2.6.2 – Stress Térmico.....	10
2.7 – Renovação de Ar.....	11
<b>Capítulo 3 – Ventilação Forçada</b> .....	13
3.1 – Introdução.....	13
3.2 – Definições.....	14
3.3 – Sistemas de Ventilação.....	15
3.3.1 – Sistema de Ventilação Geral Diluidora.....	15
3.3.2 – Sistema de Ventilação Local Exaustora.....	16
3.4 – Ventiladores.....	16
3.4.1 – Centrífugos.....	16
3.4.2 – Ventiladores Axiais.....	18
3.5 – Projeto de Ventilação.....	20

3.5.1 – Dimensionamento de Ventiladores/Exaustores.....	20
3.5.2 – Exemplo de Dimensionamento.....	24
3.5.3 – Instalação Correta de Ventiladores/Exaustores.....	25
<b>Capítulo 4 – Controle de Velocidade.....</b>	<b>28</b>
4.1 – Introdução.....	28
4.2 – Inversores de Frequência.....	28
4.3 – Métodos de Controle dos Inversores de Frequência.....	30
4.3.1 – Controle Escalar.....	30
4.3.2 – Controle Vetorial.....	33
4.4 – Inversor de Frequência CFW-10 da Weg.....	35
4.4.1 – Especificação do Inversor de Frequência CFW-10.....	36
4.4.2 – Funções Básicas das Teclas.....	37
4.4.3 – Parâmetros.....	38
4.4.4 – Programação.....	44
4.4.5 – Sinalizações e Indicações no Display.....	45
4.4.5.1 – Mensagens de Erro.....	46
4.4.5.2 – Outras Mensagens.....	46
<b>Capítulo 5 – Resfriador Evaporativo: Conceitos Fundamentais.....</b>	<b>47</b>
5.1 – Introdução.....	47
5.2 – Resfriamento Evaporativo.....	47
5.3 – Princípio de Funcionamento.....	49
5.4 – Redução de Temperatura do Ar.....	51
5.5 – Critérios para Instalação e Bom Funcionamento do Sistema.....	55
5.6 – Vantagens.....	57
<b>Capítulo 6 – Resfriador Evaporativo: Um Projeto.....</b>	<b>59</b>
6.1 – Introdução.....	59
6.2 – Carcaça.....	61
6.3 – Sistema de Circulação de Água.....	65

6.4 – Painei Evaporativo.....	70
6.5 – Sistema de Ventilação Forçada.....	73
6.6 – Custos.....	76
<b>Capítulo 7 – Comparativo Entre Climatizadores.....</b>	<b>78</b>
7.1 – Introdução.....	78
7.2 – Climatizador Evaporativo por Nebulização.....	79
7.3 – Sistema de Ar Condicionado Convencional.....	80
7.4 – Ventiladores.....	85
<b>Capítulo 8 – Conclusão.....</b>	<b>87</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>88</b>

## Lista da Figuras

<b>Figura 2.1</b> – Gráfico Produtividade × Temperatura.....	7
<b>Figura 2.2</b> – Diagrama do conforto térmico.....	9
<b>Figura 3.1</b> – Ventilador Centrífugo.....	17
<b>Figura 3.2</b> – Ventiladores Axiais.....	19
<b>Figura 3.3</b> – Ventilador Axial.....	19
<b>Figura 3.4</b> – Componentes de um Ventilador Axial.....	20
<b>Figura 3.5</b> – Posicionamento de Ventiladores e Exaustores.....	25
<b>Figura 3.6</b> – Exaustor ao Lado de Janela.....	26
<b>Figura 3.7</b> – Pressão Interna do Ambiente.....	26
<b>Figura 4.1</b> – Diagrama de Blocos de um Inversor de Frequência.....	29
<b>Figura 4.2</b> – Configuração de Chaves do Estágio Inversor.....	30
<b>Figura 4.3</b> – Gráfico Tensão×Frequência do Controle Escalar.....	32
<b>Figura 4.4</b> – Gráfico Torque×Frequência.....	33
<b>Figura 4.5</b> – Inversor CFW-10 da Weg.....	35
<b>Figura 4.6</b> – Vista Frontal do Inversor.....	37
<b>Figura 4.7</b> – Indicação das Variáveis Parâmetros e Valor.....	44
<b>Figura 4.8</b> – Procedimento de Programação.....	45
<b>Figura 5.1</b> – Processo de Resfriamento Evaporativo.....	48
<b>Figura 5.2</b> – Resfriador Evaporativo Direto.....	50
<b>Figura 5.3</b> – Resfriador Evaporativo Direto.....	50
<b>Figura 5.4</b> - Variação da temp. de saída em relação a umidade e temp. Externa.....	53
<b>Figura 5.5</b> – Renovação do Ar.....	56
<b>Figura 6.1</b> – Vista Frontal/Ambiente Interno.....	60
<b>Figura 6.2</b> – Vista Frontal da Parte Traseira/Ambiente Externo.....	60
<b>Figura 6.3</b> - Vista Lateral da Parte Traseira/Ambiente Externo.....	61
<b>Figura 6.4</b> - Carcaça completa do Resfriador Evaporativo.....	62
<b>Figura 6.5</b> – Parte Traseira da Carcaça.....	63

<b>Figura 6.6</b> – Tubo Central.....	64
<b>Figura 6.7</b> – Parte Frontal.....	64
<b>Figura 6.8</b> – Vistas.....	65
<b>Figura 6.9</b> – Detalhe de conexão e fixação de tubulação de distribuição de água....	67
<b>Figura 6.10</b> – Tubo de Gotejamento.....	67
<b>Figura 6.11</b> – Reservatório de Água.....	69
<b>Figura 6.12</b> - Bóia.....	69
<b>Figura 6.13</b> – Caixa de Água.....	70
<b>Figura 6.14</b> – Raspa de Pinho.....	71
<b>Figura 6.15</b> – Painel Evaporativo.....	72
<b>Figura 6.16</b> – Painel Evaporativo Instalado em Resfriador.....	72
<b>Figura 6.17</b> – Hélice Acoplada ao Eixo do Motor.....	73
<b>Figura 6.18</b> – Inversor de Frequência CFW-10 da Weg.....	74
<b>Figura 6.19</b> – Alimentação Elétrica.....	75
<b>Figura 6.20</b> – Tela Frontal.....	76
<b>Figura 7.1</b> – Fábrica Têxtil.....	79
<b>Figura 7.2</b> – Oficina Mecânica.....	79
<b>Figura 7.3</b> – Diagrama de um Ar Condicionado.....	81
<b>Figura 7.4</b> – Condensador e 2 Splits.....	82
<b>Figura 7.5</b> – Self Contained.....	82
<b>Figura 7.6</b> – Chiller.....	83
<b>Figura 7.7</b> – Ventilador.....	86

## **Lista de Tabelas**

<b>Tabela 2.1</b> – Sintomas do Stress Térmico.....	7
<b>Tabela 3.1</b> – Sugestão de Quantidade de Renovação de Ar.....	21/22
<b>Tabela 3.2</b> – Características Técnicas Ventiladores/Exaustores Ventisilva.....	23/24
<b>Tabela 4.1</b> – Descrição dos Parâmetros.....	38/39
<b>Tabela 4.2</b> – Mensagens de Erro e Significados.....	46
<b>Tabela 4.3</b> – Mensagens de Estado e Significados.....	46
<b>Tabela 5.1</b> – Redução de Temperatura.....	52
<b>Tabela 5.2</b> – Desempenho do Climatizador Evaporativo em Regiões do Brasil.....	54
<b>Tabela 6.1</b> – Custos.....	77
<b>Tabela 7.1</b> – Estimativa de Custos Operacionais.....	84

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Considerações Gerais

O condicionamento do ar é responsável pelo conforto térmico e aumento da eficiência do homem. O sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor é o método de climatização mais utilizado atualmente. Assim sendo, o consumo de energia elétrica em instalações residenciais ou comerciais chega a representar 50% do consumo de energia elétrica total da edificação.

Sob o aspecto da eficiência energética, este trabalho visa apresentar um equipamento de climatização de baixo custo que reduz o consumo de energia em mais de 90% e utiliza para isto um princípio de funcionamento simples e criativo, inspirado em processos naturais de trocas de calor.

O condicionamento de ar por resfriamento evaporativo pode representar uma excelente alternativa aos condicionadores de ar convencionais por se tratar de um método ambientalmente amigável, já que, além da redução do consumo de energia elétrica, e consequentemente da emissão de CO<sub>2</sub>, utiliza como fluido de trabalho a água e não fluidos tóxicos e poluentes utilizados em climatizadores convencionais.

Este trabalho apresenta os princípios básicos de funcionamento e considerações técnicas e construtivas para a utilização do resfriamento evaporativo em condicionamento de ar para o conforto térmico.

## 1.2 Estrutura do Trabalho

No capítulo 2 será apresentado as definições e condições necessárias para a obtenção do conforto térmico, assim como as explicações necessárias sobre o comportamento fisiológico do corpo humano para o adequado controle de temperatura corporal e uma breve explanação sobre a renovação de ar. Estes temas fundamentam a importância de implantação de sistemas de refrigeração e renovação de ar para o conforto térmico e conseqüente bem-estar do homem moderno.

No capítulo seguinte será realizado uma abordagem sobre sistemas de ventilação, apresentando definições de tipos de sistemas de ventilação e ventiladores. É importante enfatizar que o sistema de ventilação geral diluidora e os ventiladores axiais são de extrema importância para o projeto, já que este utiliza estes métodos para realização da ventilação. Será mostrado também um dimensionamento prático de ventiladores/exaustores dentro de um projeto.

O controle de velocidade no projeto do climatizador evaporativo será realizado através de um inversor de frequência. Por esta razão, o capítulo 4 apresenta os métodos de controle de velocidade e um breve estudo do funcionamento do inversor de frequência CFW-10 da Weg.

No capítulo 5 será realizada uma explanação qualitativa sobre o princípio de funcionamento do método de resfriamento evaporativo, assim com do equipamento resfriador evaporativo.

O capítulo 6 trás uma proposta de projeto empiricamente dimensionado de um climatizador evaporativo construído aqui em Campina Grande, com materiais e mão-de-obra encontrados nesta localidade. A construção do equipamento é detalhada passo-a-passo e ao final é apresentado o custo total de investimento para construção de um resfriador evaporativo.

Um comparativo do climatizador em questão com outros métodos de refrigeração será realizado no capítulo 7, com destaque para a comparação com o condicionador de ar convencional, comparação esta que desde o princípio motivou o estudo do resfriador evaporativo.

Finalmente, as conclusões extraídas deste trabalho serão apresentadas no capítulo 8.

# Capítulo 2

## Conforto Térmico, Stress Térmico e Renovação de Ar

### 2.1 Introdução

Os estudos realizados e aqui apresentados de forma qualitativa e superficial sobre conforto térmico tem o objetivo de descrever as condições necessárias para a avaliação e concepção de um ambiente termicamente adequado às atividades e ocupações humanas. A importância do estudo do conforto térmico está baseado em 3 fatores essenciais: a satisfação do homem ou seu bem estar em se sentir termicamente confortável; a performance humana, já que a experiência e estudos mostram uma forte tendência de que o stress térmico, quer seja por frio ou quer seja por calor, causa a debilitação do estado geral de saúde e reduz o rendimento humano no que diz respeito às atividades intelectuais, manuais ou perceptivas; e a conservação de energia, já que o conhecimento das condições e dos parâmetros relativos ao conforto térmico evita desperdícios desnecessários com calefação ou refrigeração.

### 2.2 Definições

#### 2.2.1 Conforto térmico

“Conforto térmico é a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico”, foi a definição dada pela ASHRAE Standard 55-92, sociedade americana de aquecimento, refrigeração e ar condicionado.

### **2.2.2 Neutralidade térmica**

O pesquisador dinamarquês Ole Fanger ( 1970 ) definiu neutralidade térmica: “Neutralidade térmica é a condição na qual uma pessoa não prefira nem mais calor nem mais frio no ambiente ao seu redor”.

De acordo com Shin-Iche Tanabe ( 1984 ): “Neutralidade térmica é a condição da mente que expressa satisfação com a temperatura do corpo como um todo”.

Analisando dentro de uma ótica física dos mecanismos de trocas de calor, os professores do departamento de engenharia civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Roberto Lamberts e Antônio Augusto de Paula Xavier, sugerem uma definição para neutralidade térmica: “Estado físico, no qual todo o calor gerado pelo organismo através do metabolismo, seja trocado em igual proporção com o ambiente ao redor, não havendo nem acúmulo de calor, nem perda excessiva do mesmo, mantendo a temperatura corporal constante”.

### **2.2.3 Stress térmico**

Segundo os já citados professores da UFSC, o stress térmico pode ser considerado como o estado psicofisiológico a que está submetida uma pessoa, quando exposta as situações ambientais extremas de frio ou calor.

## **2.3 Princípios Fisiológicos**

O corpo humano possui um mecanismo termoregulador que controla as variações térmicas do organismo. Este corpo é homotérmico, ou seja, sua temperatura deve permanecer essencialmente constante. O mecanismo termoregulador tem como objetivo criar condições para a manutenção da

temperatura corporal constante. Assim sendo, a teoria assume que a produção de calor pelo organismo será igual à perda de calor do mesmo para o ambiente. A temperatura interna do corpo humano varia aproximadamente de 35 a 37°C e para se obter estado de conforto térmico no desempenho das atividades admitem-se pequenas variações nesta temperatura interna.

O organismo gera calor, através do metabolismo dos alimentos ingeridos, necessário para o funcionamento fisiológico do organismo e para o desempenho das atividades externas, sendo que essa geração deve ser dissipada para que não haja superaquecimento do corpo e assim se mantenha o equilíbrio térmico do corpo.

Essa dissipação se dá através de mecanismos de trocas térmicas da pele (perda sensível de calor, por convecção e radiação e perda latente de calor, por evaporação do suor e por dissipação da umidade da pele) e através da respiração (perda sensível de calor por convecção e perda latente de calor por evaporação).

#### **2.4 Conseqüências do Stress Térmico**

O grau de stress causado pelo calor varia com a idade, saúde e características do corpo. A tabela 2.1 apresenta alguns possíveis sintomas de stress térmico associados à intervalos de temperatura aparente. A temperatura aparente é a sensação térmica que o corpo humano interpreta quando a umidade e/ou temperatura variam.

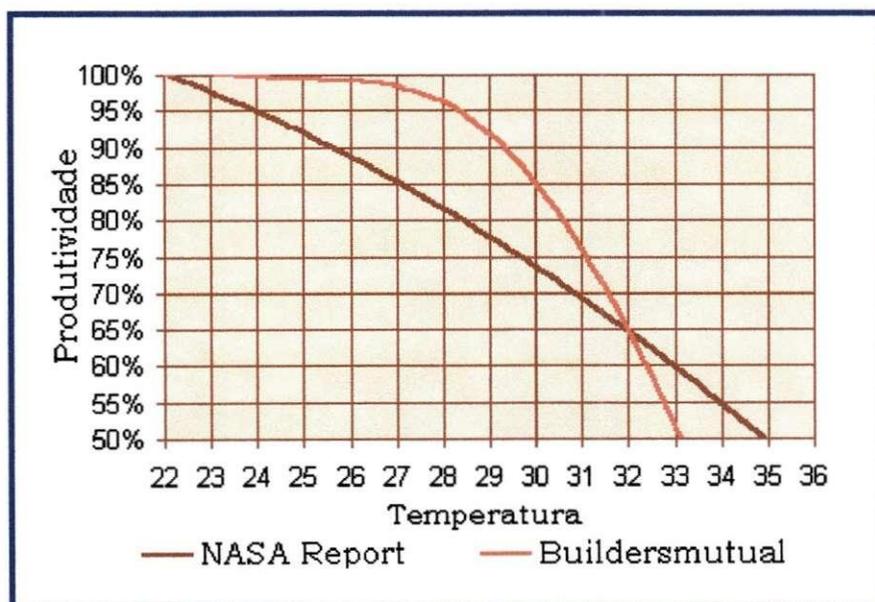
Temp. Aparente	Nível de Perigo	Síndrome de Calor ( sintomas)
27° a 32°C	<b>Atenção</b>	Possível fadiga em casos de exposição prolongada e atividade física
32° a 41°C	<b>Muito cuidado</b>	Possibilidade de câimbras ,esgotamento, e insolação para exposições prolongadas e atividade física
41° a 54°C	<b>Perigo</b>	Câimbras, insolação, e esgotamento prováveis. Possibilidade de dano cerebral (AVC) para exposições prolongadas com atividade física.
<b>Mais que 54°C</b>	<b>Extremo Perigo</b>	Insolação e Acidente Vascular Cerebral (AVC) iminente

**Tabela 2.1 – Sintomas do Stress Térmico**

**Fonte: MONTERO, 2005**

Em decorrência destas conseqüências do stress térmico, ocorre a queda de produtividade do trabalhador e conseqüentemente da produção em geral devido ao aumento de faltas, afastamento por doenças, turnover (rotatividade de mão de obra), acidentes de trabalho, setups (ajustes) das máquinas e de defeitos com conseqüente redução dos índices de qualidade.

A figura 2.1 apresenta um gráfico que correlaciona temperatura com produtividade publicado pela NASA e Buildersmutual:



**Figura 2.1 – Gráfico Produtividade × Temperatura**

**Fonte: MONTERO, 2005**

## 2.5 Condições de conforto térmico

Neutralidade térmica é condição necessária, mas não suficiente para que uma pessoa encontre-se em conforto térmico.

Para se atingir o conforto térmico, é necessário: neutralidade térmica; temperatura da pele, e taxa de secreção de suor, dentro de limites compatíveis com a atividade desempenhada; e não estar sujeito a desconforto localizado.

Segundo estudos empíricos desenvolvidos por Fanger, a atividade desempenhada pela pessoa regulará a temperatura de sua pele, bem como sua taxa de secreção de suor. Isso equivale dizer que se uma pessoa estiver desempenhando determinada atividade, e estiver suando muito acima do que os estudos realizados mostraram que deveria estar, ou a temperatura de sua pele estiver acima ou abaixo de valores que esses mesmos estudos demonstraram, a pessoa não estará certamente em conforto térmico.

Desconforto localizado é um incômodo que atinge parte do corpo, como: assimetria de radiação térmica; correntes de ar; diferença na temperatura de ar no sentido vertical; ou pisos aquecidos ou resfriados.

As pessoas apresentam zonas de respostas fisiológicas e comportamentais, de acordo com as condições a que estiver submetida e de acordo com a atividade que estiver desempenhando.

Para pessoas vestidas com vestimentas normais de trabalho (isolamento = 0,6 clo), a zona de conforto térmico situa-se entre 23° e 27°C.

