

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

MARCOS MARAN

**MODERNIZAÇÃO DE SISTEMA DE  
AR CONDICIONADO  
ESTUDO DE CASO DE IMPLANTAÇÃO DE  
MELHORIAS PARA UM EDIFÍCIO DE ESCRITÓRIOS**

V.1

São Paulo  
2005

MARCOS MARAN

**MARCOS MARAN**

**MODERNIZAÇÃO DE SISTEMA DE  
AR CONDICIONADO  
ESTUDO DE CASO DE IMPLANTAÇÃO DE  
MELHORIAS PARA UM EDIFÍCIO DE ESCRITÓRIOS**

**Monografia apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para obtenção do título de MBA em  
Gerenciamento de Facilidades.**

**Área de Concentração:  
Gerenciamento de Facilidades / MBA - USP**

**Orientador:  
Prof. Dr. Racine T. A. Prado**

São Paulo  
2005

### **Ficha Catalográfica**

**AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES  
TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA  
FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.**

**Maran, Marcos**

**Modernização de sistema de ar condicionado / M. Maran. --  
São Paulo, 2005.  
p.**

**Monografia (MBA em Gerenciamento de Facilidades) – Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de  
Educação Continuada em Engenharia.**

**1.Ar condicionado 2.Instalações prediais 3.Conforto térmico  
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Programa de  
Educação Continuada em Engenharia II.t.**

## **DEDICATÓRIA**

À Eliana,

Pela compreensão de minha ausência e pelos momentos de paz necessários para realização do trabalho.

Aos meus queridos pais,

Cujos esforços, princípios de vida e valorização do estudo, sempre nortearam minha vida e minha vocação. Pela compreensão de minha ausência num momento da vida quando mais precisam de mim. Muito obrigado por tudo.

A minhas irmãs,

Que sempre foram exemplos para mim, pela obstinação, coragem e firmeza para enfrentar as coisas da vida.

A Deus,

Pela inspiração, pelos momentos necessários de paz e reflexão. Por mais um degrau na minha evolução.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. Dr. Racine, pelos esclarecimentos, disponibilidade e o grande incentivo. Pelo seu senso prático e simples de conduzir tudo.

A todos os professores do curso MBA – Gerenciamento de Facilidades, que sempre atenderam aos meus pedidos de esclarecimento com presteza, cortesia e competência.

A Laís e a Bianca, pela imensa colaboração na parte gráfica do trabalho. Sem essa ajuda a execução do trabalho teria sido muito mais difícil.

## **RESUMO**

O presente trabalho apresenta um estudo de caso de modernização de sistema de ar condicionado predial e suas mais relevantes melhorias. No âmbito dos edifícios de escritórios, um dos itens que mais influi sobre a percepção da qualidade e bem estar do ambiente de trabalho é a satisfação com o conforto térmico. O caráter essencialmente individual de cada pessoa, relativo ao funcionamento de seu sistema termoregulador, sua taxa metabólica, suas vestimentas, dificultam o encontro de uma solução que atenda à satisfação de todas as pessoas com o conforto térmico de um determinado ambiente. A compreensão da relação entre performance humana e satisfação com o conforto térmico no ambiente de trabalho tem levado à realização de inúmeras pesquisas a respeito do conforto térmico e a compreensão dos mecanismos de troca de calor do ser humano com o ambiente. Como consequência direta dessas pesquisas, normas são editadas e passam a servir como referência para execução de projetos e instalações. Para acompanhar esse desenvolvimento do conhecimento sobre conforto térmico, a indústria de equipamentos e componentes para condicionamento de ar desenvolveu nesses últimos anos novas tecnologias, principalmente a relativa a componentes eletromecânicos e sistemas de controle, que propiciam um sensível aumento de qualidade de controle e eficiência, levando a maior satisfação do ser humano e melhor desempenho energético da edificação. A modernização de sistemas de ar condicionado é, então, uma das ferramentas à disposição dos gestores prediais para tornar o edifício mais competitivo, seja pelo aumento de bem-estar e satisfação proporcionado aos seus ocupantes, seja pelo aumento de sua eficiência.

## **ABSTRACT**

This work presents a case study of air conditioning system upgrading in buildings and its most relevant improvements. For office buildings, one of the items that most influences the perception of quality and well-being at the work place is thermal comfort. The individual nature of people's thermoregulating system, their metabolic rate, and their clothes makes it difficult to find a solution that can meet the expectation of everyone with thermal comfort in a given office room. The need for understanding the relationship between human performance and thermal comfort in the workplace has led to a great deal of research on thermal comfort and the mechanisms of body heat exchange with the environment. As a direct consequence of such researches, standards have been issued and are now used as references for carrying out designs and facilities. In order to keep up with the development of thermal comfort knowledge, the industry of air-conditioning equipment and components has developed new technologies, especially in what relates to electromechanical components and control systems, which can provide a noticeable increase in quality and efficiency and lead to greater satisfaction to people and better energy performance in buildings. Upgrading of air-conditioning systems is therefore one of the tools available facility managers to make buildings more competitive, either by increasing the comfort and satisfaction to residents, or by increasing their efficiency.

## LISTA DE FIGURAS

|               |                                                                                                                                          |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Figura 1.1    | Fontes de calor no ambiente de trabalho                                                                                                  |
| Figura 2.1    | Gráfico do PMV – Correlação entre PMV (ou VME) e PPD (ou PPI)                                                                            |
| Figura 2.2    | Gráfico da percentagem de insatisfeitos com a assimetria de radiação                                                                     |
| Figura 2.3    | Gráfico da percentagem de insatisfeitos com as correntes de ar, para diferentes temperaturas do ar                                       |
| Figura 2.4    | Gráfico da percentagem de insatisfeitos com a diferença de temperatura entre a cabeça e pés                                              |
| Figura 2.5    | Gráfico da percentagem de insatisfeitos devido à temperatura do piso                                                                     |
| Figura 3.1    | Transferência de calor entre dois corpos                                                                                                 |
| Figura 3.2    | Trocas térmicas num ambiente com ar condicionado                                                                                         |
| Figura 3.3    | Circuito de refrigeração a compressão de vapor                                                                                           |
| Figura 3.4    | Sistema típico de absorção de vapor                                                                                                      |
| Figura 3.5    | Chiller de absorção típico                                                                                                               |
| Figura 3.6(a) | Aparelho de janela – Vista externa                                                                                                       |
| Figura 3.6(b) | Aparelho de janela – Vista interna                                                                                                       |
| Figura 3.7(a) | Sistema <i>self-contained</i> com condensação a ar – Vista frontal externa                                                               |
| Figura 3.7(b) | Sistema <i>self-contained</i> com condensação a ar – Vista interna simplificada                                                          |
| Figura 3.8    | Sistema <i>self-contained</i> com condensação a ar remota                                                                                |
| Figura 3.9(a) | Sistema <i>self-contained</i> com condensação a ar remota – Distribuição de ar condicionado por meio de dutos                            |
| Figura 3.9(b) | Sistema <i>self-contained</i> com condensação a ar remota – Distribuição de ar condicionado por meio de dutos e com tomada de ar externo |
| Figura 3.10   | Sistema de ar condicionado <i>self-contained</i> com condensação a água – exemplo de arranjo físico                                      |
| Figura 3.11   | Sistema de ar condicionado <i>self-contained</i> com condensação a água – exemplo de <i>fan-coil</i>                                     |
| Figura 3.12   | Sistema split system – Arranjo físico simplificado                                                                                       |
| Figura 3.13   | Sistema Multi-split                                                                                                                      |
| Figura 3.14   | Sistema de ar condicionado de expansão indireta de condensação a água – Principais componentes                                           |
| Figura 3.15   | Vista externa de um sistema de expansão indireta com condensação a ar                                                                    |
| Figura 4.1    | Circuito primário de distribuição de água gelada                                                                                         |
| Figura 4.2    | Circuito secundário de distribuição de água gelada                                                                                       |
| Figura 4.3    | Vista do <i>chiller</i> substituído                                                                                                      |
| Figura 4.4    | Vista do novo <i>chiller</i>                                                                                                             |

|             |                                                                                    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Figura 4.5  | Vista frontal externa do painel de supervisão e controle dos novos <i>chillers</i> |
| Figura 4.6  | Vista interna do painel de supervisão e controle dos novos <i>chillers</i>         |
| Figura 4.7  | <i>Chiller</i> semi-hermético substituído                                          |
| Figura 4.8  | <i>Chiller</i> aberto implantado                                                   |
| Figura 4.9  | Vista do <i>Hot Gas by Pass</i> instalado num <i>chiller</i>                       |
| Figura 4.10 | Medição eletrônica de espessura dos tubos do condensador                           |
| Figura 4.11 | Vista de aparelho de análise e registro de dados de medição de espessura           |
| Figura 4.12 | Limpeza dos tubos do condensador por meio de hidrojateamento                       |
| Figura 4.13 | Vista de uma das extremidades dos tubos do condensador após hidrojateamento        |
| Figura 4.14 | Vista da caixa <i>Water Marine Box</i> no condensador do <i>chiller</i>            |
| Figura 4.15 | Vista de <i>chiller</i> sem caixa <i>Water Marine Box</i>                          |
| Figura 4.16 | Inversor de frequência                                                             |
| Figura 4.17 | Diagrama de blocos de um inversor de frequência                                    |
| Figura 4.18 | Configuração anterior da rede de automação do Sistema de Ar Condicionado           |
| Figura 4.19 | Nova configuração da rede de automação do Sistema de Ar Condicionado               |
| Figura 4.20 | Estação Controladora Remota                                                        |
| Figura 4.21 | Estação de Supervisão do Sistema de Ar Condicionado                                |
| Figura 4.22 | Estação controladora remota da CAG                                                 |
| Figura 4.23 | Fan-coil – Componentes do circuito pneumático de controle de temperatura           |
| Figura 4.24 | Fan-coil – Novo circuito eletromecânico de supervisão e controle de temperatura    |
| Figura 4.25 | Estação metereológica                                                              |
| Figura 4.26 | Tela de computador com os dados obtidos da estação metereológica                   |