A umidade relativa também contribui para o desconforto térmico. Temperaturas muito altas acompanhadas de valores elevados de umidade relativa são fatores responsáveis por este desconforto e suas sensações desagradáveis ao corpo humano.

A figura 2.2 mostra a faixa de conforto térmico em função da temperatura e umidade relativa do ar.

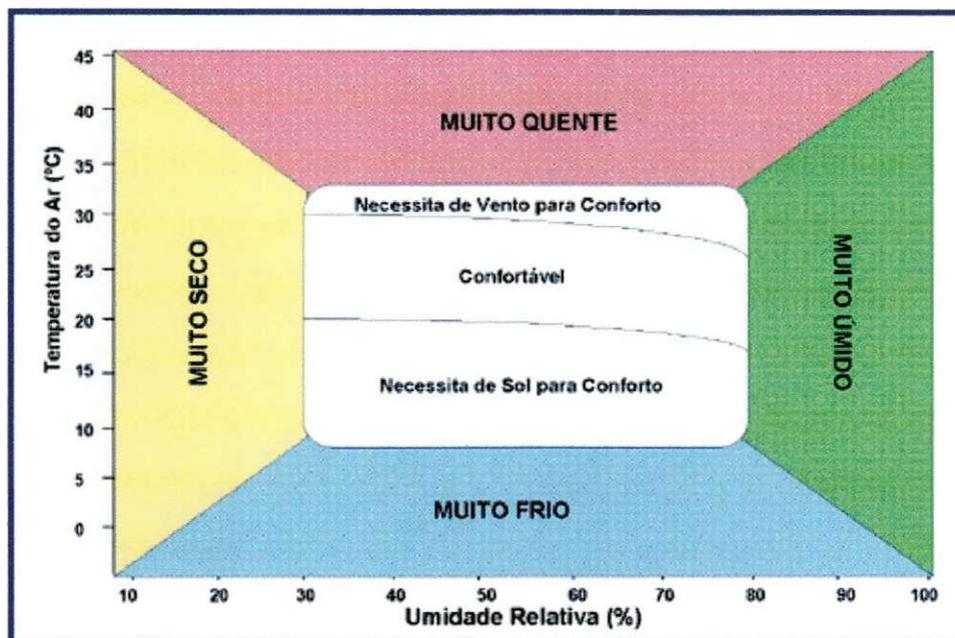


Figura 2.2 – Diagrama do conforto térmico

Fonte: OLIVEIRA, 2007

## 2.6 Normalização

### 2.6.1 Conforto Térmico

Devido à importância em manter o homem moderno confortável termicamente, os estudos sobre este assunto tiveram um aumento de interesse por parte dos pesquisadores.

Os cálculos analíticos do conforto térmico, baseados em estudos realizados em câmaras climatizadas (pesquisas realizadas no interior de ambientes totalmente controladas pelo pesquisador), apresentam 6 variáveis que influenciam o conforto térmico: Atividade desempenhada,  $M$ , ( $W/m^2$ ); Isolamento térmico das roupas utilizadas,  $I_{cl}$ , (clo); Temperatura

do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ); Temperatura radiante média,  $t_{rm}$ , ( $^{\circ}\text{C}$ ); Velocidade do ar,  $v_a$ , (m/s); Pressão parcial do vapor de água no ar ambiente,  $p_a$ , (kPa).

As normas existentes englobam estudos sobre todas estas variáveis, quer sejam em ambientes climatizados ou não.

As principais normas e guias de referência para estes estudos são:

- ISO 7730/94 – Ambientes térmicos moderados – Determinação dos índices PMV e PPD e especificações das condições para conforto térmico.
- ISO/DIS 7726/96 – Ambientes térmicos – Instrumentos e métodos para medições das quantidades físicas.
- ASHRAE Standard 55 – 1992 – Ambientes térmicos – Condições para ocupação humana.
- ASHRAE Fundamentals Handbook – Cap.8 – Thermal Comfort – 1997.
- ISO 8996/90 – Ergonomia – Determinação da produção de calor metabólico.
- ISO 9920/95 – Ergonomia de ambientes térmicos – Estimativa de isolamento térmico e resistência evaporativa de um traje de roupas.

### **2.6.2 Stress Térmico**

Os ambientes quentes e frios foram objetos de estudos e pesquisas com a finalidade de se obter índices de stress térmico e apontar procedimentos adequados para evitar tal situação.

A normatização existente engloba ambos os ambientes.

Os principais índices para a caracterização de ambientes quentes são: Índice de bulbo úmido e temperatura de globo (IBUTG) e a Taxa requerida de suor, conforme Szokolay e Auliciems (1997).

Índice de isolamento requerido de vestimentas (IREQ), desenvolvido por Holmer em 1984, é o principal índice para a caracterização do stress térmico por frio.

As normas mais conhecidas e utilizadas são:

- ISO 7243/1989 – Ambientes Quentes – Estimativa do stress por calor em trabalhadores, baseado no índice IBUTG.
- NR – 15 – Anexo 3 – MT/1978 – Limites de tolerância para exposição ao calor.
- ISO 7933/1989 – Ambientes Quentes – Determinação analítica e interpretação do stress térmico, utilizando o cálculo da taxa requerida de suor.
- ISO 9886/1992 – Avaliação de tensão térmica, através de medições fisiológicas.
- ISO/TR 11079/1993 – Avaliação de ambientes frios – Determinação do isolamento requerido das vestimentas (IREQ).

## **2.7 Renovação de Ar**

A qualidade do ar que respiramos interfere diretamente na qualidade de nossas vidas. Locais onde o sistema de ar condicionado não possuem os cuidados mínimos de manutenção e limpeza podem desenvolver sérios surtos de doenças contagiosas e respiratórias.

“Por ocasião da crise energética dos anos 70, decidiu-se construir prédios estanques para evitar infiltrações e reduzir as vazões de ar exterior, necessária para higienização. Como consequência, nos anos 80 surgiu a Síndrome dos Edifícios Doentes e de doenças relacionadas com edifícios, cujos sintomas são irritação nos olhos, dor de cabeça, problemas respiratórios, ressecamento das mucosas, irritação de pele, congestão nasal,

garganta irritada, náuseas, sonolência, fadiga exagerada e até problemas de concentração no trabalho”. (Guilen, 2004)

A renovação de ar, portanto, tem grande importância para a manutenção da “saúde” dos prédios.

A ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers – Sociedade Americana de Aquecimento, Refrigeração e Ar-Condicionado) estabelece que a taxa de renovação de ar deve ser de 15cfm/pessoa. No Brasil, a Portaria 3523 do Ministério da Saúde determina como taxa mínima de renovação de ar 27m<sup>3</sup>/h por pessoa, com algumas exceções citadas na Resolução 176 que regulamenta a Portaria 3523.

# Capítulo 3

## Ventilação Forçada

### 3.1 Introdução

Por definição, a ventilação forçada pode ser definida como sendo os sistemas destinados a aumentar a energia utilizável do ar (fluido elástico) pelo aumento de sua pressão dinâmica ou cinética.

O sistema de ventilação geral proporciona a ventilação de um determinado ambiente, de um modo geral e global e tem grande importância para fins industriais e conforto térmico. Na ventilação industrial, o processo de ventilação visa o controle de parâmetros como temperatura, distribuição do ar, umidade adequada e eliminação de partículas em suspensão ou eliminação de agentes poluentes ou contaminantes. A ventilação destinada ao conforto térmico, tem como objetivo a busca do bem-estar físico do homem, eliminando as conseqüências maléficas do excesso de calor e garantindo assim, saúde física e psicológica e maior produtividade nos meios de produção em geral.

No projeto de climatizador evaporativo sugerido neste trabalho, a intenção de ventilação é produzir conforto térmico pela insuflação do ar com temperatura reduzida, mas também garantir um ambiente livre de poluentes e microorganismos pela renovação de ar com a utilização do sistema de ventilação diluidora.

Neste projeto (climatizador evaporativo) será utilizado no processo de ventilação, o sistema de ventilação diluidora com acionamento de ventiladores axiais.

### 3.2 Definições

É importante definir algumas grandezas bastante usuais e que caracterizam os sistemas de ventilação.

A primeira delas é a vazão,  $Q$ , que pode ser definida como um volume de ar que se desloca num ambiente ou numa tubulação na unidade de tempo.

$$Q = \frac{V}{T} \quad (3.1)$$

O volume,  $V$ , é medido em  $m^3$  (metros cúbicos) ou  $Ft^3$  (pés cúbicos) e o tempo,  $T$ , medido em  $h$  (horas) ou  $min$  (minutos). Assim, a vazão é mensurada em  $m^3/h$  (metros cúbicos por hora),  $Ft^3/min$  (pés cúbicos por minuto) ou  $cfm$  (cubic feet per minute).

A segunda grandeza a ser definida é a velocidade: distância percorrida por um ponto material em uma unidade de tempo.

$$v = \frac{d}{t} \quad (3.2)$$

A distância  $d$  é medida em  $m$  (metros) ou  $Ft$  (pés) e o tempo  $t$  é medido em  $s$  (segundo) ou  $min$  (minuto). Assim, as unidades da grandeza velocidade,  $v$ , serão:  $m/s$  (metros por segundo),  $Ft/min$  (pés por minuto) ou  $fpm$  (feet per minute).

A definição de taxa de renovação de ar,  $T$ , é a quantidade de vezes que o volume de ar de um determinado ambiente é trocado na unidade de tempo.

$$T = \frac{Q}{V} \quad (3.3)$$

Q é a vazão e V é o volume. A relação entre a vazão e o volume resulta em um numero que depende somente do tempo. Por exemplo, quando a vazão é expressa em m/h e o volume em m<sup>3</sup>/h, e o volume em m<sup>3</sup>, resulta um numero T expresso por hora.

### **3.3 Sistemas de Ventilação**

#### **3.3.1 Sistema de Ventilação Geral Diluidora**

A ventilação é dita geral diluidora quando se utiliza equipamentos mecânicos para induzir ventilação num determinado recinto. Por esta razão, é também chamada de ventilação mecânica.

A ventilação geral diluidora pode ocorrer através de insuflação, exaustão ou sistema misto, isto é, insuflação e exaustão combinadas, e tem por finalidade manter o conforto ambiental, a saúde e segurança humana e conservar em bom estado materiais e equipamentos, pelo alívio térmico e redução na concentração de poluentes nocivos no ambiente.

O conforto ambiental e eficiência do trabalhador são assegurados pela manutenção da temperatura e umidade do ar do ambiente, retirando do ambiente a carga térmica excessiva.

A redução na concentração de poluentes nocivos se dá pela introdução de ar limpo ou não poluído no interior do recinto, ocorrendo desta forma, a dispersão ou diluição do ar contaminado que ali existia, reduzindo assim, a concentração desses poluentes. Assim, a saúde e

segurança humana são mantidas, respectivamente, pela redução da concentração de poluentes nocivos à saúde abaixo de um certo limite de tolerância e redução de concentração de poluentes explosivos e inflamáveis abaixo de limites de explosividade e inflamabilidade.

A conservação e proteção de materiais e equipamentos também é conseguida pela manutenção das condições atmosféricas adequadas.

### **3.3.2 Sistema de Ventilação Local Exaustora**

O sistema de ventilação local exaustora realiza-se com um equipamento captor de ar próximo a fonte poluidora, isto é, que produz poluente nocivo à saúde, de forma a remover o ar da fonte poluidora para a atmosfera. O ar da fonte poluidora é removido através de sistema de exaustão, devendo ser tratado, com a finalidade de ser convenientemente entregue a atmosfera, sem qualquer risco de poluição ambiental. (Moreira, 2006).

Este método é sempre preferível quando o objetivo do sistema de ventilação é a proteção da saúde do trabalhador.

## **3.4 Ventiladores**

### **3.4.1 Centrífugos**

Os ventiladores centrífugos podem operar pequenas vazões e grandes pressões (Viana, 2002). A trajetória de uma partícula gasosa no rotor se realiza em uma superfície que é um plano perpendicular ao eixo. (Macintyre, 1990).

Um ventilador centrífugo consiste em um rotor com pás chamado impelidor, uma carcaça de conversão de pressão e um motor de

acionamento. O ar entra no centro do rotor em movimento na entrada, sendo acelerado pelas pás e impulsionado da periferia do rotor para fora da abertura de descarga (ASHRAE HVAC Systems & Equipment Handbook, 2000).

Num ventilador centrífugo (ou radial) a rotação do rotor faz com que o ar escoe através dele numa direção radial, desenvolvendo pressão enquanto isto se dá.

Os ventiladores centrífugos, também conhecidos como radiais, são o tipo de ventilador mais utilizado hoje em dia. O princípio de operação, embora relativamente simples, evoluiu ao longo dos anos com máquinas agora capazes de alta eficiência aerodinâmica e com potências significativas.

A figura 3.1 mostra um ventilador centrífugo com 400mm de diâmetro e acionado por um motor de indução trifásico de 2 hp:



**Figura 3.1 – Ventilador Centrífugo**

**Fonte: GUIMARÃES, 2007**

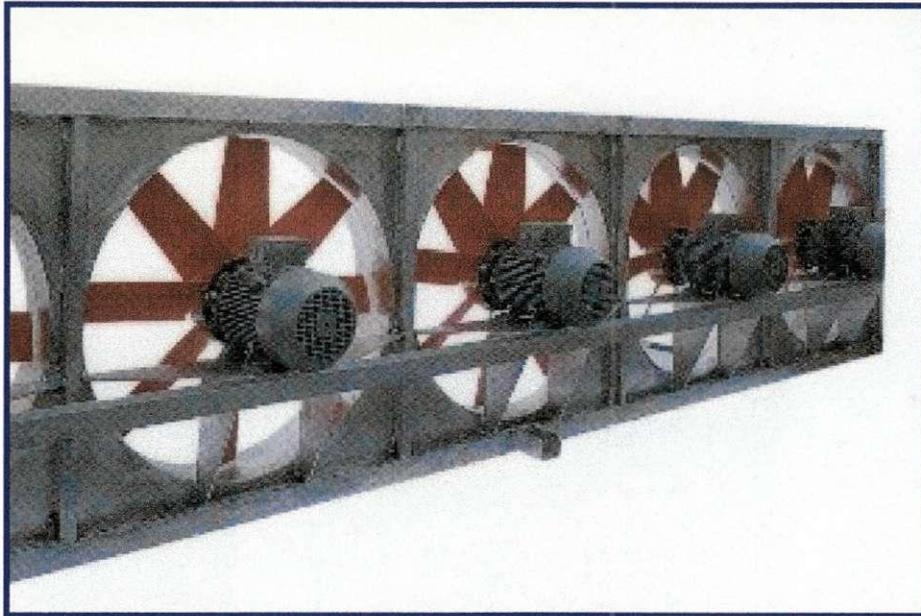
### 3.4.2 Ventiladores Axiais

Os ventiladores axiais podem operar grandes vazões e pequenas pressões (Viana, 2002). A trajetória que a partícula de gás descreve no rotor é uma hélice descrita em uma superfície de revolução aproximadamente cilíndrica (Macintyre, 1990).

Por definição, os ventiladores axiais são máquinas de fluxo nas quais a compressão é obtida por aceleração axial do fluido. Portanto, nesses compressores, o fluxo do fluido é paralelo a seu eixo.

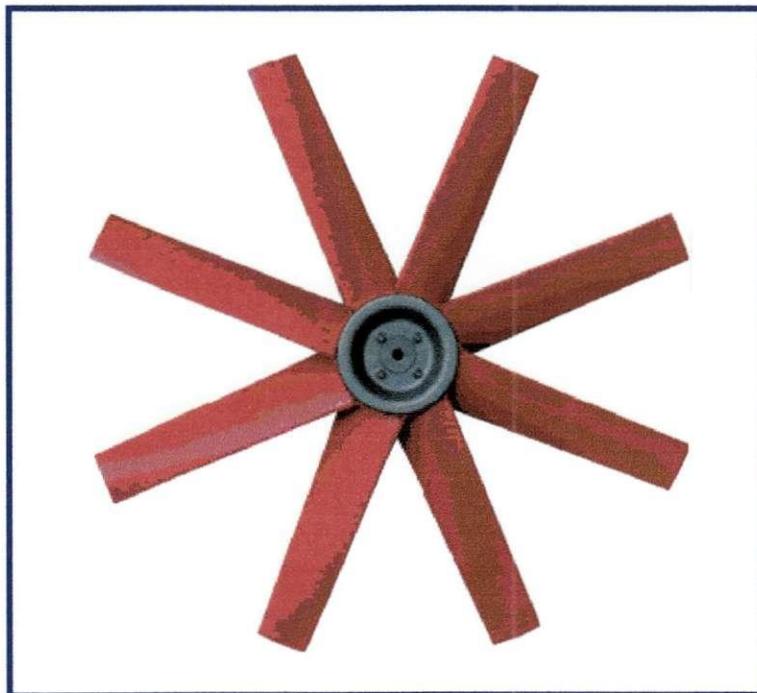
O nome "axial" decorre do fato de que o ar que passa através do ventilador não muda de direção e escoar paralelamente ao eixo da máquina. Um ventilador axial é normalmente usado quando os requisitos de vazão são altos e a demanda de pressão é baixa.

As pás de ventiladores axiais em geral têm a sua seção transversal na forma de aerofólio. A pá pode ser fixada em posição ou pode girar em torno do seu eixo longitudinal. O ângulo da pá em relação ao escoamento do ar, ou passo da pá, pode ser fixo ou ajustável. Mudar o ângulo da pá, ou passo, é uma das principais vantagens de um ventilador axial. Pequenos ângulos de pá produzem vazões menores enquanto o aumento do passo aumenta a vazão.



**Figura 3.2 – Ventiladores Axiais**

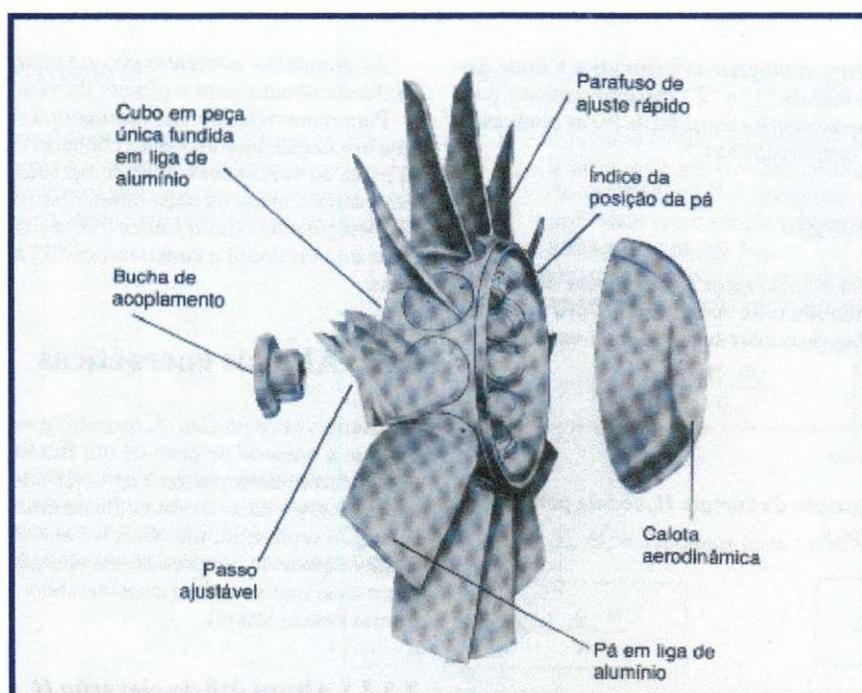
**Fonte: UNESP, 2006**



**Figura 3.3 – Ventilador Axial**

**Fonte: UNESP, 2006**

Os ventiladores axiais são compostos de distribuidor, difusor e rotor. O distribuidor tem a finalidade de guiar o fluido de maneira uniforme para os canais do rotor. Este é constituído por uma série de canais fixos entre si que giram em torno de um eixo. E o difusor transforma a energia cinética atribuída ao fluido pelo rotor em entalpia, com o que se consegue redução de sua velocidade de saída e aumento de sua pressão dinâmica. A figura 3.4 apresenta as partes componentes do um ventilador axial:



**Figura 3.4 – Componentes de Ventilador Axial**

**Fonte: UNESP, 2006**

## **3.5 Projeto de Ventilação**

### **3.5.1 Dimensionamento de Ventiladores/Exaustores**

Para o correto dimensionamento de ventiladores e exaustores, ou seja, a melhor escolha do aparelho a ser utilizado e sua inerente vazão de ar

para que estes possam suprir as necessidades do ambiente, é preciso conhecer as dimensões do ambiente, utilizar as tabelas da ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineering) que sugerem o número de trocas de ar para cada ambiente de acordo com sua forma de ocupação e conhecer o lay-out da edificação.

O primeiro passo é o cálculo do volume de ar existente dentro de um determinado ambiente através do conhecimento das dimensões do referido ambiente.

Em seguida, utilizando a tabela 3.1 (Guide and Data Book – ASHRAE) é possível determinar a quantidade de renovações de ar recomendadas para um determinado tipo de ambiente:

<b>Área Funcional</b>	<b>Taxa de Renovação (Troca por hora)</b>	<b>Ft<sup>3</sup>/min por pessoa</b>
Hospitais (sala de anestesia)	8-12	-
Salas de animais	12-16	-
Auditórios	10-20	10
Hospitais (salas de autopsia)	8-12	10
<b>Padaria e confeitaria</b>	<b>20-60</b>	<b>-</b>
Boliches	15-30	30
Igrejas	15-25	5
Hospitais (salas de citoscopia)	8-10	20
Salas de aula	10-30	40
Salas de conferencia	25-35	-
Corredores	3-10	-
Hospitais (salas)	8-12	-
Leiterias	2-15	-
Lavagem de pratos	30-60	-
Lavagem a seco	20-40	-
Fundições	5-20	-
Ginásios	5-30	1,5 por pé quadrado
Garagens	6-10	-
Hospitais(salas hidroterapia)	6-10	-
Hospitais (salas de isolamento)	8-12	-
Cozinhas	10-30	-
Lavanderias	10-60	-

<b>Bibliotecas</b>	15-25	10
<b>Bibliotecas</b>	15-25	10
<b>Salas de deposito</b>	2-15	-
<b>Pequenas oficinas</b>	8-12	-
<b>Hospitais (suprimentos)</b>	6-10	-
<b>Berçários</b>	10-15	-
<b>Escritórios</b>	6-20	10
<b>Hospitais (salas de operação)</b>	10-15	-
<b>10-22</b>	-	-
<b>Radiologia</b>	6-10	-
<b>Restaurantes</b>	6-20	10
<b>Lojas</b>	18-22	10
<b>Residências</b>	5-20	-
<b>Equipamentos telefônicos</b>	6-10	-
<b>Salas de controle de tráfego aéreo</b>	10-22	10
<b>Toaletes</b>	8-20	-
<b>Soldas a arco voltaico</b>	18-22	-

**Tabela 3.1 – Sugestão de quantidade de renovação de ar**

**Fonte: MONTERO, 2005**

Multiplicando-se o volume de ar do ambiente pela quantidade de renovações de ar necessárias para este mesmo ambiente, é possível determinar um valor preciso da vazão de ar por hora recomendado pela Sociedade Americana de Aquecimento, Refrigeração e Ar-Condicionado. Dividindo-se o valor encontrado por 60, a taxa de renovação de ar para o referido ambiente será dado em m<sup>3</sup>/min.

Para a escolha do aparelho mais adequado, é preciso consultar a tabela de algum fabricante para observar a vazão dos aparelhos disponíveis e com o conhecimento do lay-out da edificação determinar o posicionamento mais conveniente dos aparelhos e a quantidade destes que serão utilizados para suprir a necessidade do ambiente. A tabela 3.2 mostra as características técnicas dos ventiladores/exaustores axiais da linha industrial Ventisilva:

Tipo	Dimensão (mm) (inch - approx)		Voltagem		Corrente	Potência	Rotação	Vazão	Pressão	Peso	Ruído
	Ø (mm)	Comp (mm)	Fases	Volts (V)	(A)	(HP)	(RPM)	(m³/min) (CFM)	(mmca) (inHg)	(kg) (lb)	(dBA)
E30M4	300 11 13/16	300 11 13/16	monof.	110/220	2,30 / 1,20	1/5	1750	40 1412.560	8 0.023	9 19.841	69
E30M6	300 11 13/16	300 11 13/16	monof.	110/220	1,40 / 0,70	1/7	1150	25 882.850	6 0.017	7 15.432	58
E30M8	300 11 13/16	300 11 13/16	monof.	110/220	0,90 / 0,50	1/10	850	19 670.966	4 0.012	7 15.432	49
E30T4	300 11 13/16	300 11 13/16	trifásico	220/380	2,00 / 1,20	1/5	1750	40 1412.560	8 0.023	9 19.841	69
E30T6	300 11 13/16	300 11 13/16	trifásico	220/380	0,70 / 0,40	1/7	1150	25 882.850	6 0.017	7 15.432	58
E40M4	400 15 3/4	310 12 3/16	monof.	110/220	3,30 / 1,60	1/3	1650	75 2648.550	10 0.029	11 24.250	82
E40M6	400 15 3/4	310 12 3/16	monof.	110/220	1,60 / 0,80	1/5	1050	55 1942.270	7 0.020	10 22.046	68
E40M8	400 15 3/4	310 12 3/16	monof.	110/220	1,00 / 0,50	1/7	760	42 1483.188	5 0.014	10 22.046	58
E40T4	400 15 3/4	310 12 3/16	trifásico	220/380	2,00 / 1,20	1/3	1650	75 2648.550	10 0.029	11 24.250	82
E40T6	400 15 3/4	310 12 3/16	trifásico	220/380	0,80 / 0,50	1/5	1050	55 1942.270	7 0.020	10 22.046	68
E50M4	500 19 11/16	310 12 3/16	monof.	110/220	8,40 / 4,20	1/2	1600	140 4943.960	15 0.043	20 44.092	83
E50M6	500 19 11/16	310 12 3/16	monof.	110/220	3,30 / 1,60	1/3	1100	105 3707.970	12 0.035	19 41.887	73
E50M8	500 19 11/16	310 12 3/16	monof.	110/220	1,80 / 0,90	1/5	850	81 2860.434	8 0.023	19 41.887	63
E50T4	500 19 11/16	310 12 3/16	trifásico	220/380	2,50 / 1,50	1/2	1600	140 4943.960	15 0.043	20 44.092	83
E50T6	500 19 11/16	310 12 3/16	trifásico	220/380	1,10 / 0,60	1/3	1100	105 3707.970	12 0.035	20 44.092	73
E60T4	600 23	370 14 /	trifásico	220/380	5,00 / 2,90	1.1/2	1700	190 6709.660	20 0.058	37 81.570	90

	5/8	9/16									
E60T6	600 23 5/8	370 14 / 9/16	trifásico	200/380	3,60 / 2,10	3/4	1100	140 4943.960	12 0.035	28 61.73	76
E70T6	700 27 9/16	390 15 5/16	trifásico	220/380	5,50 / 3,20	1.1/2	1130	220 7769.080	15 0.043	43 94.797	84
E80T6	800 31 9/16	390 15 5/16	trifásico	220/380	5,50 / 3,20	1.1/2	1130	310 10,831.880	15 0.043	46 101.411	85
E100T8	1000 39 3/8	460 18 1/8	trifásico	220/380	7,80 / 4,50	2	800	420 14,831.880	15 0.043	85 187.390	87

Tabela 3.2 – Características Técnicas Ventiladores/Exaustores Ventisilva

Fonte: MONTERO, 2005

### 3.5.2 Exemplo de Dimensionamento

Este exemplo foi extraído da apostila Projeto de Arrefecimento (Ventilação Ambiental) do professor Luis Reyes Rosales Montero da disciplina Eletrotécnica Geral:

Vamos imaginar que uma área de produção tenha as seguintes dimensões: 7,0 metros de largura e 6,0 metros de comprimento e tenha 2,6 metros de altura. Nos foi solicitado um levantamento do que seria necessário para que o ar desse ambiente fosse renovado.

1. Pela tabela ASHRAE (tabela 3.1 ) uma panificadora deverá ter de 20 à 60 trocas de ar por hora.
2. O volume de ar existente nesse auditório é de  $7,0 \times 6,0 \times 2,6 = 109,2\text{m}^3$ .
3. Cálculos:  
 $109,2 \times 60 = 6552\text{m}^3 / \text{hora}$ . Sendo 109,2 o volume de ar do auditório e 60 a quantidade de renovações de ar necessárias para o tipo de edificação.

$$6552\text{m}^3/\text{h} \div 60 = 109,2\text{m}^3/\text{min}.$$

Dependendo do *lay-out*, se houver condições de instalação devemos indicar 4 aparelhos tipo **E40T4** - Exaustor de 40 cm de diâmetro, trifásico 4 pólos, pois no catálogo de exaustores axiais (Tabela 3.2), podemos verificar que esse aparelho possui a vazão de  $75\text{m}^3/\text{min}$ , e vezes 4 produtos teremos uma vazão total de  $150\text{m}^3/\text{min}$  ( $150$  na saída e  $150$  na entrada), o que atingirá perfeitamente as necessidades do ambiente.

### 3.5.3 Instalação Correta de Ventiladores/Exaustores

- Ventiladores e exaustores devem estar fixados em paredes opostas dentro de um mesmo recinto. A figura 3.5 mostra o posicionamento correto de um conjunto ventilador/exaustor num exemplo de projeto qualquer:

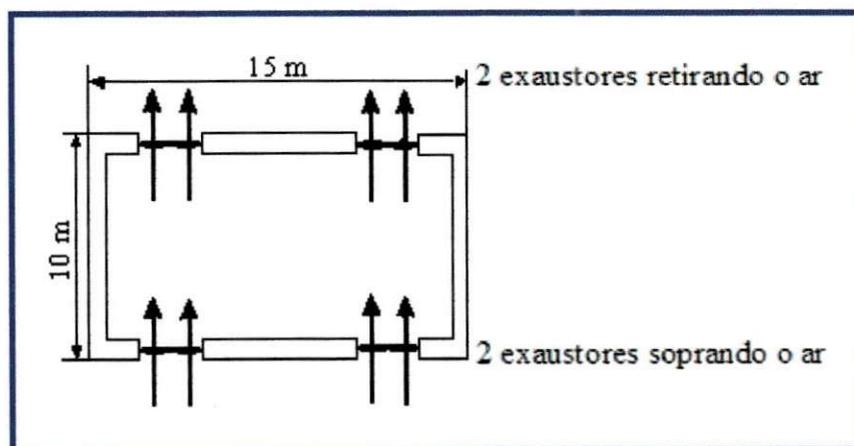
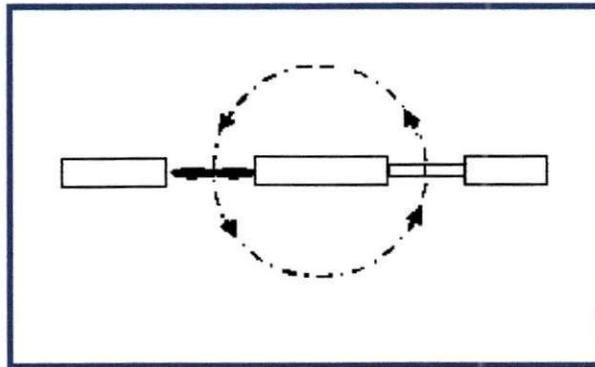


Figura 3.5 – Posicionamento de Ventiladores e Exaustores

Fonte: MONTERO, 2005

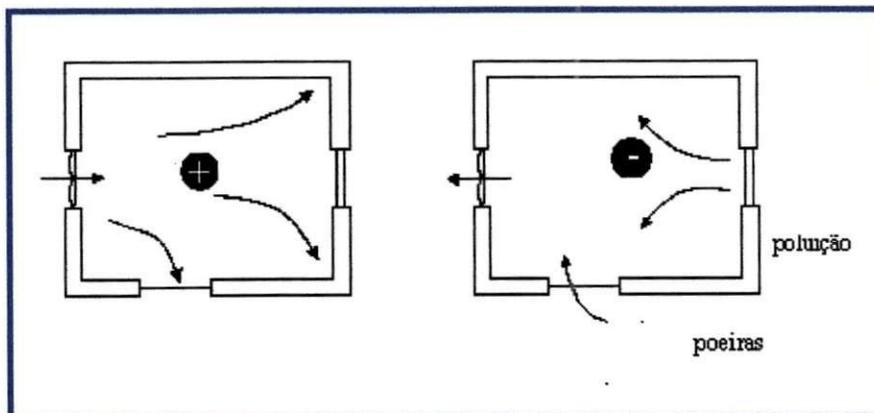
- Um exaustor/ventilador nunca deve ser colocado ao lado de janelas abertas, pois o ar fará um giro de 360° entre o equipamento e a janela. A figura 3.6 demonstra este evento:



**Figura 3.6 - Exaustor ao lado de janela**

**Fonte: MONTERO, 2005**

- Em ambientes de exaustão, a pressão interna do ambiente deve ser positiva, isto é, a quantidade de ar soprando no ambiente deve ser maior do que a saída de ar do mesmo. Caso contrário, pressão interna do ambiente negativa, entrarão poluentes externos no ambiente.



**Figura 3.7 – Pressão Interna do Ambiente**

**Fonte: MONTERO, 2005**

- Em relação à altura de fixação dos equipamentos, no alto deve ser colocado ventilador/exaustor que estiver sugando o ar, já que a tendência natural é do ar quente subir, e inversamente, o equipamento que estiver soprando o ar deve ser colocado em posições baixas do ambiente.

# Capítulo 4

## Controle de Velocidade

### 4.1 Introdução

No desenvolvimento do projeto de climatizadores evaporativos será utilizado o controle de velocidade de motores trifásicos a partir de inversores de frequência. Mais precisamente será utilizado o inversor de frequência CFW-10 da Weg.

Assim, neste capítulo será descrito os métodos de controle de velocidade de motores trifásicos, definições e características dos inversores de frequência e apresentação do equipamento específico de nosso projeto: o inversor de frequência CFW-10 da Weg.

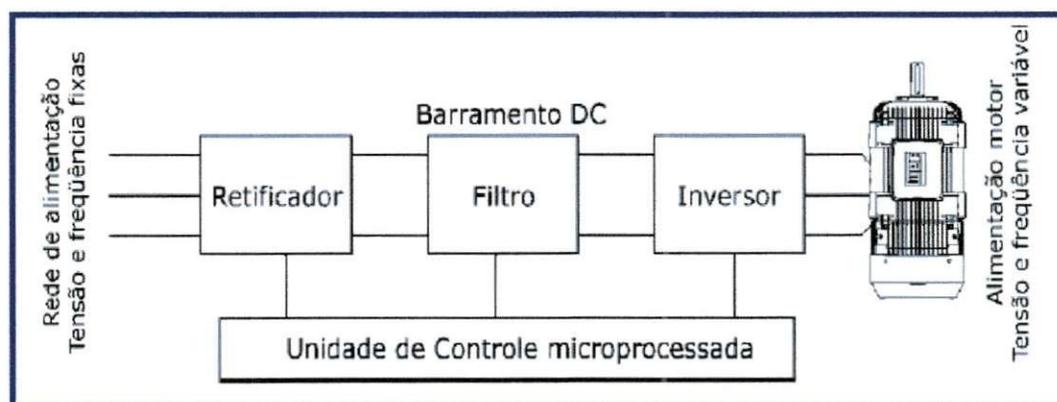
### 4.2 Inversores de Frequência

Graças ao avanço da eletrônica de potência juntamente com a microeletrônica, através de microcontroladores e microprocessadores, o acionamento de motores trifásico de indução vem se tornando cada vez mais fácil e barato por meio de inversores de frequência que garantem versatilidade e vantagens.

As grandes vantagens da utilização de inversores é a geração de economia de energia e a redução dos custos de instalação e manutenção, já que com a utilização destes, os motores são acionados suavemente.

Nos sistemas de ventilação, objeto de nosso estudo, o inversor de frequência tem grande importância no controle da vazão de ar como consequência direta da variação de velocidade do motor de indução.

A figura 4.1 apresenta o diagrama de blocos básico de um inversor de frequência mostrando suas partes componentes:



**Figura 4.1 – Diagrama de blocos de um inversor de frequência**

**Fonte: MASCHERONI, 2004**

O inversor de frequência tem como primeiro estágio um circuito retificador responsável por transformar a tensão alternada de entrada em tensão contínua.

No segundo estágio, o filtro transforma a onda contínua pulsada (retificada em onda completa) em tensão contínua pura com valor aproximado de  $\sqrt{2} \times V_{rede}$ .

O inversor é composto de seis chaves implementadas como mostra a figura 4.2. A combinação de chaves abertas ou fechadas é o que determina a forma de onda que se obterá na saída do inversor. Estas chaves são implementadas nos inversores de frequência com dispositivos semicondutores chamados transistores de potência. Os transistores mais utilizados para este fim são os Transistores Bipolares com Porta Isolada (Insulated Gate Bipolar Transistor – IGBT).

O controle dos transistores é feito pela Unidade de Controle Microprocessada.