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

|            |                                                                                                                          |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tabela 2.1 | Isolamento térmico para diversas peças de roupas                                                                         |
| Tabela 2.2 | Taxas de metabolismo para diversas atividades                                                                            |
| Tabela 2.3 | Escala de sensação térmica                                                                                               |
| Tabela 2.4 | Intervalos dos parâmetros para determinação do PMV                                                                       |
| Tabela 2.5 | Tabela do PMV, para atividade metabólica de 1,2 met (69,6 W/m <sup>2</sup> ) e umidade relativa do ar de 50 %            |
| Tabela 2.6 | 3 categorias de conforto térmico: Percentagem de insatisfeitos devido ao conforto térmico geral e desconforto localizado |
| Tabela 3.1 | Prazos para eliminação de substâncias destruidoras da camada de ozônio                                                   |
| Tabela 4.1 | Melhorias necessárias e suas respectivas consequências                                                                   |
| Tabela 4.2 | Capacidade máxima da CAG                                                                                                 |
| Tabela 4.3 | Capacidade máxima dos <i>fan-coils</i>                                                                                   |
| Tabela 4.4 | Índices comparativos de eficiência entre chillers                                                                        |
| Quadro 4.1 | Cronograma de implantação das melhorias                                                                                  |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|        |                                                                                 |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------|
| ASHRAE | American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. |
| CAG    | Central de Água de Gelada                                                       |
| CFC    | Clorofluorcarbono                                                               |
| CLP    | Controlador Lógico Programável                                                  |
| CPU    | <i>Central Processing Unit</i> (Unidade Central de Processamento)               |
| HC     | Hidrocarbono                                                                    |
| HCFC   | Hidroclorofluorcarbonos                                                         |
| HFC    | Hidrofluorcarbono                                                               |
| I/P    | Transdutor de sinal de corrente para sinal de pressão                           |
| IHM    | Interface Homem-Máquina                                                         |
| IP     | <i>Internet Protocol</i> (Protocolo Internet)                                   |
| ISSO   | International Organization for Standardization                                  |
| LiBr   | Brometo de Lítio                                                                |
| ODP    | <i>Ozone Depletion Potencial</i> (Capacidade de Destruição da Camada de Ozônio) |
| PMV    | <i>Predicted Mean Vote</i>                                                      |
| PPD    | <i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i>                                     |
| PPI    | Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas                                            |
| RS     | Protocolo de comunicação serial                                                 |
| TCP    | <i>Transmission Control Protocol</i> (Protocolo de Controle de Transmissão)     |
| T/P    | Transdutor de sinal de temperatura para pressão                                 |
| TR     | Tonelada de Refrigeração                                                        |
| VME    | Voto Médio Estimado                                                             |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                        |                                                                                              |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| °C                     | Unidade de temperatura – grau celsius                                                        |
| Clo                    | Unidade de isolamento térmico da vestimenta - <i>clothing</i> (= 0,155 m <sup>2</sup> .°C/W) |
| F                      | Frequência (elétrica)                                                                        |
| H <sub>2</sub> O       | Água                                                                                         |
| Hertz                  | Unidade de frequência elétrica – ciclos por segundo                                          |
| m/s                    | Unidade de velocidade - Metros por segundo                                                   |
| m <sup>2</sup>         | Unidade de área - Metro quadrado                                                             |
| m <sup>3</sup> /minuto | Unidade de vazão - Metro cúbico por minuto                                                   |
| m <sup>3</sup> /s      | Unidade de vazão - Metro cúbico por segundo                                                  |
| met                    | Unidade de Taxa metabólica (= 58,2 W/m <sup>2</sup> )                                        |
| mmHg                   | Unidade de pressão - Milímetros de coluna de mercúrio                                        |
| N                      | Frequência (mecânica)                                                                        |
| NH <sub>3</sub>        | Amônia                                                                                       |
| P                      | Par de pólos (do motor elétrico)                                                             |
| Pa                     | Unidade de pressão – Pascal                                                                  |
| Q                      | Vazão                                                                                        |
| RPM                    | Unidade de frequência mecânica - N° de Rotações por minuto                                   |
| T                      | Temperatura                                                                                  |
| W                      | Potência ou Trabalho                                                                         |
| Watt                   | Unidade de Potência ou Trabalho                                                              |