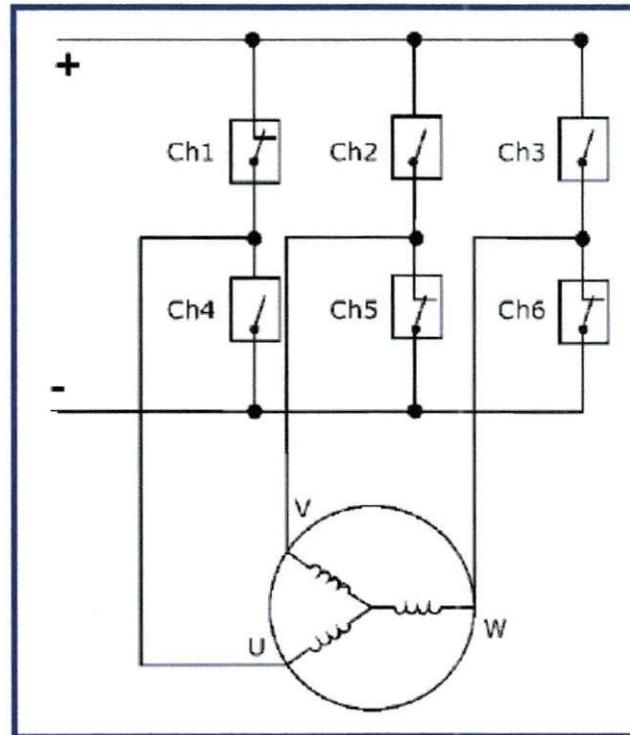


Figura 4.2 – Configuração de chaves do estágio inversor

Fonte: MASCHERONI, 2004

A abertura e fechamento das chaves são realizados através de uma técnica denominada Modulação por Largura de Pulsos (Pulse Width Modulation – PWM).

Nesta técnica, a frequência é mudada através da variação dos pulsos de tensão ao longo do eixo do tempo. O circuito de controle determina os tempos de chaveamento dos semicondutores através da intersecção entre uma tensão triangular e uma tensão superposta senoidal.

### 4.3 Métodos de Controle dos Inversores de Frequência

#### 4.3.1 Controle Escalar

Os inversores escalares podem ser considerados como fontes de alimentação com valores da relação tensão/frequência pré-determinados dentro de toda a faixa de variação de velocidade, mantendo, conseqüentemente, o torque do motor constante, igual ao nominal, para qualquer velocidade de funcionamento do motor.

Para entender como funciona o controle escalar é preciso compreender o comportamento de dois parâmetros que caracterizam o bobinado trifásico dos estatores dos motores de indução: a resistência ôhmica e a indutância.

A corrente que circula pelo estator do motor de indução está relacionada com a resistência ôhmica, que por sua vez é dependente da resistividade do material da bobina e comprimento da mesma, e com o valor da reatância indutiva, que é proporcional ao valor da indutância e frequência. As equações 4.1 e 4.2 mostram claramente estas relações:

$$\chi_l = 2.\pi.f.L$$

(4.1)

$$I = V / (R^2 + \chi_l^2)^{1/2}$$

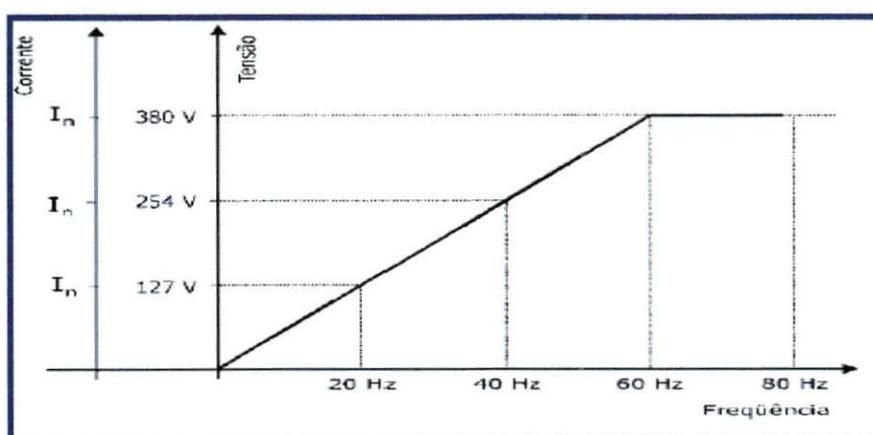
(4.2)

Para valores de frequência acima de 30Hz o valor da resistência se torna desprezível em comparação com o valor da reatância indutiva. Com boa aproximação, o método de controle escalar pode desprezar a resistência ôhmica e assim obter um valor de corrente proporcional à tensão de alimentação, frequência e indutância. Esta indutância é um valor inerente às características do motor, e, portanto, constante. Já a frequência e a

tensão de alimentação são parâmetros que podem ser controlados pelo inversor de frequência.

Assim, variando-se a frequência da tensão de alimentação para se obter a variação de velocidade do motor de indução, o nível de tensão da alimentação se modificará proporcionalmente à variação da frequência para manter constantes, a relação  $V/f$  e, conseqüentemente a corrente no estator.

A figura 4.2 mostra a relação linear entre a tensão de alimentação do estator do motor de indução e a frequência de operação do mesmo.

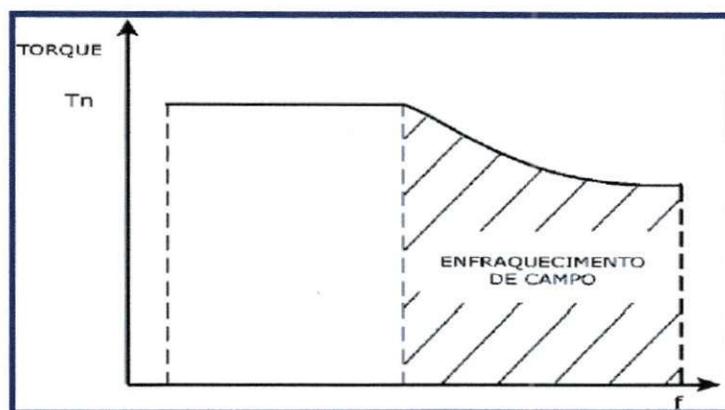


**Figura 4.3 – Gráfico Tensão x Frequência do controle escalar**

**Fonte: MASCHERONI, 2004**

Pode-se observar que, a partir de valores de frequência acima de 60Hz, a tensão no controle escalar não pode mais aumentar, já que foi atingido o valor máximo possível de tensão que é o valor de tensão da rede. Assim, a partir deste ponto, com a elevação da frequência, ocorre a diminuição do valor da corrente e também, por conseqüência, a diminuição do torque do motor.

A figura 4.3 mostra a relação do torque do motor com a frequência, e a região do gráfico conhecida como região de enfraquecimento de campo.



**Figura 4.4 – Gráfico Torque × Frequência**

**Fonte: MASCHERONI, 2004**

Para baixas frequências (abaixo de 30 hertz) é necessário considerar o efeito da resistência ôhmica no cálculo da corrente. Mantendo-se constante a proporcionalidade entre tensão e frequência e, considerando-se a resistência, a corrente e o torque do motor diminuem. A compensação de torque em baixas rotações é realizada através da programação da curva  $V/f$ . A tensão do estator é aumentada através de um método chamado de compensação  $I \times R$ .

Um inversor com controle escalar pode controlar a velocidade de rotação do motor com uma precisão de até 0,5% da rotação nominal para sistemas sem variação de carga e de 3% a 5% com variação de carga de 0 a 100% do torque nominal. A faixa de variação de velocidade é pequena, da ordem de 1:10. Com estas características, o inversor de frequência escalar é mais utilizado em sistemas que não requerem alto desempenho.

### **4.3.2 Controle Vetorial**

Os inversores vetoriais de fluxo produzem uma saída trifásica com tensão e frequência controladas independentemente uma da outra. Este método de controle de velocidade baseia-se na manutenção do fluxo

magnético do motor constante, a partir do controle da corrente rotórica do motor, e assim, controlar diretamente o torque no eixo do motor.

Os inversores vetoriais de fluxo possuem um controlador que controla a corrente de magnetização e outro que controla a corrente do motor. O inversor vetorial calcula a corrente necessária para produzir o torque requerido pela máquina, calculando a corrente do estator e a corrente de magnetização. É sabido que a corrente estatórica é a soma vetorial das correntes de magnetização (produtora de fluxo) e a corrente produtora de torque e o torque produzido no motor é proporcional ao produto vetorial das duas componentes.

Existem duas categorias para implementação de inversores vetoriais de fluxo: com e sem realimentação. A operação com realimentação (ou com controle de malha fechada), permite “enxergar” o movimento do eixo do motor possibilitando controlar a velocidade com precisão. A realimentação é realizada utilizando um gerador de pulsos, “Encoder”. O controle da velocidade e torque no motor é realizado pelo cálculo das duas componentes da corrente do motor.

A operação sem realimentação (ou controle com malha aberta) é também conhecida como “Sensorless” possui performance inferior ao controle de malha fechada. O algoritmo de controle é mais complexo pois é preciso que o inversor calcule através de artifícios matemáticos a velocidade real e o escorregamento do motor.

O inversor com realimentação por encoder consegue excelentes características de regulação e resposta dinâmica, como por exemplo: regulação de velocidade de 0,01%, regulação de torque de 5% e faixa de variação de velocidade de 1:1000. Já o inversor sensorless tem um grau de desempenho inferior ao inversor com realimentação por encoder mas bem superior ao inversor escalar. Suas características são: regulação de

velocidade de 0,1%, faixa de variação de velocidade de 1:100 e não possui regulação de torque.

O controle vetorial é aplicado em situações em que se faz necessário uma alta performance dinâmica, respostas rápidas e alta precisão de regulação de velocidade.

#### **4.4 Inversor de Frequência CFW-10 da WEG**

O inversor de frequência utilizado no projeto do resfriamento evaporativo é o CFW-10 da Weg. Este equipamento possui método de controle escalar, ou seja, relação V/f controlada, recomendado para aplicações mais simples como o acionamento de ventiladores. A topologia de abertura e fechamento das chaves do inversor para variação de frequência utilizada no inversor de frequência CFW-10 é a modulação por largura de pulso ou PWM.



**Figura 4.5 – Inversor CFW-10 da Weg**

**Fonte: Cortesia WEG**

A seguir será apresentado um estudo sobre as especificações do inversor de frequência CFW-10 da Weg produzido pelo Engenheiro Gilderlan Rodrigues Oliveira e apresentado em seu relatório de estágio supervisionado realizado na empresa Econergi em cumprimento às exigências para obtenção do grau de engenheiro eletricitista pela Universidade Federal de Campina Grande.

#### **4.4.1 Especificações do Inversor de Frequência CFW-10 da Weg**

O inversor de frequência utilizado para estudos pela Econergi foi o inversor que apresenta as seguintes especificações:

- **Fabricante:** Weg;
- **Modelo:** CFW-10 versão Clean;

Dados nominais de entrada:

- **Tensão de entrada:** 220-240 VAC monofásica;
- **Corrente de entrada:** 5,7 A;
- **Frequência de operação:** 50/60Hz;

Dados nominais de saída:

- **Tensão de saída:** 220 VAC trifásico;
- **Corrente de saída:** 4,0 A;
- **Frequência de operação:** 0/66Hz;

#### 4.4.2 Funções básicas das teclas

A figura abaixo mostra a vista frontal do inversor de frequência:

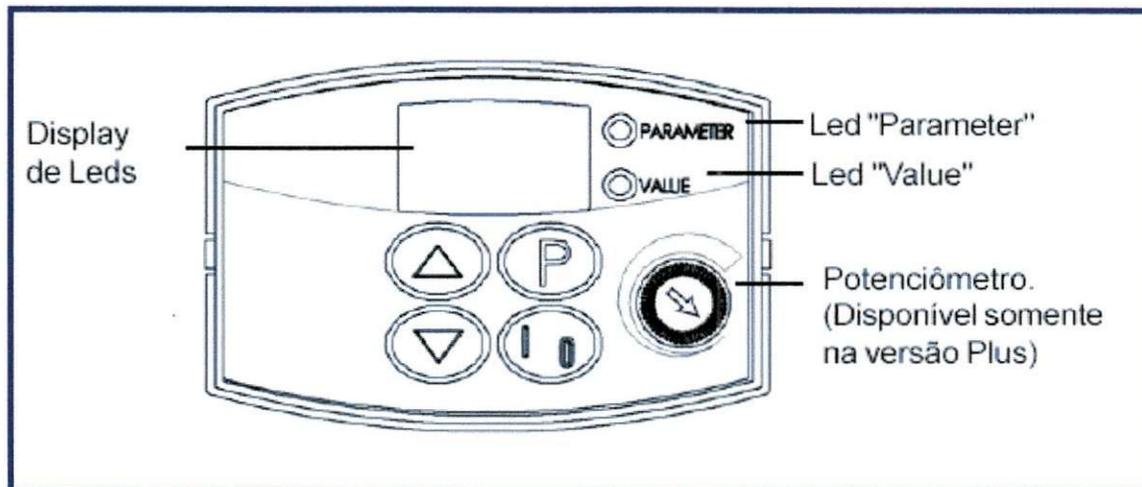


Figura 4.6 – Vista frontal do inversor

Fonte: OLIVEIRA, 2007

Como podemos observar na figura o CFW-10 contém um display de sete segmentos com três dígitos, dois leds e 4 teclas, que juntos compõem a HMI (interface homem máquina) do inversor e cujas funções das teclas são descritas abaixo.

- **Funções do display de leds:** Mostra mensagens de erro e estado, o número do parâmetro ou o seu conteúdo.
- **Funções dos leds “Parameter” e “Value”:** Inversor indica o número do parâmetro: Led verde apagado e led vermelho aceso. Inversor indica o conteúdo do parâmetro: Led verde aceso e led vermelho apagado.



Habilita/Desabilita o inversor via rampa de aceleração/desaceleração (partida/parada). Reseta o inversor após a ocorrência de erros.



Seleciona (comuta) display entre número do parâmetro e seu valor (posição/conteúdo).



Aumenta a velocidade, número do parâmetro ou valor do parâmetro.



Diminui a velocidade, número do parâmetro ou valor do parâmetro.

#### 4.4.3 Parâmetros

Para facilitar a sua descrição, podemos agrupar os parâmetros do inversor de frequência CFW-10 por tipos, conforme a tabela abaixo:

<b>Parâmetros de Leitura</b>	Variáveis que podem ser visualizadas nos displays, mas não podem ser alteradas pelo usuário.
------------------------------	--

<b>Parâmetros de Regulação</b>	São os valores ajustáveis a serem utilizados pelas funções do inversor.
<b>Parâmetros de Configuração</b>	Definem as características do inversor, as funções a serem executadas, bem como as funções das entradas/saídas do cartão de controle.
<b>Parâmetros do Motor</b>	São os dados do motor em uso: informações contidas nos dados de placa do motor e aqueles obtidos pela rotina de Auto-Ajuste.
<b>Parâmetros das Funções Especiais</b>	Inclui os parâmetros relacionados às funções especiais.

**Tabela 4.1 - Descrição dos parâmetros**

**Fonte: OLIVEIRA, 2007**

Os parâmetros de leitura, como seu nome indica, permitem visualizar os valores programados nos parâmetros de regulação, de configuração, do motor e das funções especiais. Por exemplo, na linha de inversores WEG são identificados do P001 até o P999.

Estes parâmetros não permitem a edição do valor programado; somente a sua leitura.

#### **EXEMPLOS:**

- **P001 - Referência de Velocidade** - Valor da referência de velocidade antes da rampa. Independe da fonte de origem da referência. Indicação em rpm.
- **P002 - Velocidade do Motor** - Indica o valor da velocidade real, em rpm.
- **P003 - Corrente do motor** - Indica a corrente de saída do inversor em ampères.
- **P004 - Tensão do circuito intermediário** - Indica a tensão atual no circuito intermediário de corrente contínua, em Volts.
- **P005 - Frequência aplicada ao motor** - Valor da frequência de saída do inversor, em Hz.
- **P006 - Estado do inversor** - Indica o estado atual do inversor. As sinalizações disponíveis são: Ready, Run, Subtensão e E00,... E11.
- **P009 - Torque no Motor** - Indica a parcela da Corrente Total que é proporcional ao torque, em %.

Já os parâmetros de regulação (P100 a P199) são os valores ajustáveis a serem utilizados pelas funções do inversor.

## EXEMPLOS:

- **P100 - Tempo de aceleração e P101 - Tempo de desaceleração** - Definem os tempos para acelerar linearmente de 0 até a velocidade máxima ou desacelerar linearmente da velocidade máxima até 0. A velocidade máxima é definida pelo parâmetro **P134**.
- **P120 – Backup de referência digital** - Define se o inversor deve ou não memorizar a última referência digital utilizada. Se o backup de referência digital estiver inativo **P120 = 0**, sempre que o inversor for habilitado a referência de frequência (velocidade) será igual à frequência mínima conforme o valor de **P133**. Para **P120 = 1** o inversor automaticamente armazena o ultimo valor de referência de frequência (velocidade) independente do valor configurado em **P121** e para **P120 = 2**, sempre que o inversor for habilitado a sua referência inicial é dada pelo parâmetro **P121**.
- **P133 - Referência mínima e P134 – Referência máxima** - Define os valores máximo/mínimo de velocidade na saída quando o inversor é habilitado.
- **P138 – Compensação de escorregamento** - Esta função compensa a queda na rotação do motor devido à aplicação de carga, característica essa inerente ao princípio de funcionamento do motor de indução. Essa queda de rotação é compensada com o aumento da frequência de saída (aplicada ao motor) em função do aumento da corrente ativa do motor.

- **P156 – Corrente de sobrecarga do motor** - Define o valor da corrente de sobrecarga do motor, ou seja, é o valor da corrente a partir do qual o inversor entenderá estar operando em sobrecarga.

Os parâmetros de configuração (P200 a P398) como foram definidos anteriormente especificam as características do inversor bem como algumas funções a serem executadas.

#### **EXEMPLOS:**

- **P202 – Tipo de controle** - Para **P202 = 0** Controle V/F Linear (escalar) velocidade, utilizado em aplicações que exigem uma capacidade de torque aproximadamente constante. Para **P202 = 1** Controle V/F quadrática (escalar) onde o torque é função quadrática da velocidade, muito utilizado em aplicações de acionamento de carga de torque variável.
- **P206 – Tempo de Auto-Reset** - Quando ocorre um erro, exceto E09, E24, E31 ou E41, o inversor poderá gerar um reset automaticamente, após transcorrido o tempo dado por **P206**.
- **P231<sup>(1)</sup> – Seleção do sentido de Giro** - Define o sentido de rotação do inversor. Para **P231 = 0** sentido horário e para **P231 = 1** sentido anti-horário.
- **P295 – Corrente nominal do inversor** - Define o valor da corrente nominal do inversor.

- **P297<sup>(1)</sup> – Frequência de Chaveamento** - Define a frequência de chaveamento dos IGBTs.
- **P300 – Duração de frenagem CC** - A frenagem CC permite a parada rápida do motor através da aplicação de corrente contínua no mesmo.

Em seguida temos os parâmetros do motor (P400 a P403) que se referem aos dados de placa do motor.

#### **EXEMPLOS:**

- **P400 – Tensão do motor**
- **P401 – Corrente do motor**
- **P402 – Rotação do motor**
- **P403 – Frequência do motor**

E por ultimo temos Parâmetros das funções especiais onde o CFW-10 dispõe da função regulador PID que pode ser usada para fazer o controle de um processo em malha fechada. Essa função faz o papel de um regulador proporcional, integral e derivativo que se sobrepõe ao controle normal de velocidade do inversor. Sendo que essa velocidade será variada de modo a manter a variável de processo (aquela que se deseja controlar - por exemplo: nível de água de um reservatório) no valor desejado, ajustado na referência (setpoint).

#### **EXEMPLOS:**

- **P520 – Ganho Proporcional PID**
- **P421 – Ganho Integral PID**
- **P422 – Ganho Diferencial PID**

- **P527 –Tipo de ação do Regulador PID** - Para **P527 = 0** ação direta e para **P527 = 1** ação reversa.

#### 4.4.4 Programação

Todos os ajustes no inversor são feitos através de parâmetros. Os parâmetros e seus valores são indicados no display e através dos leds “Parameter” e “Value” é feita a identificação entre o numero de parâmetro e seu valor. Exemplo (P100):

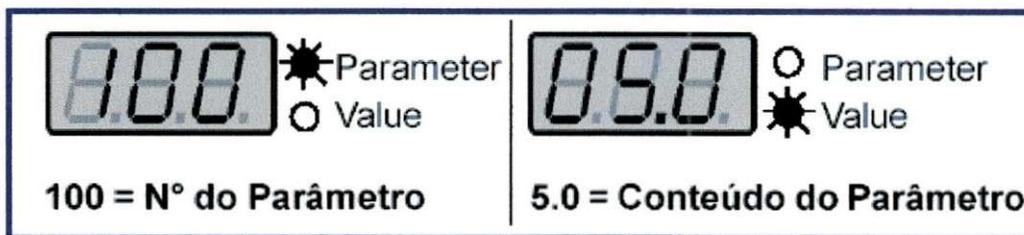


Figura 4.7 - Indicação das variáveis Parâmetro e Valor

Fonte: OLIVEIRA, 2007

A cada parâmetro está associado um valor numérico (conteúdo do parâmetro), que corresponde à opção selecionada dentre as disponíveis para aquele parâmetro.

Os valores dos parâmetros definem a programação do inversor ou o valor de uma variável (ex: corrente, frequência, tensão). Para realizar a programação do inversor deve-se alterar o conteúdo do(s) parâmetro(s).

Para alterar o valor de um parâmetro é necessário ajustar antes **P000 = 5**. Caso contrário só será possível visualizar os parâmetros, mas não modificá-los.

Para os parâmetros que podem ser alterados com motor girando, o inversor passa a utilizar imediatamente o novo valor ajustado. Já os

parâmetros que só podem ser alterados com motor parado, o inversor passa a utilizar o novo valor ajustado somente após pressionar a tecla “P”, de modo que o último valor ajustado é automaticamente gravado na memória não volátil do inversor, ficando retido até nova alteração.

Caso o último valor ajustado no parâmetro o torne funcionalmente incompatível com outro já ajustado, ocorre a indicação de **E24** = Erro de programação.

### EXEMPLO:

ACÃO	DISPLAY HMI	DESCRIÇÃO
Energizar Inversor		Inversor pronto para operar
Use as teclas  e 		Localize o parâmetro desejado
Pressione a tecla 		Valor numérico associado ao parâmetro <sup>(1)</sup>
Use as teclas  e 		Ajuste o novo valor desejado <sup>(1)(4)</sup>
Pressione a tecla 		<sup>(1)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(3)</sup>

Figura 4.8 - Procedimento de programação.

Fonte: OLIVEIRA, 2007

#### 4.4.5 Sinalizações e Indicações no display

Dependendo do estado em que o inversor de frequência se encontra ou do tipo de erro que ocorreu, o mesmo apresenta no seu display algumas mensagens que serão descritas abaixo.

#### 4.4.5.1 Mensagens de Erro

<b>Indicação</b>	<b>Significado</b>
<b>E00</b>	Sobrecorrente/Curto-circuito na saída
<b>E01</b>	Sobretensão no circuito intermediário
<b>E02</b>	Subtensão no circuito intermediário
<b>E04</b>	Sobretensão no dissipador de potência
<b>E05</b>	Sobrecarga na saída
<b>E06</b>	Erro externo
<b>E08</b>	Erro na CPU
<b>E09</b>	Erro na memória do programa
<b>E24</b>	Erro de programação
<b>E31</b>	Falha de comunicação da HMI
<b>E41</b>	Erro de auto-diagnose

Tabela 4.2 - Mensagens de erro e significados.

Fonte: OLIVEIRA, 2007

#### 4.4.5.2 Outras mensagens

<b>Indicação</b>	<b>Significado</b>
<b>rdy</b>	Inversor pronto para ser habilitado
<b>Sub</b>	Inversor com tensão de rede insuficiente para operação (subtensão)
<b>dcb</b>	Indicação durante atuação da frenagem CC
<b>Epp</b>	Inversor está executando rotina carrega padrão de fábrica

Tabela 4.3 - Mensagens de estado e significados.

Fonte: OLIVEIRA, 2007

# Capítulo 5

## Resfriador Evaporativo: Conceitos Fundamentais

### 5.1 Introdução

A climatização de um ambiente é responsável pelo conforto térmico, garantindo ao homem, aumento de sua eficiência e seu bem estar.

O método mais utilizado atualmente é o sistema de refrigeração por compressão mecânica do vapor, que pode representar até 50% do consumo total de uma instalação elétrica.

Neste contexto, o resfriamento evaporativo se apresenta como uma solução alternativa econômica, podendo obter reduções de consumo de energia elétrica de até 95 % se comparado com um ar condicionado equivalente.

Aliados a vantagem econômica, estão ainda incluídos neste método, as vantagens do aumento da umidade, renovação de ar do ambiente climatizado e, facilidades de manutenção, instalação e operação.

### 5.2 Resfriamento Evaporativo

“ O resfriamento evaporativo é um processo natural que consiste na redução da temperatura do ar e elevação de sua umidade relativa através de mecanismos simultâneos de transferência de calor e massa entre o ar e a água ” (Pimenta e Castro, 2003).

“ O resfriamento evaporativo opera utilizando fenômenos naturais através de processos induzidos nos quais a água e o ar são os fluidos de trabalho. Consiste na utilização da evaporação de água através da passagem

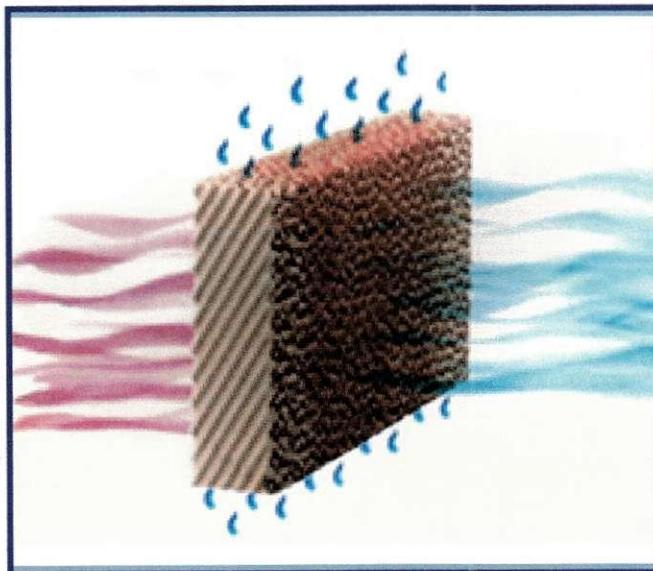
de um fluxo de ar, provocando uma redução na temperatura ” (Camargo, 2004).

Os processos são induzidos pois, o funcionamento do resfriador evaporativo está baseado na criação de condições para que o calor do meio seja dissipado através da evaporação da água.

O ar é resfriado e umidificado adiabaticamente ao entrar em contato com uma superfície úmida apropriada, o painel evaporativo.

Para que ocorra a absorção da água, é necessário que a água utilizada passe da fase líquida para a fase de vapor. Este processo da evaporação da água é bastante endotérmico, ou seja, retira muito calor do ar em contato com a água por troca de calor sensível. A energia envolvida na mudança de fase da água (calor latente) corresponde a uma grande variação de temperatura da mesma (calor sensível). Assim sendo, o processo total de mudança de fase requer uma grande quantidade de energia que é retirada do ar, resfriando-o.

Em resumo, a água retira do ar o calor necessário para evaporar-se, reduzindo assim a sua temperatura.



**Figura 5.1 – Processo de resfriamento evaporativo**

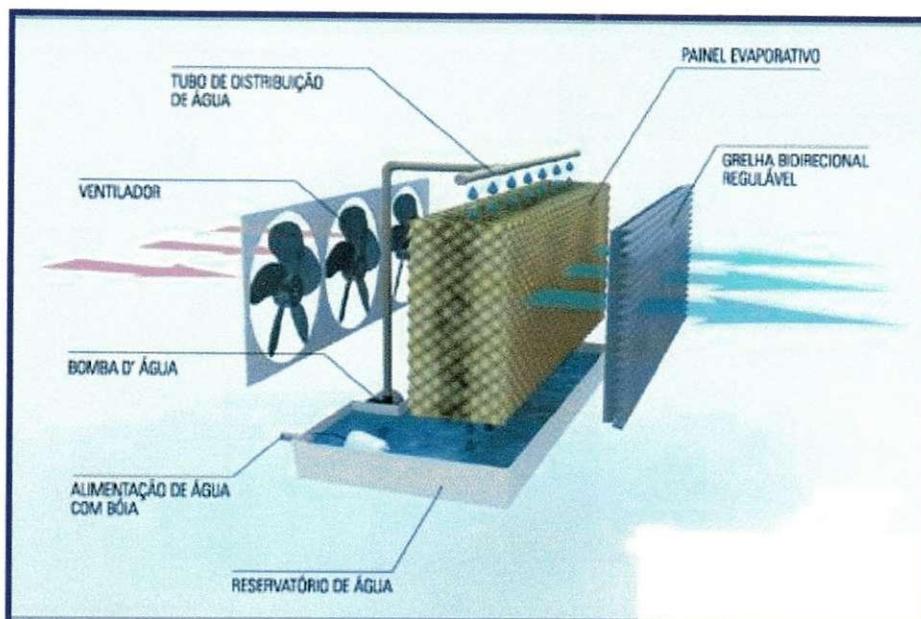
A figura 5.1 mostra o processo de resfriamento evaporativo utilizado pela fabricante Evapcooler. O material utilizado neste painel evaporativo é uma celulose especial, o papel kraft de alta qualidade, ondulado, poroso, impregnado com uma resina que lhe confere grande rigidez e durabilidade.

O sistema de resfriamento evaporativo já é utilizado pela humanidade desde a antiguidade para a obtenção de conforto térmico. Observando a natureza, o homem conclui que poderia criar microclimas agradáveis pendurando panos molhados nas janelas na direção dos ventos dominantes ou construindo chafarizes em pátios fechados. Os antigos egípcios utilizavam grandes jarros cheios de água nas entradas das pirâmides.

### **5.3 Princípio de Funcionamento**

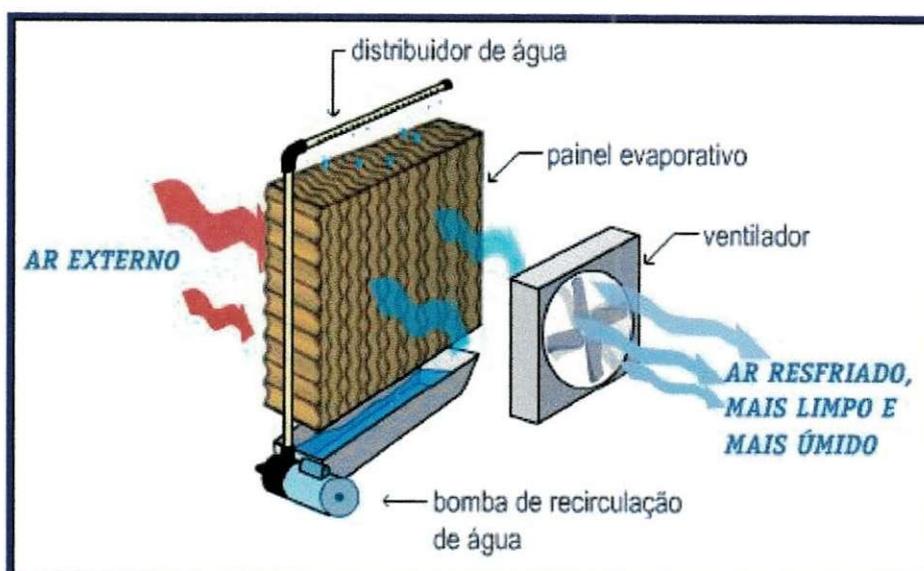
Para que ocorra o resfriamento evaporativo direto, é preciso induzir a passagem do ar quente externo por uma superfície úmida.

Para que tal situação seja criada, o sistema de resfriamento evaporativo utiliza, basicamente, um painel evaporativo, uma bomba de água, um reservatório de água, um ventilador axial e tubo de distribuição de água.



**Figura 5.2 – Resfriador evaporativo direto**

**Fonte: EVAPCOOLER**



**Figura 5.3 – Resfriador evaporativo direto**

A água é gotejada na parte superior do painel evaporativo e desce por ação da gravidade, molhando todo o meio. Assim, é criada sobre a superfície do painel uma película de água em queda.

O ventilador axial, acionado por um motor trifásico de indução, aspira o ar quente externo, fazendo passar uma corrente de ar

transversalmente através do painel evaporativo e, devido à transferência de calor e massa entre a película de água e o ar, a corrente de ar torna-se mais fria e úmida.

A água excedente do painel evaporativo é coletada pelo reservatório de água. A água que evapora durante o processo é repostada por uma bóia que mantém nível constante no reservatório. Portanto, a água do reservatório é circulada e recirculada no final do processo por meio da bomba de água.

As figuras 5.2 e 5.3 ilustram de forma esquemática o processo de climatização utilizado pelo sistema de resfriamento evaporativo.

#### **5.4 Redução de Temperatura do Ar**

A umidade relativa do ar é o principal parâmetro de determinação da queda de temperatura obtida com o processo de resfriamento evaporativo. A redução de temperatura é inversamente proporcional à umidade relativa do ar, isto é, quanto mais baixa é a umidade relativa maior é a redução de temperatura obtida.

Esta relação entre umidade relativa e redução de temperatura através do processo de resfriamento evaporativo pode ser explicada de forma simples e compreendida facilmente.

O ar atmosférico é uma mistura de ar seco e vapor de água. Para uma dada condição de temperatura e pressão esta mistura tem capacidade de conter uma quantidade máxima de vapor de água, que em outras palavras quer dizer umidade relativa de 100%, ou seja, ar saturado. Desta forma, o ar não é capaz de absorver mais umidade. Esta condição só ocorre na prática, durante ou imediatamente após uma chuva. Na maioria dos casos, o ar encontra-se insaturado, ou seja, umidade relativa abaixo de 100%, e assim, apto a absorver mais umidade. Portanto, seguindo esta linha de

raciocínio, conclui-se que quanto menor for a umidade relativa do ar, maior será a capacidade de absorção de umidade e maior será a redução de temperatura do ar pelo processo de resfriamento evaporativo.

A redução de temperatura depende essencialmente da umidade relativa, mas em grau menor depende ainda da temperatura de entrada e da pressão barométrica, que por sua vez depende da altitude local.

A tabela 5.1 apresenta a redução de temperatura do ar em função da umidade relativa e temperatura de entrada.

UMIDADE RELATIVA	TEMPERATURA DE ENTRADA DO AR							
	25°C		30°C		35°C		40°C	
30%	15°C	-10	19,5°C	-10,5	23°C	-12	26,5°C	-13,5
40%	17,5°C	-7,5	21°C	-9	25°C	-10	28,5°C	-11,5
50%	19°C	-6	23°C	-7	27°C	-8	31°C	-9
60%	20°C	-5	24,5°C	-5,5	29°C	-6	33°C	-7
70%	21,5°C	-3,5	26°C	-4	31,5°C	-4,5	35°C	-5

■ TEMPERATURA DE SAÍDA  
■ REDUÇÃO DE TEMPERATURA

Tabela 5.1 – Redução de temperatura

Fonte: EVAPCOOLER

É perceptível que a redução da temperatura depende muito mais da umidade relativa do que da temperatura de entrada.

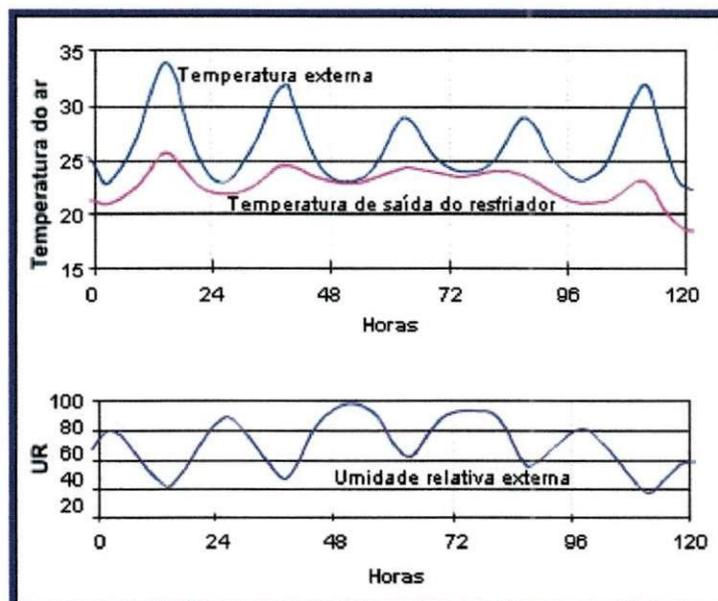
As normas técnicas da Organização Mundial de Saúde (OMS) e Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabelecem que para que 95% das pessoas se sintam confortáveis, a temperatura do meio recomendada é entre 24°C e 26°C, e temperatura máxima de 27°C.