## SUMÁRIO

|            |                                                                                                                     |           |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1.</b>  | <b>INTRODUÇÃO E OBJETIVO DO TRABALHO .....</b>                                                                      | <b>15</b> |
| <b>2.</b>  | <b>CONFORTO TÉRMICO .....</b>                                                                                       | <b>19</b> |
| 2.1.       | Sistema termoregulador, equilíbrio térmico e conforto térmico .....                                                 | 19        |
| 2.2.       | Os índices PMV ( <i>Predicted Mean Vote</i> ) e PPD ( <i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i> ) de Fanger ..... | 23        |
| 2.3.       | Desconforto localizado .....                                                                                        | 27        |
| 2.4.       | Aceitabilidade térmica dos ambientes .....                                                                          | 30        |
| <b>3.</b>  | <b>SISTEMAS DE AR CONDICIONADO .....</b>                                                                            | <b>32</b> |
| 3.1.       | Transferência de calor .....                                                                                        | 32        |
| 3.2.       | Tecnologias dos sistemas de refrigeração e ar condicionado .....                                                    | 34        |
| 3.2.1.     | O circuito de refrigeração a compressão de vapor .....                                                              | 35        |
| 3.2.2.     | O circuito de refrigeração de absorção de vapor .....                                                               | 37        |
| 3.3.       | Fluídos refrigerantes .....                                                                                         | 40        |
| 3.3.1.     | Fluídos refrigerantes naturais .....                                                                                | 41        |
| 3.3.2.     | Fluídos refrigerantes sintéticos .....                                                                              | 41        |
| 3.4.       | Tipos de sistemas de ar condicionado .....                                                                          | 43        |
| 3.4.1.     | Sistema de Expansão Direta .....                                                                                    | 44        |
| 3.4.1.1.   | Aparelhos de Janela .....                                                                                           | 44        |
| 3.4.1.2.   | Sistema Self-Contained com Condensação a Ar .....                                                                   | 46        |
| 3.4.1.3.   | Sistema Self-Contained com Condensação a Água .....                                                                 | 49        |
| 3.4.1.4.   | Sistema Split-System .....                                                                                          | 51        |
| 3.4.1.5.   | Sistema de Expansão Indireta .....                                                                                  | 52        |
| 3.4.1.5.1. | Sistema com condensação a água .....                                                                                | 52        |
| 3.4.1.5.2. | Sistema com condensação a ar .....                                                                                  | 54        |
| <b>4.</b>  | <b>ESTUDO DE CASO .....</b>                                                                                         | <b>56</b> |
|            | MODERNIZAÇÃO DE SISTEMA DE AR CONDICIONADO: IMPLANTAÇÃO DE MELHORIAS PARA UM EDIFÍCIO DE ESCRITÓRIOS .....          | 56        |
| 4.1.       | Descrição do sistema de ar condicionado .....                                                                       | 56        |
| 4.2.       | Motivação para realização das melhorias .....                                                                       | 58        |

|            |                                                                                                            |            |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.3.       | Planejamento das melhorias .....                                                                           | 60         |
| 4.4.       | Melhorias, características e benefícios .....                                                              | 63         |
| 4.4.1.     | Substituição de chillers.....                                                                              | 64         |
| 4.4.1.1.   | Determinação da carga térmica atualizada e da capacidade requerida para o sistema de ar condicionado ..... | 64         |
| 4.4.1.1.1. | Levantamentos efetuados e dados considerados .....                                                         | 65         |
| 4.4.1.1.2. | Carga máxima a ser combatida .....                                                                         | 66         |
| 4.4.1.1.3. | Capacidade do sistema de ar condicionado.....                                                              | 66         |
| 4.4.1.1.4. | Determinação da capacidade final do sistema de ar condicionado .....                                       | 68         |
| 4.4.1.2.   | Eficiência.....                                                                                            | 70         |
| 4.4.1.3.   | Fluído refrigerante.....                                                                                   | 72         |
| 4.4.1.4.   | <i>Chiller</i> aberto.....                                                                                 | 72         |
| 4.4.1.5.   | <i>Hot Gas By Pass</i> .....                                                                               | 74         |
| 4.4.1.6.   | Caixa de ligação <i>Water Marine Box</i> .....                                                             | 76         |
| 4.4.2.     | Variadores de velocidade nos sistemas de bombeamento dos anéis secundários.....                            | 81         |
| 4.4.2.1.   | Análise da situação nos sistemas de bombeamento dos anéis secundários.....                                 | 82         |
| 4.4.2.2.   | Variadores eletrônicos de velocidade.....                                                                  | 83         |
| 4.4.3.     | Mudança da configuração da rede de automação.....                                                          | 88         |
| 4.4.3.1.   | Nova configuração da rede de automação.....                                                                | 90         |
| 4.4.3.2.   | Redes de comunicação .....                                                                                 | 91         |
| 4.4.3.3.   | Estação controladora remota .....                                                                          | 92         |
| 4.4.3.4.   | Estação de supervisão do sistema.....                                                                      | 93         |
| 4.4.3.5.   | Alimentação de energia.....                                                                                | 95         |
| 4.4.4.     | Substituição dos sistemas de controle de temperatura nos fan-coils.....                                    | 96         |
| 4.4.5.     | Estação metereológica.....                                                                                 | 99         |
| <b>5.</b>  | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                                                                          | <b>101</b> |
| <b>6.</b>  | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                                                                    | <b>104</b> |

## **1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO DO TRABALHO**

A migração de pessoas do campo para as cidades a partir do século XVIII, como consequência da revolução industrial alterou substancialmente a arquitetura das cidades até então existentes. A mudança dos processos de fabricação, de um modelo artesanal, de baixa produção, com pequenas oficinas e grupos de pessoas, para um outro, totalmente novo, de grande escala de fabricação, movido por máquinas a vapor, passou a exigir o emprego acentuado de mão de obra e de locais para abrigar pessoas e equipamentos.

Ao fim do século XIX e começo do século XX, com o emprego da eletricidade em corrente alternada e suas máquinas, a revolução industrial dá outro salto, exigindo novos fluxos de capitais e mão de obra, agora não só para a produção, mas também para a execução de tarefas eminentemente burocráticas, necessárias para o bom andamento dos negócios e exigidas pela nova ordem econômica que prosperava.

Assim, de uma de uma arquitetura composta de pequenas e baixas construções, as cidades evoluem, em número e em porte das edificações. A ampliação do conhecimento humano sobre os materiais e novas tecnologias, além da solução propiciada pelos elevadores, ajudam enormemente o crescimento das edificações industriais e urbanas. Dessa forma, mais e mais edifícios são construídos, maiores, mais altos, buscando dar soluções a problemas de logística, processos, mercados, disposição de mão de obra, e, porque não, ostentação de poder e pujança econômica. Nesse ambiente inicia-se a consolidação dos edifícios de escritórios, onde são desenvolvidas atividades burocráticas consequentes da evolução econômica e empresarial desses novos tempos.