Outro fato importante a ser observado é que a umidade relativa varia ao longo de um dia normal. Tendo em vista que a umidade absoluta não se

altera ao longo do dia, a menos que ocorram chuvas ou se esteja próximo a regiões cobertas por água (mar, rios, represas, etc.), a umidade vai variar inversamente com a temperatura do ambiente.

Como a variação de temperatura externa varia inversamente com a umidade relativa ao longo do dia, isto significa dizer que o resfriador evaporativo consegue obter os melhores resultados justamente nos horários mais quentes do dia.

A figura 5.4 mostra a variação da temperatura do ar de saída do resfriador evaporativo sobreposta ao gráfico de temperatura externa e umidade relativa típicos de uma seqüência de dias típica do verão.



**Figura 5.4 – Variação da temperatura de saída em relação a umidade e temperatura externas**

O Brasil, país de tamanho continental, possui uma grande diversidade de climas, com temperaturas externas e umidades relativas variando de região para região e, desta forma, influenciando diretamente no comportamento do climatizador evaporativo.

A tabela 5.2 apresenta o desempenho deste equipamento em várias regiões do Brasil.

Tipo Clima	Clima 1	Clima 2	Clima 3	Clima 4	Clima 5
Temper. Bulbo Seco / °C	38 a 42	35 a 40	32 a 35	33 a 36	33 a 40
Temper. Bulbo Úmido / °C	até 20	20 a 22	22 a 24	24 a 26	26 a 29
Cidades / Regiões	Juazeiro Paulo Afonso Itaberaba Senhor Bonfim Petrobrás Campina Grande Cajazeiras Crato Cariacica	Brasília Vit. da Conquista Bom Jesus Lapa Feira de Santana Jequié Teófilo Otoni Paracatu Montes Claros	São Paulo Belo Horizonte Campinas Uberaba Uberlândia Ribeirão Preto Curitiba	Palmas Cuiabá Campo Grande Rio de Janeiro Salvador Florianópolis  Cidades do litoral em geral	Vitória Manaus Belém Macapá Santarém
Temper. de Saída / °C	Máximo 21	21 a 23	23 a 25	25 a 27	27 a 30
Redução de Temper. / °C	Mínimo 18	12 a 19	9 a 12	6 a 9	6 a 11

**Tabela 5.2 – Desempenho do climatizador evaporativo em regiões do Brasil**  
**Fonte: EVAPCOOLER**

A temperatura de bulbo seco é a temperatura medida por um termômetro comum. Temperatura de bulbo úmido é a temperatura medida por um termômetro envolvido em uma gaze umedecida. A temperatura de bulbo úmido é a menor temperatura que pode ser atingida por um climatizador evaporativo com 100% de eficiência.

Os climatizadores evaporativos trabalham com a depressão de bulbo úmido (diferença entre a temperatura de bulbo seco e bulbo úmido) acima de 90%, fazendo com que a temperatura de saída alcance temperaturas muito próximas da temperatura de bulbo úmido.

É importante saber que a temperatura resultante no ambiente depende da carga térmica, da vazão e da temperatura do ar insuflado. É sabido por meios empíricos que a temperatura do ar num ambiente

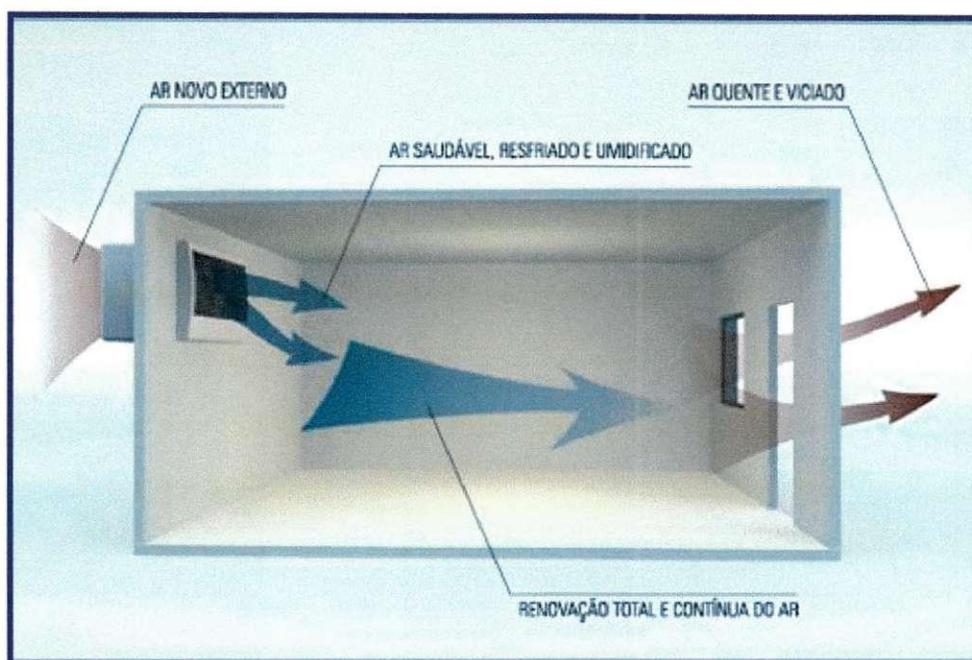
climatizado por resfriamento evaporativo se estabelece entre 2°C e 5°C acima da temperatura de saída do climatizador, e que a sensação térmica da velocidade do ar é percebida em aproximadamente 2°C abaixo da temperatura real. Assim, a temperatura sentida num ambiente climatizado pelo sistema de resfriamento evaporativo será muito próxima à temperatura de saída do climatizador.

### **5.5 Critérios para Instalação e Bom Funcionamento de Sistemas de Resfriamento Evaporativo**

A renovação de ar é a condição fundamental para o bom desempenho do climatizador evaporativo. Após passar pelo painel evaporativo, o ar tem sua umidade relativa elevada para níveis próximos à saturação. Esta umidade relativa será reduzida dentro do ambiente climatizado devido às cargas térmicas existentes no local, porém, não retorna aos níveis anteriores ao resfriamento. Por isso, o ar não deve ser recirculado, pois a umidade relativa estará maior a cada nova passagem pelo resfriador, e conseqüentemente, a eficiência será cada vez menor, tendendo a ser nula após poucas recirculações. A conseqüência final seria uma situação de temperatura e umidade elevadas, altamente desconfortável.

Complementando a condição de renovação total do ar, por implicação direta desta, faz-se necessário a utilização de aberturas ou exaustão compatíveis com a vazão de ar da entrada. Importante que a disposição das saídas, que podem ser portas, janelas, frestas ou exaustores, otimize a circulação do ar por todo o ambiente.

A figura 5.5 detalha a renovação do ar do ambiente climatizado assim como as aberturas necessárias.



**Figura 5.5 – Renovação do ar**

A água utilizada no sistema tem grande relevância para o bom funcionamento do climatizador evaporativo.

Recomenda-se a utilização de água potável. Água “dura”, com altos teores de minerais, principalmente cálcio, no processo contínuo de evaporação, tende a aumentar a concentração de sólidos solúveis e, a partir de certo ponto, haverá supersaturação e precipitação dos minerais. Por outro lado, água com carência de minerais utilizará o painel evaporativo como fonte de minerais, enfraquecendo a resina enrijecedora das colméias. O PH ideal está entre 7 e 8, sendo aceitáveis valores entre 6 e 9.

A água do reservatório deve ser tratada para evitar o crescimento de colônias, em decorrência da proliferação de partículas como fungos, bactérias, algas, etc., partículas estas que são removidas do ar ao passar pelo painel evaporativo e carregadas pela água até o reservatório. O tratamento consiste em: cloração da água do reservatório com pedras de cloro; purga contínua através de dreno, regulável de acordo com a sujidade

do ar captado; drenagem e limpeza periódicas do reservatório para eliminar sujeira acumulada; e quando for desligar o equipamento, desligar primeiro a bomba e deixar o ventilador funcionando até secar o elemento.

## **5.6 Vantagens**

A primeira vantagem de grande impacto é a economia estabelecida pelo resfriador evaporativo sob vários aspectos de análise. Os custos de operação são uma fração dos custos de sistemas de ar condicionados convencionais. O custo de aquisição desse equipamento é significativamente inferior, já que não possuem compressores, condensadores ou circuitos de alta pressão. Por este mesmo motivo, a economia de energia atinge a casa dos 90%, pois o consumo de energia elétrica nos climatizadores evaporativos está relacionado com o funcionamento de um motor de indução trifásico, para rotação do ventilador axial, e a bomba de água que circula a água do reservatório. Além disso, existe ainda a economia nos custos de instalação e adequação do ambiente ao sistema de climatização por resfriamento evaporativo. Este sistema dispensa a utilização de dutos termicamente isolados e conseqüentemente ventiladores centrífugos que tem um consumo de energia 4 a 6 vezes maior que os ventiladores axiais de baixa pressão. O sistema dispensa ainda a necessidade de um ambiente (a ser climatizado) fechado e bem isolado.

Outra grande vantagem é a renovação do ar do ambiente climatizado, já que esse sistema trabalha sem recirculação de ar. Desta forma, o ar que chega ao climatizador, ao passar pelo painel evaporativo, é esfriado, filtrado e umidificado, produzindo um ar de excelente qualidade.

E o ar que deixa o ambiente leva consigo poluentes, germes, fumaça, odores e poeira, evitando a “Síndrome dos Edifícios Doentes”.

Os climatizadores evaporativos são ecologicamente corretos porque funcionam apenas com água, tem consumo de energia elétrica muito baixo, evitando assim a utilização de milhões de barris de petróleo e a emissão de bilhões de libras de CO<sub>2</sub> anualmente e, não utilizam nenhum gás prejudicial ao meio ambiente, como os CFCs ou HCFCs.

# Capítulo 6

## Resfriador Evaporativo: Um Projeto

### 6.1 Introdução

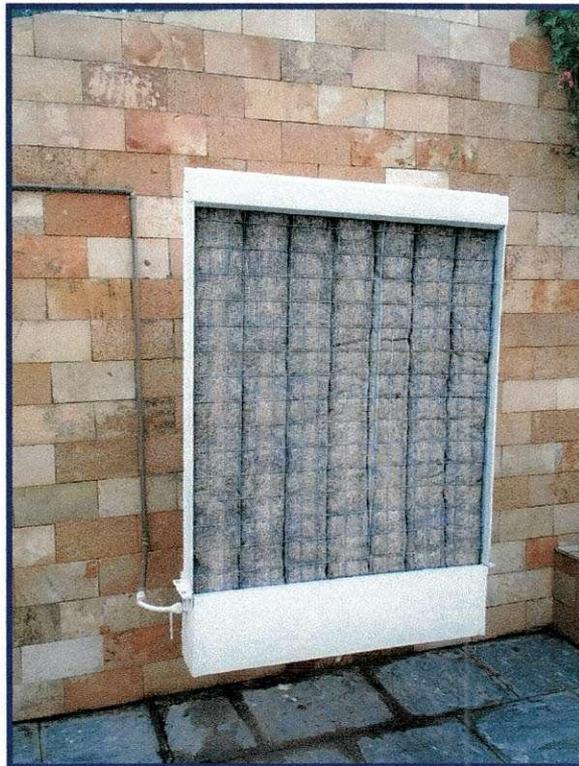
Neste capítulo será descrito as partes componentes de um climatizador evaporativo. Em cada uma delas, será apresentado detalhes e características como material utilizado, fabricantes, dimensões, custos. Assim, o projeto construtivo do equipamento como um todo, será mostrado através de suas partes individuais.

O equipamento foi dimensionado de forma empírica para satisfazer a necessidade de conforto térmico de um ambiente de 100m<sup>2</sup> onde há circulação de uma quantidade significativa de pessoas e uma carga térmica considerável de equipamentos. Este ambiente pode ser considerado, para fins experimentais, uma xérox. Todos os equipamentos e materiais, assim como a mão-de-obra necessária, foram obtidos no comércio ou indústria de Campina Grande.

O resultado final deve ser um equipamento funcionando de acordo com suas características e especificações e apresentado como mostra as figuras a seguir:



**Figura 6.1 – Vista Frontal/Ambiente Interno**



**Figura 6.2 – Vista Frontal da Parte Traseira/Ambiente Externo**



**Figura 6.3 – Vista Lateral da Parte Traseira/Ambiente Externo**

## **6.2 Carcaça**

Todo o envoltório do resfriador evaporativo, aqui definido como carcaça, é constituído de chapas de ferro galvanizado. Essencialmente, a peça contém três partes. A primeira é a parte traseira do equipamento que fica exposta ao ambiente externo. O segundo é o tubo central e a última é a parte frontal do resfriador que tem sua extremidade inserida no ambiente a ser climatizado. A peça inteira foi construída por JCS Funilaria Industrial.



**Figura 6.4 – Carcaça completa do Resfriador Evaporativo**

Na parte traseira do climatizador é onde ocorre a sucção do ar exterior. Nela está contido o sistema de circulação de água, composto de reservatório, bóia, bomba de água e dutos para a distribuição de água e o painel evaporativo onde ocorre a troca de calor entre a água e o ar aquecido do exterior.

A vista frontal da parte traseira da carcaça do resfriador em questão tem uma área de 1,22m de altura por 1,02m de largura. Tem ainda, 0,58m de profundidade até atingir o tubo central.

A figura 6.5 mostra claramente a parte traseira da carcaça do equipamento:



**Figura 6.5 – Parte Traseira da Carcaça**

O tubo central tem 0,14m de comprimento e diâmetro de 0,60m e é onde está localizado o motor de indução trifásico e a hélice acoplada no eixo do referido motor.

A terceira parte é a parte frontal do resfriador evaporativo, onde ocorre a saída do ar resfriado, umidificado e filtrado. Nela é fixada a tela com paletas direcionáveis para controle da direção do fluxo de ar. A parte frontal tem 0,82m de altura por 0,84m de largura e 0,31m de profundidade até atingir o tubo central.

As figuras 6.6 e 6.7 apresentam as carcaças do tubo central e parte frontal do climatizador evaporativo, respectivamente:



**Figura 6.6 – Tubo Central**



**Figura 6.7 – Parte Frontal**

A seguir é apresentado as vistas frontal, lateral direita e superior, com todas as dimensões da carcaça do climatizador evaporativo:

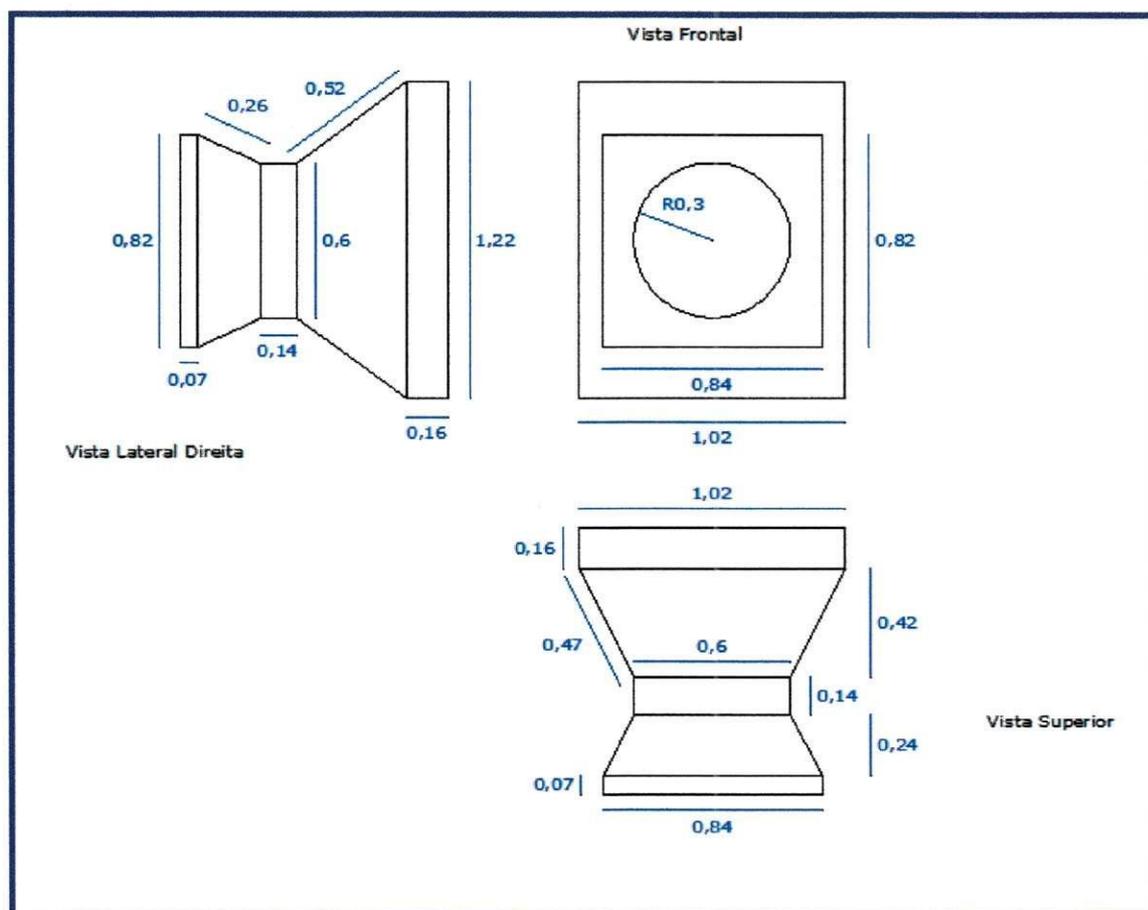


Figura 6.8 - Vistas

### 6.3 Sistema de Circulação de Água

O sistema de circulação de água é responsável por elevar a água do reservatório até o tubo de gotejamento, onde a água cai sobre o painel evaporativo. A água que não é evaporada no processo de resfriamento evaporativo, é captada novamente no reservatório.

O sistema de circulação de água é composto do reservatório, bóia, bomba de água, tubos em PVC rígido e flexível.

No início do processo, a água é elevada por uma bomba de água de fabricação da Sarlo, de 30W, com uma vazão de água de 1950l/h, através de um tubo de PVC flexível de  $\frac{3}{4}$ " até atingir o tubo de gotejamento, tubo este de PVC rígido de  $\frac{1}{2}$ ", com furos a cada 2 cm.

A vazão de água que passa pelo painel evaporativo deve ser suficiente para limpar a sujeira e os sais minerais sem deixar que se acumulem no painel.

A bomba de água conectada ao tubo de PVC flexível, realiza a elevação da água do reservatório até a parte superior do equipamento. A figura 6.9 mostra a conexão entre o tubo de PVC flexível com o tubo de PVC rígido na parte superior direita da traseira do resfriador evaporativo. Percebe-se a utilização de duas curvas de  $90^\circ$  de bitola  $\frac{1}{2}$ " para o correto direcionamento da tubulação e utilização de braçadeiras tipo para fixação da tubulação de distribuição de água. Completando esta tubulação, a figura 6.10 apresenta o tubo de gotejamento localizado ao longo da parte superior da parte traseira do climatizador evaporativo.