Nos primórdios da revolução industrial e até meados do século XX, as pesquisas a respeito das condições de trabalho, a relação com a saúde dos trabalhadores, que permaneciam por longos períodos nessas novas edificações, e o seu desempenho laboral, foi

incipiente, mesmo porque o conhecimento científico, notadamente na área da Saúde, apenas começava. A partir do início do século XX, com o grande crescimento econômico e científico, além da aplicação das teorias do Taylorismo e dos processos de Henry Ford, iniciam-se os primeiros trabalhos com o objetivo de medição de produtividade, da eficiência, do controle de procedimentos e ações voltado ao ambiente fabril. Já em 1916, a Comissão Americana de Ventilação procede aos primeiros estudos para avaliar o rendimento do operário na indústria. Começa-se a relacionar ambientes desconfortáveis com índices mais elevados de acidentes de trabalho (ANDRADE; GONÇALVES, 2003).

De lá para cá, muitos estudos e pesquisas foram realizados. Legislações e Normas específicas foram editadas, devido ao reconhecimento da necessidade de dotar os ambientes de trabalho de condições favoráveis para a realização das tarefas, que levassem ao Homem melhores condições de conforto e bem-estar, de modo que este pudesse produzir com alto desempenho, saúde e com satisfação (ANDRADE; GONÇALVES, 2003).

Dessa forma, nas edificações destinadas ao trabalho, procura-se dotar os locais de conforto ambiental adequado, ou seja, principalmente controlando as condições térmicas (temperatura, ventilação), visuais (iluminação, acuidade visual), acústicas (ruídos, inteligibilidade da palavra) e ergonômicas (móveis e ambiente), buscando-se evitar situações de desconforto e estresse para o trabalhador (ANDRADE; GONÇALVES, 2003).

Estritamente em relação ao tema do presente trabalho, no âmbito dos edifícios de escritórios, o calor em seu interior é proveniente de diversas fontes: da radiação solar direta e indireta (reflexão dos elementos adjacentes) e da convecção do ar exterior que incidem sobre a fachada predial e atravessam paredes e vidros; dos equipamentos utilizados no ambiente de trabalho, tais como aparelhos de iluminação (lâmpadas, reatores), computadores, copiadoras, impressoras, máquinas de café, etc; e das próprias pessoas presentes no ambiente, devido ao metabolismo humano, conforme mostrado na figura 1.1.

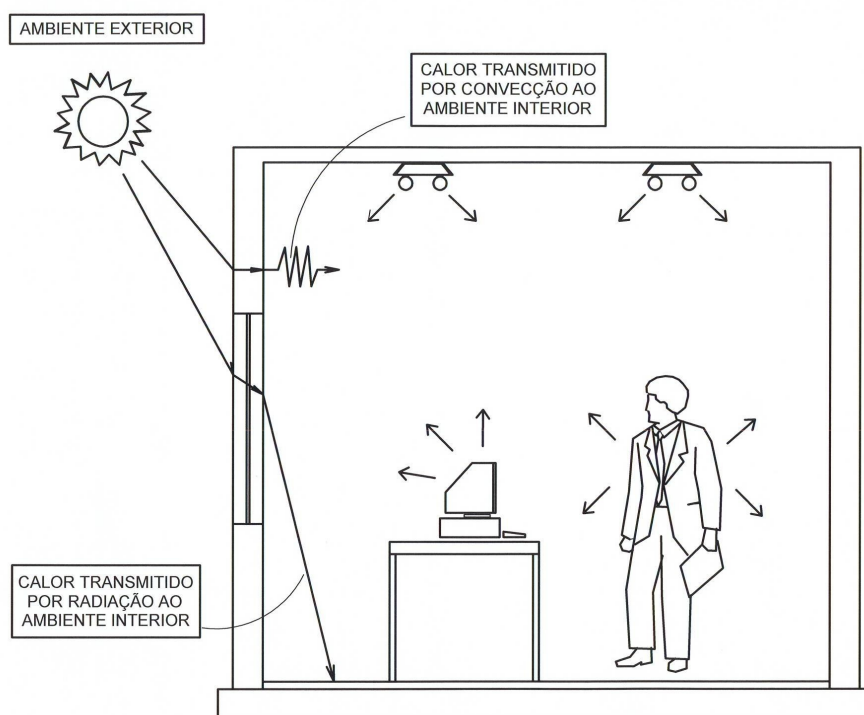


Figura 1.1 – Fontes de calor no ambiente de trabalho

Dessa forma o cuidado com o conforto térmico do ambiente de trabalho tem importância significativa, visto que além de ser praticamente impossível depender exclusivamente das condições climáticas externas para se obter boas condições térmicas no ambiente interno, devido à variabilidade das condições atmosféricas (velocidade do vento, temperatura, umidade, etc.), a tendência da moderna arquitetura é adotar envoltórias fechadas para os edifícios, principalmente em pele de vidro, o que aumenta o enclausuramento do calor em seu interior. Para resolver a questão da climatização do interior da edificação, são então instalados equipamentos mecânicos de ventilação, aquecimento e condicionamento de ar, destinados a propiciar controle efetivo e padronizado sobre a temperatura, umidade e velocidade interna do ar, com objetivo de manter um ambiente termicamente estável, confortável para o Ser Humano. Responsáveis por cerca de 35 a 60% de toda a energia consumida no edifício, esses sistemas acabam merecendo atenção especial quanto à

racionalização de energia consumida, seja pela utilização de equipamentos mais eficientes, seja pela alteração dos processos operacionais (PRADO, 2003).

O conhecimento sobre como ocorrem as trocas de calor entre Ser Humano e o ambiente, bem como das condições necessárias para obtenção das condições de conforto térmico tornam-se importantes para determinar ações sobre instalações e equipamentos de condicionamento de ar.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar um estudo de caso de análise e implantação de melhorias para um sistema de ar condicionado predial, comentando e mostrando algumas das suas principais intervenções. O tema deste trabalho é bastante atual, pois além de servir de referência para aplicação em inúmeros edifícios com sistema similar, também pode ser utilizado para novas instalações, pois várias das implantações citadas representam o estado da arte nesse ramo da engenharia, além de incluir conceitos de manutenibilidade, segurança operacional e confiabilidade, tão necessários para sistemas desse porte e muito importantes para valorização da edificação como um todo. Para tanto, o trabalho foi dividido em 5 capítulos. No segundo capítulo discorre-se sobre conforto térmico e os estudos, principalmente aqueles realizados por P. O. Fanger, que levaram à definição do PMV e PPD e servem de base para normas de projeto de sistemas de ar condicionado no mundo todo. No terceiro capítulo, referente a sistemas de ar condicionado, realiza-se a apresentação dos diversos sistemas de ar condicionado, desde os mais simples aos de maior porte, descrevendo-se cada um deles. No quarto capítulo, o estudo de caso, apresentam-se os levantamentos e análises efetuadas sobre um sistema existente e que serviram para tomada de decisões a respeito das ações de melhorias a serem implantadas. No quinto e último capítulo, realizam-se as considerações finais a respeito de todo o trabalho, com comentários gerais sobre os resultados obtidos e esperados.

## **2. CONFORTO TÉRMICO**

Com o objetivo de criar ambientes de trabalho que levem à maior satisfação e produtividade do homem, muitos estudos sobre conforto térmico têm sido realizados com o intuito de identificar os vários fatores intervenientes na sensação de calor e frio pelo ser humano e como eles se relacionam.

Esses trabalhos se revestem de grande importância, pois com o desenvolvimento do conhecimento sobre o processo de troca de calor entre ser humano e ambiente, terminam por definir padrões e normas que são adotados por toda a sociedade, influenciando projetos de ar condicionado e ventilação, bem como toda a indústria de equipamentos e componentes.

### **2.1. Sistema termoregulador, equilíbrio térmico e conforto térmico**

A energia interna do ser humano, resultado da transformação dos alimentos através do processo metabólico, é consumida nas funções fisiológicas vitais, no desempenho de atividades musculares diversas e o restante é transformado em calor. Visto que o homem é um ser homotérmico, seu sistema termoregulador, por meio de ações fisiológicas, tem como missão manter a temperatura corporal constante e em torno de 37 °C. Qualquer excesso de calor deve ser imediatamente eliminado. Quanto maior o esforço desse sistema em manter a temperatura interna constante, maior será a sensação de desconforto térmico. Sob o ponto de vista físico, a melhor sensação de conforto térmico ocorre quando a quantidade de calor ganho (metabolismo + calor recebido do ambiente) for igual à quantidade de calor cedido para o

ambiente sem nenhum esforço do sistema termoregulador. Nessa condição dizemos que o corpo humano está em equilíbrio térmico, isto é, sua temperatura é constante em torno de 37 °C e todo excesso de calor é eliminado para o ambiente (RUAS, 2001).

O conforto térmico depende de variáveis que interferem no trabalho do sistema termorregulador, as chamadas variáveis pessoais e ambientais. As variáveis pessoais são a taxa de metabolismo e o isolamento térmico da vestimenta. As ambientais podem ser classificadas em gerais e locais. As variáveis ambientais gerais são a temperatura radiante média, umidade, temperatura e velocidade relativa do ar, enquanto as variáveis ambientais locais, responsáveis pelo desconforto localizado, são a assimetria de temperatura radiante, as correntes de ar, a diferença vertical de temperatura do ar e a temperatura do piso. A combinação satisfatória dessas variáveis num determinado ambiente pode levar um indivíduo a experimentar a sensação de bem estar e por consequência à satisfação com o conforto térmico (PRADO, 2003).

Enquanto as variáveis ambientais podem ser medidas em campo ou determinadas para um dado ambiente, as pessoais variam sensivelmente.

A taxa metabólica depende de diversos fatores, tais como, nível de atividade desempenhada, sexo, idade, adaptação, etc. Sua unidade de medida é o “met”, que toma como referência uma pessoa sentada e em repouso. Nessa situação a taxa metabólica é igual a 1 “met” ou seja, 58,2 W/m<sup>2</sup>.