**Figura 6.9 – Detalhe de conexão e fixação de tubulação de distribuição de água**



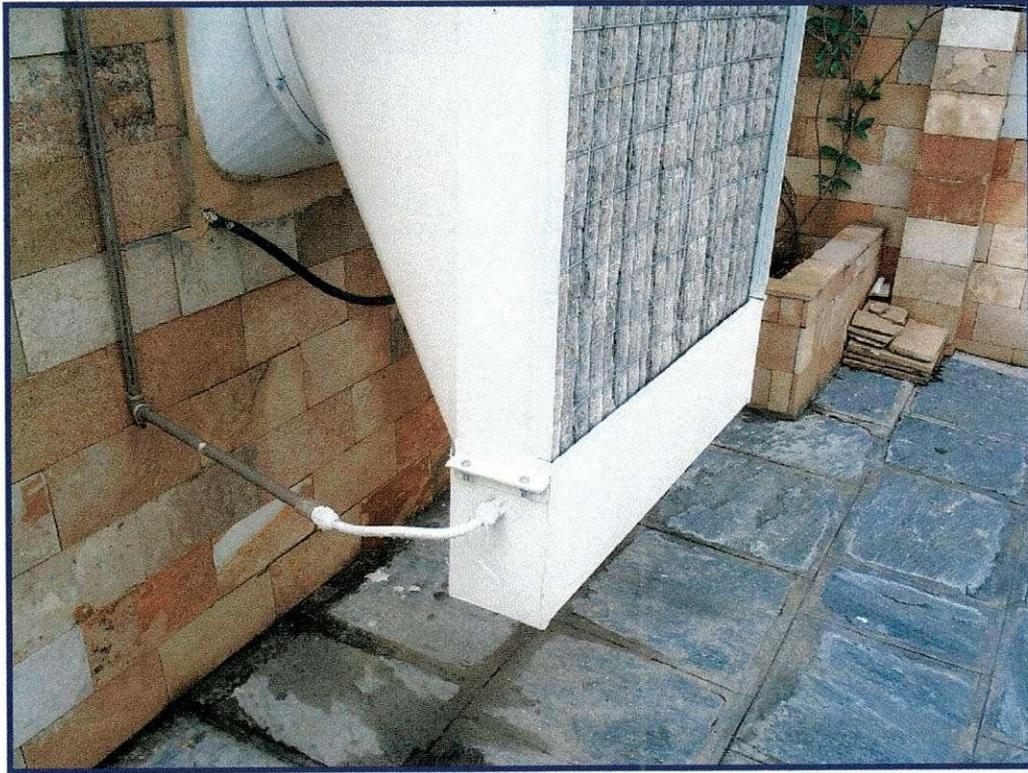
**Figura 6.10 – Tubo de Gotejamento**

Parte da água que cai sobre o painel evaporativo é evaporada na troca de calor latente com o ar quente. A outra parte é captada pelo reservatório que reaproveita-la-á para realização do mesmo processo.

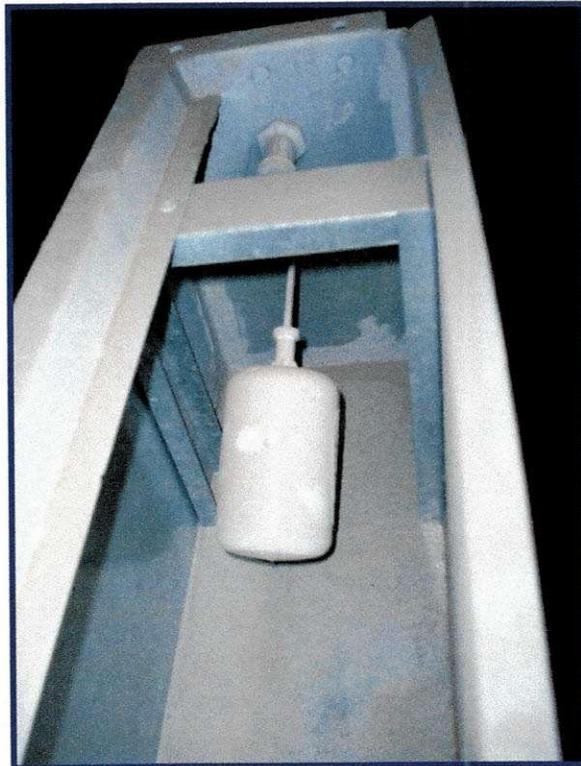
O reservatório fica localizado abaixo da parte traseira do equipamento e é feita de chapas de ferro galvanizado. Suas dimensões são: 0,27m × 1,02m × 0,17m. Esta peça foi feita por JCS Funilaria Industrial.

Com o processo contínuo de evaporação da água do reservatório, em um dado momento o nível de água atingirá o limite mínimo adequado ao funcionamento normal do resfriador evaporativo. Para reposição de água ao reservatório existe, na lateral desta peça, uma entrada para alimentação de água externa. Para o controle do nível da água do reservatório e abertura e fechamento da entrada de água externa é utilizado uma bóia, de fabricação da Tigre.

As figuras 6.11, 6.12 e 6.13 mostram, respectivamente, o reservatório com a entrada para água externa, a bóia na parte interna do reservatório e uma caixa d'água como fonte de água externa ao climatizador evaporativo:



**Figura 6.11 – Reservatório de água**



**Figura 6.12 - Bóia**

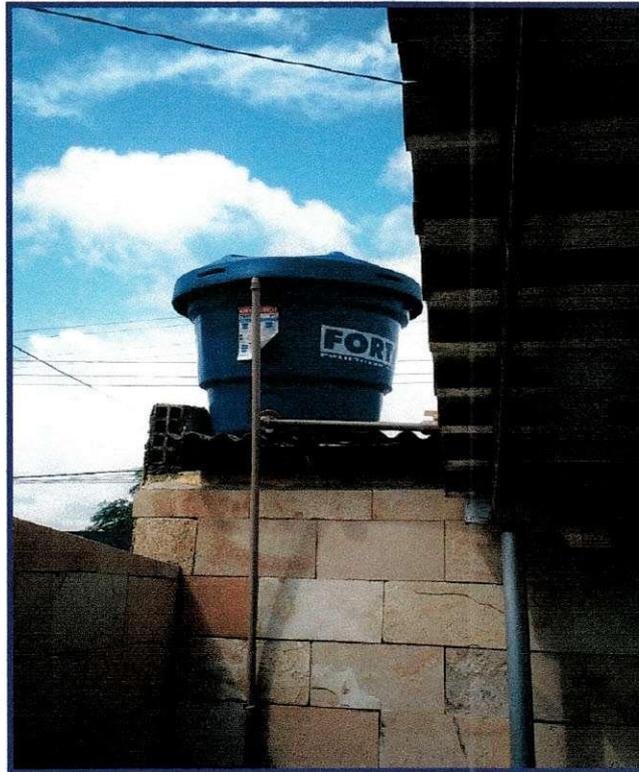


Figura 6.13 – Caixa de água

#### 6.4 Painel Evaporativo

O painel evaporativo é um painel composto por material poroso, por onde o ar atravessa antes de entrar no ambiente a ser climatizado. É nele onde ocorre a troca de calor entre a água que por ele escorre e o ar quente do exterior.

A velocidade com que o ar atravessa o painel evaporativo é de fundamental importância para a eficiência do mesmo, pois o tempo de contato deste com a camada limite junto ao material é determinante na troca de calor. A queda de pressão dinâmica do ar ao atravessar o painel evaporativo também é um fator decisivo no dimensionamento dos mesmos, pois afeta a velocidade do ar dentro da instalação e o consumo de energia elétrica dos exaustores.

Neste projeto de climatizador evaporativo será utilizado um painel de 1,21m de altura, 1,01m de largura e 0,05m de espessura. O painel evaporativo fica localizado na parte traseira do equipamento e o material utilizado é a raspa de pinho, material também utilizado em sistemas de climatização de caminhões.

As figuras 6.14, 6.15 e 6.16 mostram, respectivamente, a raspa de pinho em um trecho do painel, o painel evaporativo completo utilizado neste projeto e o painel evaporativo fixado em seu local exato, desempenhando sua função em um outro climatizador localizado na cidade de Patos-PB:



**Figura 6.14 – Raspa de Pinho**



**Figura 6.15 – Painel Evaporativo**



**Figura 6.16 – Painel Evaporativo Instalado em Resfriador**

## 6.5 Sistema de Ventilação Forçada

Internamente ao equipamento, o sistema de ventilação é formado por motor de indução trifásico, hélice e tela com paletas direcionáveis. Externamente ao climatizador, faz parte ainda do sistema de ventilação, o inversor de frequência.

O motor utilizado é um motor de indução trifásico, 4 pólos, de fabricação da Weg. Este motor está fixado bem no centro do tubo central da carcaça do equipamento. Em seu eixo está fixado a hélice com 9 pás e com 60 cm de diâmetro. A figura 6.17 apresenta o motor e a hélice:

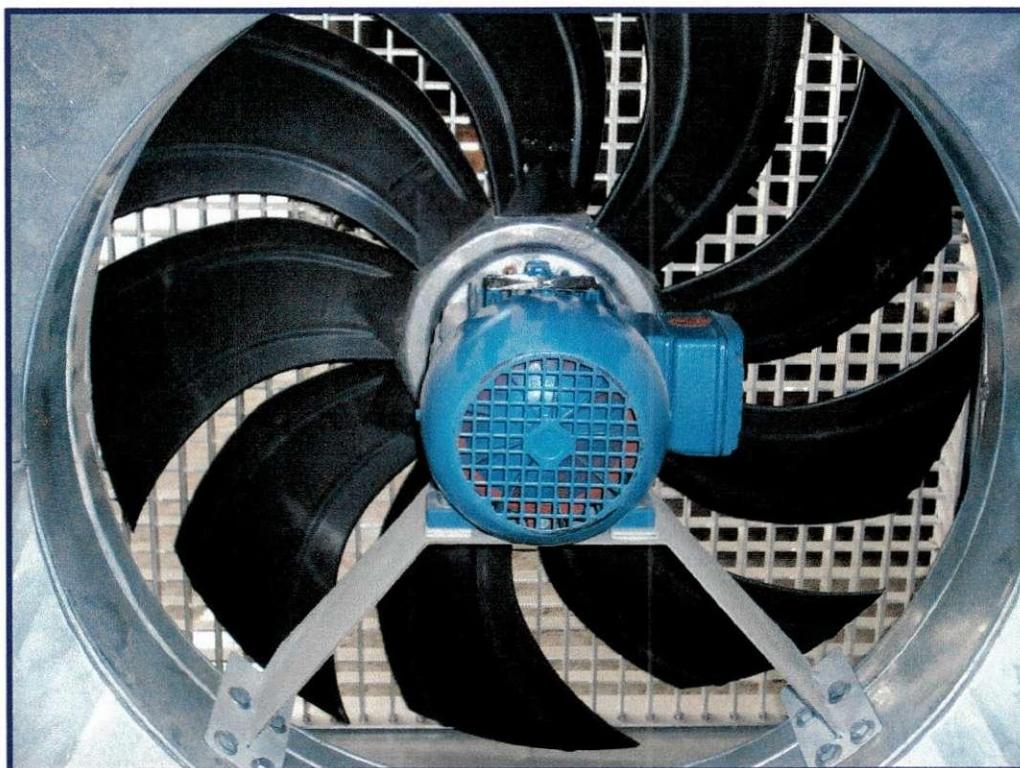


Figura 6.17 – Hélice acoplada ao eixo do Motor

Como este motor tem velocidade nominal de 1800 rpm, e foi determinado empiricamente que a velocidade ideal de funcionamento do climatizador evaporativo é em torno de 400 rpm, faz-se necessário a

utilização do inversor de frequência para o controle mais adequado da velocidade do eixo do motor e partida suave do mesmo.

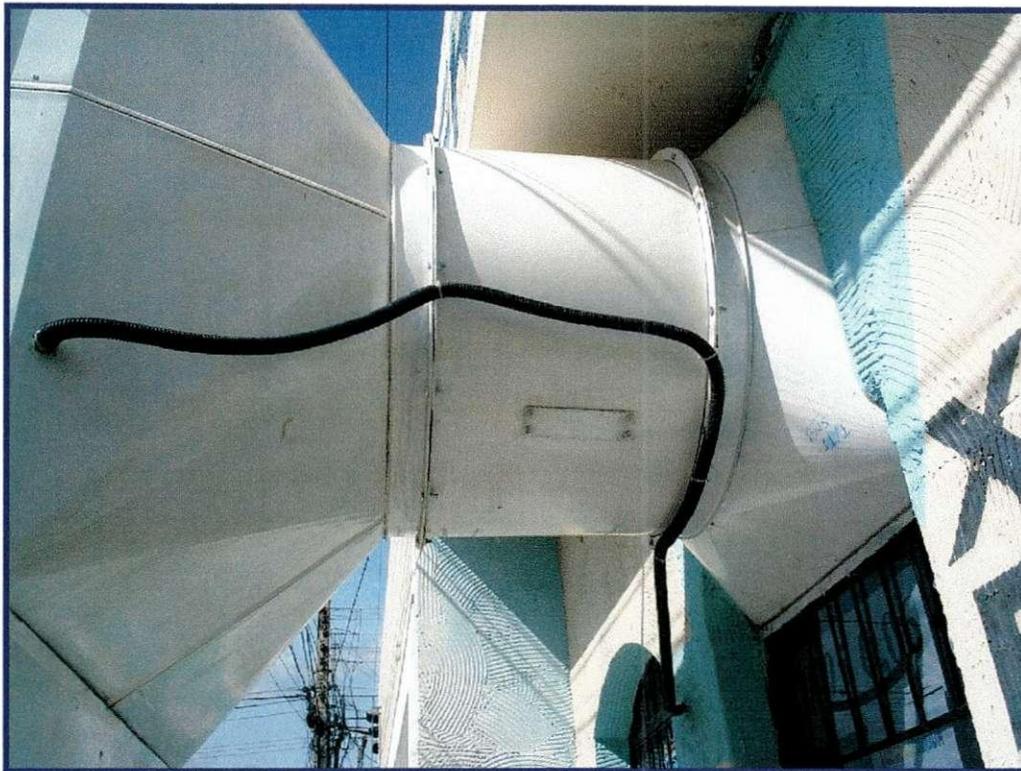
O inversor de frequência é fixado ao lado do climatizador, como mostra a figura 6.18, e o equipamento utilizado é o CFW-10 da Weg, que tem método de controle escalar e variação de frequência baseado na modulação por largura de pulsos (PWM). Este equipamento tem tensão de entrada monofásica e tensão de saída trifásica.



**Figura 6.18 – Inversor de Frequência CFW-10 da Weg**

Como mostra a figura 6.18, a alimentação monofásica chega ao resfriador evaporativo pela alimentação do inversor de frequência, que por sua vez alimenta o motor de indução trifásico com a alimentação trifásica.

A figura 6.19 mostra a alimentação do motor de indução e da bomba de água entrando na parte traseira do climatizador evaporativo:



**Figura 6.19 – Alimentação Elétrica**

Na parte frontal do climatizador evaporativo é colocada uma tela com paletas direcionáveis feitas em alumínio e com dimensões de 0,82m×0,84m.

A figura 6.20 mostra a parte frontal do equipamento com a referida tela que garante melhor direcionamento do fluxo de ar resfriado, umidificado e filtrado no interior do ambiente:



**Figura 6.20 – Tela Frontal**

## **6.6 Custos**

A JCS Funilaria Industrial construiu toda a carcaça em chapa de ferro galvanizado, assim como o reservatório de mesmo material e o sistema de circulação de água contendo, além do reservatório, bóia para o controle do nível da água de fabricação Tigre, tubulação de distribuição de água com tubos Amanco de PVC rígido de  $\frac{1}{2}$ '' (1,20m) e flexível de  $\frac{3}{4}$ '' (1,40m) e curvas de  $90^\circ$  e braçadeiras para fixação. A JCS Funilaria Industrial ainda construiu a tela com paletas ajustáveis feita em alumínio, a base para fixação do motor no centro do tubo central da carcaça do climatizador evaporativo em questão e o painel evaporativo composto de raspa de pinho. O orçamento feito pela JCS foi de 1200 Reais.

Os equipamentos do sistema de ventilação foram comprados no mercado de Campina Grande. O motor de indução trifásico da Weg de 1

cv, 4 pólos, foi adquirido por 312 Reais. Já o inversor de frequência CFW-10 da Weg custou aproximadamente 700 Reais. Estes dois equipamentos foram comprados na revendedora autorizada Weg. A hélice com 0,60m de diâmetro e contendo 9 pás, foi adquirida em São Paulo ao de preço de 200 Reais. E a bomba de água com 30W de potência de fabricação Sarlo custou 65 Reais.

Somados todos estes gastos parciais, a totalização do custo de investimento para aquisição do climatizador evaporativo é de 2477 Reais.

Peça	Fabricante	Custo (R\$)
Carcaça + Sistema de Distribuição de Água	JCS Funilaria Industrial	1200
Bomba de Água	Sarlo	65
Inversor de Frequência	WEG	700
Motor Trifásico 1cv	WEG	312
Hélice		200
<b>TOTAL</b>		<b>2477</b>

Tabela 6.1 - Custos

# Capítulo 7

## Comparativo entre climatizadores

### 7.1 Introdução

Existem diversas formas de alterar a temperatura de um ambiente ou ao menos a sensação térmica de seus ocupantes para garantir um ambiente termicamente agradável. Esses processos estão sob a forma de climatização ou ventilação de ambientes.

A climatização de um ambiente, por definição, controla a temperatura do ar no recinto, ajustando-a geralmente acima de 20°C, além de controlar a pressão interna, a pureza do ar e a umidade relativa. Nesta categoria são incluídos os resfriadores evaporativos e os métodos mais comumente utilizados nas instalações prediais, os sistemas de resfriamento por compressão e expansão de gases refrigerantes.

A ventilação introduz o ar no ambiente para controlar sua temperatura, porém, esta sempre estará limitada pela temperatura do ar exterior.

Neste capítulo será apresentada uma comparação entre o resfriador evaporativo e outros sistemas de climatização e o sistema de ventilação. Inicialmente será mostrado o climatizador evaporativo por nebulização e será realizado um comparativo qualitativo em relação ao climatizador evaporativo direto. Em seguida, continuando com a comparação entre climatizadores, será apresentado um estudo comparativo realizado entre o resfriador evaporativo e um aparelho de ar condicionado convencional. E por fim, uma comparação do equipamento de nosso estudo com o sistema de ventilação, método também bastante difundido.