A outra variável pessoal, o isolamento térmico da vestimenta, tem como unidade de medida o “clo” (*clothing*), sendo 1 clo = 0,155 m<sup>2</sup>.°C/W e depende do material empregado na fabricação da vestimenta, sua espessura, entrelaçamento de suas fibras e do modelo de fabricação mais justo ou mais folgado (RUAS, 2002).

Uma vez que a determinação da taxa metabólica e do isolamento térmico é difícil e requer muitos recursos, a determinação exata de seus valores somente é aplicável para estudos

em laboratórios. Para avaliação de conforto térmico de modo mais simples e também sujeito a uma maior margem de erro, é comum estimar seus valores por meio de tabelas da ISO 7730, conforme exemplos indicados nas tabelas 2.1 e 2.2 adiantes.

Apesar dos esforços de avaliar o conforto térmico conforme a influência das variáveis pessoais e ambientais, é importante mencionar que a avaliação do conforto térmico depende das pessoas. Conforme a definição clássica da ISO 7730 (1994), conforto térmico é “uma condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico” (PRADO, 2003).

Nas palavras de Xavier (2000, p. 16),

[...] Uma vez que os estudos de conforto térmico envolvem aspectos pessoais e ambientais, é impossível que um grupo de pessoas sujeitas a um mesmo ambiente, ao mesmo tempo, esteja todo ele satisfeito com as condições térmicas do mesmo. Assim sendo, diz-se que um ambiente é aceitável termicamente, quando o mesmo apresenta combinações das variáveis físicas que o tornem desconfortável para o menor número de pessoas possível (ISO 7730, 1994).

Segundo Ruas (2002, p.1), “A complexidade de considerar-se os fatores fisiológicos e psicológicos em modelos matemáticos, para estimar a sensação térmica das pessoas, tem levado os pesquisadores a desenvolver índices de conforto baseados só nos fatores físicos”.

Nesse sentido, dentre os estudos mais importantes sobre conforto térmico estão os desenvolvidos pelo professor dinamarquês P. Ole Fanger, que através de equações, tabelas e gráficos fez o relacionamento das variáveis pessoais e ambientais que levam à satisfação com o ambiente térmico. Devido à importância de seus trabalhos, Fanger teve seus estudos tomados como base para a normalização da condição de conforto térmico a que está sujeita uma pessoa através da norma internacional ISO 7730 (1994) (XAVIER, 2000).

| Peças de roupa                       | Isolamento térmico<br>clo |
|--------------------------------------|---------------------------|
| <b>Roupa de baixo</b>                |                           |
| Calcinha                             | 0,03                      |
| ceroula longa                        | 0,10                      |
| camiseta sem manga                   | 0,04                      |
| camiseta com manga curta             | 0,09                      |
| calcinha e sutiã                     | 0,03                      |
| camiseta com manga longa             | 0,12                      |
| <b>Camisa – blusa</b>                |                           |
| mangas curtas                        | 0,15                      |
| Leve, mangas longas                  | 0,20                      |
| normal, mangas longas                | 0,25                      |
| camisa de flanela, mangas longas     | 0,30                      |
| Blusa leve, mangas longas            | 0,15                      |
| <b>Calça</b>                         |                           |
| Shorts                               | 0,06                      |
| Leve                                 | 0,20                      |
| Normal                               | 0,25                      |
| Flanela                              | 0,28                      |
| <b>Vestido – saia</b>                |                           |
| saia leve (verão)                    | 0,15                      |
| saia pesada (inverno)                | 0,25                      |
| vestido leve, mangas curtas          | 0,20                      |
| vestido de inverno, mangas longas    | 0,40                      |
| <b>Sueter</b>                        |                           |
| Colete sem manga                     | 0,12                      |
| sueter leve                          | 0,20                      |
| Sueter                               | 0,28                      |
| sueter pesado                        | 0,35                      |
| <b>Paletó</b>                        |                           |
| leve, paletó de verão                | 0,25                      |
| Paletó                               | 0,35                      |
| guarda-pó                            | 0,30                      |
| <b>Alto isolamento, fibra-pele</b>   |                           |
| Calça                                | 0,35                      |
| Paletó                               | 0,40                      |
| Colete                               | 0,20                      |
| <b>Roupa para ambientes externos</b> |                           |
| Casaco                               | 0,60                      |
| Jaqueta                              | 0,55                      |
| casaco com capuz                     | 0,70                      |
| macacão, fibra-pele                  | 0,55                      |
| <b>Diversas</b>                      |                           |
| Meias                                | 0,02                      |
| Meias grossas, altura do tornozelo   | 0,05                      |
| Meias grossas, longas                | 0,10                      |
| Meias femininas de nylon             | 0,03                      |
| sapatos (sola fina)                  | 0,02                      |
| sapatos (sola grossa)                | 0,04                      |
| Botas                                | 0,10                      |
| Luvas                                | 0,05                      |

Tabela 2.1 – Isolamento térmico para diversas peças de roupas  
Fonte: ISO 7730 (1994)

| Atividade                                                          | Metabolismo          |       |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------|-------|
|                                                                    | (W/ m <sup>2</sup> ) | (met) |
| Reclinado                                                          | 46                   | 0,8   |
| Sentado, relaxado                                                  | 58                   | 1,0   |
| Atividade sedentária (escritório, residência, escola, laboratório) | 70                   | 1,2   |
| Em pé, atividade leve (compras, laboratório, indústria leve)       | 93                   | 1,6   |
| Em pé, atividade média (trabalho com máquina, doméstico)           | 116                  | 2,0   |
| Andando em superfície nivelada                                     |                      |       |
| 2 km/h                                                             | 110                  | 1,9   |
| 3 km/h                                                             | 140                  | 2,4   |
| 4 km/h                                                             | 165                  | 2,8   |
| 5 km/h                                                             | 200                  | 3,4   |