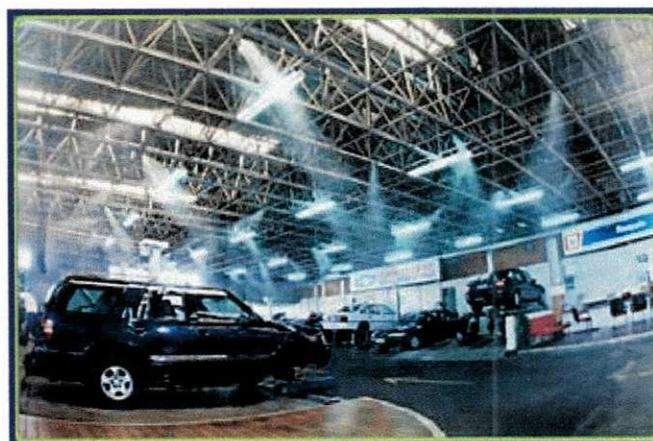
## 7.2 Climatizador Evaporativo por Nebulização

O climatizador evaporativo por nebulização consiste no mesmo processo de captação do ar exterior e passagem por um painel evaporativo realizado pelo resfriador evaporativo direto, com a utilização de um sistema composto por um módulo de alta pressão, dutos flexíveis e micro-aspersores que atomizam a água na saída do equipamento. A água atomizada é impulsionada pelo ar forçado do ventilador criando uma fina névoa de água atomizada no ambiente.



**Figura 7.1 – Fábrica têxtil**

**Fonte: PRIMETECH**



**Figura 7.2 – Oficina mecânica**

**Fonte: PRIMETECH**

Este equipamento tem aplicação na indústria para resfriamento e umidificação nos processos de beneficiamento de produtos assim como resfriamento, umidificação e melhoria da qualidade do ar em pavilhões industriais

O climatizador evaporativo por nebulização tem baixo custo de produção e baixo consumo de energia elétrica assim como o climatizador evaporativo direto.

Em relação aos requisitos do ambiente a ser climatizado, o climatizador por nebulização deve ter pé direito elevado ou ser ao ar livre para que a névoa formada pela atomização da água evapore antes de atingir o nível de saturação, porém, a umidade relativa do ambiente é elevada até a saturação facilmente. Em dias mais úmidos o ambiente é molhado pelo climatizador evaporativo por nebulização. O outro equipamento deve ter ambiente com saída de ar para se trabalhar com quase 100% de renovação de ar e garantir a eficiência desejada de redução de temperatura.

Os dois equipamentos aqui em comparação não causam nenhum impacto negativo ao meio ambiente e ambos têm o benefício da umidificação em climas muito secos, porém o climatizador evaporativo por nebulização não garante a renovação de ar.

Em relação a manutenção, este último frequentemente apresenta problemas com entupimento dos bicos atomizadores.

### **7.3 Sistema de ar condicionado convencional**

O ar condicionado convencional tem como principio de funcionamento a expansão de um gás refrigerante comprimido. Nestes sistemas existem os compressores que comprimem o fréon (termo

genericamente usado para qualquer dos vários fluorcarbonos não inflamáveis utilizados como refrigerantes e combustíveis nos aerossóis) fazendo com que ele se torne gás quente de alta pressão. Em seguida, este gás quente se condensa para o estado líquido ao dissipar calor percorrendo um trocador de calor. O líquido passa pela válvula de expansão onde ele é novamente vaporizado e se torna gás frio de baixa pressão. Este gás frio percorre outro trocador de calor, permitindo assim a troca de calor com o ambiente, esfriando o ar interno. A figura 7.3 mostra o ciclo de refrigeração do ar condicionado.

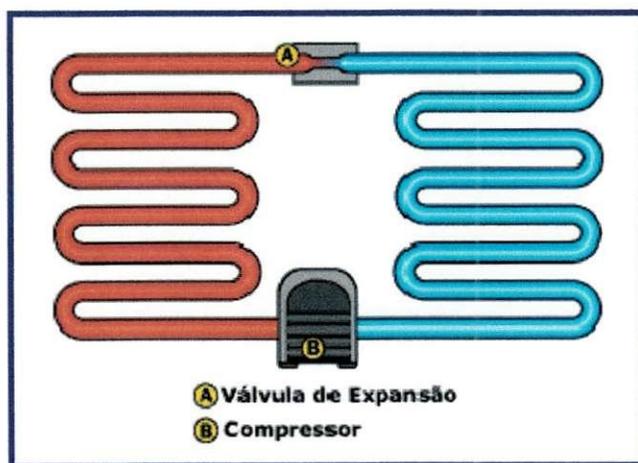


Figura 7.3 – Diagrama de um ar condicionado

Fonte: HOWSTUFFWORKS

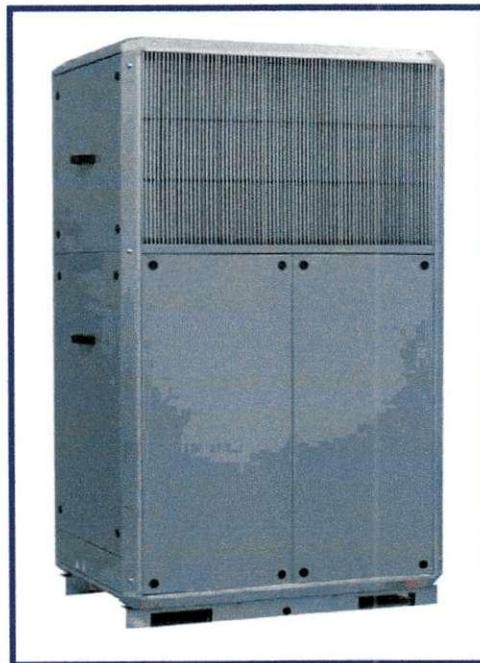
O sistema de refrigeração pode ser por expansão direta ou indireta.

No sistema de expansão direta, o ar é diretamente resfriado pelo fluido refrigerante. São aplicados em instalações de pequena e média capacidade e são utilizados aparelhos de janela (janeleiro), splits ou self contained.



**Figura 7.4 – Condensador e dois splits**

**Fonte: [www.cabano.com.br](http://www.cabano.com.br)**

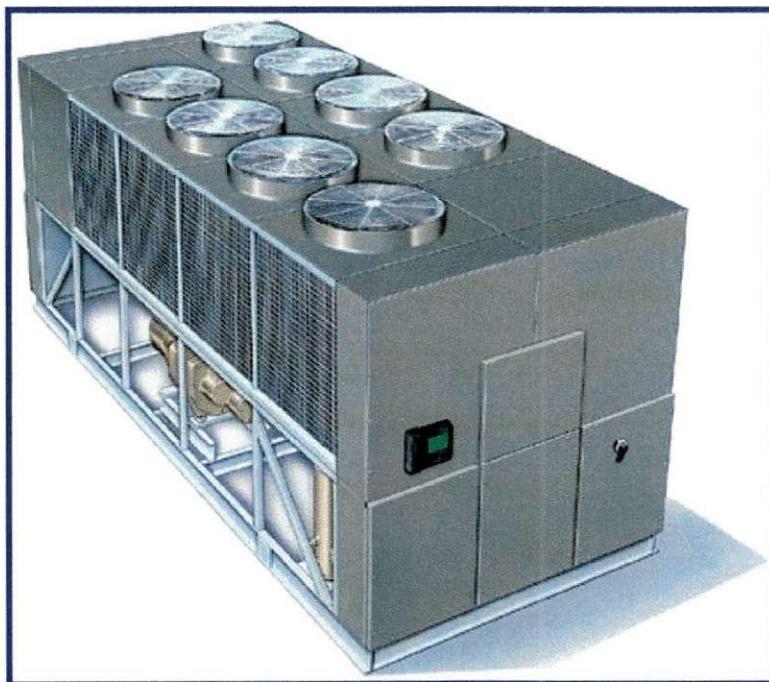


**Figura 7.5 – Self Contained**

**Fonte: [www.cabano.com.br](http://www.cabano.com.br)**

No sistema de expansão indireta, o fluido usado como refrigerante do ar é a água, que por sua vez, é resfriada num circuito de compressão por

chillers, circuito este que também utiliza um gás refrigerante. Este sistema é difundido em instalações com médias e altas capacidades.



**Figura 7.6 – Chiller**

**Fonte: [www.enoisecontrol.com](http://www.enoisecontrol.com)**

Uma comparação entre ares condicionados convencionais e resfriador evaporativo mostra resultados interessantes sob vários pontos de vista. Para esta comparação será utilizado como referência um trabalho de pesquisa realizado em 2006, intitulado Ar Condicionado versus Climatizadores por Evaporação, por Alexandre Octávio R. Lopes, Guilherme R. da Costa Gabarra e Bruno W. Fontes Lima, então alunos do curso de graduação de engenharia mecânica da Unicamp.

A comparação em relação ao custo operacional é realizada entre um ar condicionado de 12000 Btu/h e um climatizador evaporativo equivalente. Os dados do ar condicionado foram obtidos em folhetos de divulgação da Springer e da Elgin, enquanto que os dados do climatizador

são do folheto de divulgação do equipamento utilizado, o EB-20, fabricado por Ecobrisa. A tabela 7.1 apresenta o comparativo:

	<b>ECOBRI SA 20</b>	<b>Condicionador de ar 12.000 Btu/h</b>
<b>Indicado para ambientes de (m<sup>2</sup>)</b>	10 a 20	13 a 20
<b>Consumo (W)</b>	95	1.162 a 1.580 média = 1.371
<b>Consumo elétrico mensal, 8h/dia, 20 dias/mês (kWh)</b>	15	219
<b>Custo mensal energia elétrica ( com R\$ 0,36 / kWh )</b>	R\$5,40	R\$ 78,84
<b>Consumo de água médio (l/h UR 50%)</b>	3	-
<b>Consumo mensal ( m<sup>3</sup> )</b>	0,48	-
<b>Custo mensal da água ( R\$ 3,00 / m<sup>3</sup> )</b>	R\$ 1,44	-
<b>Custo mensal total</b>	R\$ 6,84	R\$ 78,84

**Tabela 7.1 – Estimativa de custos operacionais**

**Fonte: LOPES, 2006**

Diante do resultado de custo mensal total, calcula-se uma economia de mais de 90% na substituição de um ar condicionado convencional de 12000Btu/h por um climatizador por evaporação equivalente.

Em relação ao funcionamento dos equipamentos, o resfriador evaporativo também apresenta diversas vantagens em relação ao ar

condicionado. O primeiro garante 100% de renovação de ar, eliminando a recirculação e proliferação de fungos e bactérias, enquanto que o segundo tem pouca ou nenhuma renovação de ar, concentrando um ar poluído e viciado. A umidade relativa é mantida em níveis satisfatórios pelo climatizador. O ar condicionado reduz drasticamente a umidade relativa do ambiente causando o desconfortável ressecamento da pele e mucosas do corpo. A grande vantagem do ar condicionado convencional é o controle total da temperatura desejada através do termostato. O resfriador por evaporação depende diretamente da umidade relativa e temperatura do ar externo e tem baixa eficiência em climas muito úmidos.

Em termos ambientais, o climatizador evaporativo tem consumo de energia elétrica e água muito baixo. O ar condicionado é o grande vilão do consumo de energia elétrica de instalações residenciais e comerciais, podendo representar até 50% do consumo total. Além disso, fazem uso de gases que atacam a camada de ozônio, contribuem para o efeito estufa e apresentam toxidez elevada.

A manutenção do resfriador evaporativo não exige mão de obra especializada. A limpeza do reservatório de água deve ser feita mensalmente e das colméias trimestralmente. Nos aparelhos de ar condicionado deve ser realizada uma limpeza mensal do filtro de ar pelo usuário e limpeza interna semestral ou anual feita por técnico especializado.

#### **7.4 Ventiladores**

Ventiladores são máquinas que produzem fluxos de ar ou outros gases, com vazões relativamente altas e pressões baixas. Na prática, o ar está quase sempre presente, seja na forma natural como climatização e ventilação, seja misturado com outros gases na utilização como exaustão.

Na climatização e ventilação, o ar é introduzido num ambiente para controlar sua temperatura, limitado ao valor da temperatura do ar exterior, removendo a carga térmica do interior deste ambiente.

O custo é muito baixo e o consumo de energia elétrica é ainda mais baixo do que o resfriador evaporativo, porém, o ventilador não tem função de resfriamento, ou seja, não altera a temperatura do ar, apenas movimenta o ar quente e também não tem influência sobre a umidade relativa do ar.

Estes equipamentos são bastante utilizados para reduzir os efeitos prejudiciais do calor excessivo e remover carga térmica e poluentes de um ambiente por exaustão.



**Figura 7.7 - Ventilador**  
**Fonte: OLIVEIRA, 2007**

# Capítulo 8

## Conclusão

Este trabalho teve o objetivo de apresentar uma alternativa de climatização de ambientes, utilizando um equipamento com funcionamento baseado no resfriamento evaporativo. A idéia era produzir um climatizador de baixo custo sob todos os aspectos. Baixo custo de produção, baixo custo de operação e baixo custo de manutenção.

Em relação à operação, foi comprovada, através de estudos de comparações realizadas entre resfriadores evaporativos e ares condicionados, a expressiva redução de consumo de energia elétrica, tornando este equipamento bastante atraente. Essa redução do consumo de energia elétrica se deve à operação de um único motor de indução de 1 cv e 4 pólos funcionando em baixas rotações, aproximadamente 400 rpm. O funcionamento em baixa rotação é conseguida pela utilização de um inversor de frequência que controla a velocidade do motor, garantindo economia de energia pelo funcionamento em velocidade adequada e suavizando as partidas do motor.

Foi visto que a manutenção do equipamento é simples e não necessita de mão-de-obra especializada. Assim, a manutenção do climatizador evaporativo requer poucos gastos.

Sob o ponto de vista de produção, no sentido de construção, foi verificado que, apesar de utilizar um método simples de funcionamento e poucos equipamentos, o custo de aquisição do climatizador evaporativo ainda está muito acima do custo de um ar condicionado convencional. Isto pode mudar com a produção em larga escala e investimentos no desenvolvimento deste equipamento.

# Bibliografia

- [1] LAMBERTS, R., XAVIER, A.A.P. *Conforto Térmico e Stress Térmico*. Florianópolis: UFSC, 2002. Apostila da disciplina Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, curso de Engenharia Civil.
  
- [2] LOPES, O. G. *Conforto Térmico e Qualidade do ar em Ambientes*. Jornal da AEASV, 2007.
  
- [3] LAMBERTS, R., CARLO, J.C. *Desempenho Térmico de Edificações*. Florianópolis: UFSC, 2005. Apostila da disciplina Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, curso de Engenharia Civil.
  
- [4] MONTERO, Luis R.R. *Projeto de Arrefecimento (Ventilação Ambiental)*. Campina Grande: UFCG, 2007. Apostila da disciplina Eletrotécnica Geral, curso de Engenharia Elétrica.
  
- [5] PENA, S. M. *Sistemas de Ar Condicionado e Refrigeração*. Eletrobrás/Procel, Rio de Janeiro, 2002.
  
- [6] GUIMARÃES, F.A., ALMEIDA, O.M. et alli. *Controle PID Auto-Ajustável em Ventiladores Industriais Visando a Eficiência Energética*. Anais do II Congresso Brasileiro de Eficiência Energética. Vitória-ES.
  
- [7] OLIVEIRA, G.R. *Relatório de Estágio Supervisionado*, 2007.

- [8] FITZGERALD, A.E., KINGSLEY, C., KUSKO, A. *Máquinas Elétricas*. McGraw-hill, Rio de Janeiro, 1975.
- [9] CREDER, H. *Instalações Elétricas*. LTC Editora, Rio de Janeiro, 2007.
- [10] MATHEUS, H. *Conversores de Freqüência e Soft-Starters*. Cuiabá. Curso Técnico, EJM Engenharia.
- [11] MASCHERONI, J.M., LICHTBLAU, M., GERARDI, D. *Guia de Aplicação de Inversores de Freqüência*. Weg Automação, 2ª Ed., Florianópolis, 2004.
- [12] VIANA, C.N.A. *Manual do Programa de Eficientização Industrial – Módulo: Ventiladores e Exaustores*. Eletrobrás/Procel, Rio de Janeiro, 2002.
- [13] MACINTYRE, A.J. *Ventilação Industrial e Controle despoluição*. Ed. LTC, Rio de Janeiro, 1990.
- [14] <http://www.ecobrisa.com.br> – Acesso em 15 de janeiro de 2008.
- [15] <http://www.evapcooler.com.br> – Acesso em 15 de janeiro de 2008.
- [16] LOPES, A.O., GABARRA, G.C., LIMA, B.F. *Ar Condicionado versus Climatizadores por Evaporação*. Revista Ciências do Ambiente on-line. Agosto de 2006, vol. 2, nº 2.

- [17] CAMARGO, J.R. *Resfriamento Evaporativo: Poupano a Energia e o Meio Ambiente*. Revista Ciências Exatas, Taubaté, v.9/10, n.1-2, p.69-75, 2003/2004.
- [18] CASTRO, W.P., PIMENTA, J.M.D. *Modelagem e Simulação de Painéis Evaporativos Diretos*. Proceedings of 10<sup>o</sup> Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering. Rio de Janeiro, 2004.
- [19] DRIEMEIER, D.A. *Dimensionamento de Sistemas de Ar Condicionado Visando Conforto Térmico em Ambiente Industrial*. Monografia, UFRGS, Engenharia Mecânica, 2003.
- [20] LOTTI, L.B., RUSSO, M.I.F., BACCI, M.D.N., PRADO, N.F.F. *Substituição dos Aparelhos de Ar Condicionado por Resfriadores Evaporativos na Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp*. Revista Ciências do Ambiente on-line. Agosto de 2006, vol.2, n<sup>o</sup>2.
- [21] VIGODERIS, R.B. *Desenvolvimento de um Protótipo para Resfriamento Adiabático Evaporativo, em Instalações Climatizadas para Animais, Usando Argila Expandida*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Engenharia Agrícola, 2002.
- [22] SILVA, C.E. *Comparação de Painéis Evaporativos de Argila Expandida e Celulose para Sistema de Resfriamento Adiabático do Ar em Galpões Avícolas com Pressão Negativa em Modo Túnel*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Engenharia Agrícola, 2002.

- [23] <http://www.helice.com.br> – Acesso em 2 de abril de 2008.
- [24] NEVES, L., GIL, N. *Máquinas Eléctricas*. Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Leiria, 1999/2000.
- [25] ASHRAE HVAC Systems & Equipment Handbook, 2000.
- [26] SEDRA, A.S., SMITH, K.C. *Microeletrônica*. Makron Books, São Paulo, 2000.