Tabela 2.2 – Taxas de metabolismo para diversas atividades  
Fonte: ISO 7730 (1994)

## 2.2. Os índices PMV (*Predicted Mean Vote*) e PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*) de Fanger

Conforme já mencionado, o conforto térmico está relacionado ao equilíbrio térmico do corpo humano. Todo excesso de calor produzido no corpo humano deverá ser imediatamente eliminado de modo que a temperatura corpórea possa permanecer constante, o que nos remete ao conceito de balanço de calor.

A compreensão dos mecanismos de troca de calor e balanço térmico teve notável avanço na década de 1970 com os estudos realizados pelo professor dinamarquês P. Ole Fanger no laboratório da ASHRAE no período de outubro de 1966 a abril de 1967. As equações de balanço térmico desenvolvidas por Fanger, que deixamos de apresentar, pois vão além do objetivo do presente trabalho, relacionam as diversas variáveis pessoais e ambientais visando estabelecer as condições necessárias para obtenção do conforto térmico.

Porém, como explica Ruas (2001, p. 40), “sob o ponto de vista prático, era necessário conhecer-se o grau de desconforto experimentado pelas pessoas em ambientes que tivessem condições diferentes daquelas de conforto térmico”.

Para tanto, Fanger desenvolveu um critério de avaliação do desconforto, relacionando as variáveis pessoais e ambientais com uma escala de sensação térmica. A esse critério deu o

nome de *Predicted Mean Vote* - PMV ou Voto Médio Estimado - VME (RUAS, 2001).

Para desenvolvimento do índice do PMV, Fanger realizou experimentos com 1396 pessoas no interior de câmaras climatizadas, onde foram expostas, de modo controlado, a diversas combinações das variáveis pessoais e ambientais. Cada pessoa anotava suas sensações térmicas segundo uma escala simétrica de sete pontos representada na Tabela 2.3.

|    |                     |
|----|---------------------|
| +3 | Muito quente        |
| +2 | Quente              |
| +1 | Ligeiramente quente |
| 0  | Neutro              |
| -1 | Ligeiramente frio   |
| -2 | Frio                |
| -3 | Muito frio          |

Tabela 2.3 – Escala de sensação térmica  
Fonte: ASHRAE 55a, 1995

Na escala da Tabela 2.3, os valores positivos representam sensações de calor e os valores negativos, sensações de frio. O valor “zero” representa o ponto de neutralidade térmica, onde a condição de conforto estaria atendida. Dessa forma, quanto mais longe do ponto “zero” ou neutro, mais o sistema termoregulador deve agir para manter o equilíbrio térmico e maior a sensação de desconforto.

Nesse trabalho Fanger esclarece que o PMV deve se restringir ao intervalo de + 2 até -2 e desde que seus principais parâmetros estejam dentro dos intervalos indicados na tabela 2.4 a seguir:

|                                        |                                            |                 |
|----------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------|
| Taxa metabólica                        | 46 W/m <sup>2</sup> a 232 W/m <sup>2</sup> | 0,8 met a 4 met |
| Resistência de isolamento das roupas   | 0 a 0,310 m <sup>2</sup> .°C/W             | 0 clo a 2 clo   |
| Temperatura radiante média             | 10 a 40 °C                                 |                 |
| Temperatura do ar                      | 10 a 30 °C                                 |                 |
| Velocidade relativa do ar              | 0 a 1 m/s                                  |                 |
| Pressão parcial do vapor de água no ar | 0 a 2700 Pa                                |                 |
| Umidade relativa do ar                 | 30 a 70%                                   |                 |

Tabela 2.4 – Intervalos dos parâmetros para determinação do PMV  
Fonte: Fanger (1972)

A equação desenvolvida por Fanger para cálculo do índice PMV exige muito trabalho para realização dos cálculos, sendo muito comum o uso das tabelas da ISO 7733 para determinação do PMV para diversas situações. Como exemplo indica-se a tabela 2.5 a seguir.

| Vestimenta |                      | Temperatura Operativa | Velocidade Relativa do ar – m/s |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|----------------------|-----------------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Clo        | m <sup>2</sup> .°C/W | °C                    | < 0,10                          | 0,10  | 0,15  | 0,20  | 0,30  | 0,40  | 0,50  | 1,00  |
| 0          | 0                    | 25                    | -1,33                           | -1,33 | -1,59 | -1,92 |       |       |       |       |
|            |                      | 26                    | -0,83                           | -0,83 | -1,11 | -1,40 |       |       |       |       |
|            |                      | 27                    | -0,33                           | -0,33 | -0,63 | -0,88 |       |       |       |       |
|            |                      | 28                    | 0,15                            | 0,12  | -0,14 | -0,36 |       |       |       |       |
|            |                      | 29                    | 0,63                            | 0,56  | 0,35  | 0,17  |       |       |       |       |
|            |                      | 30                    | 1,10                            | 1,01  | 0,84  | 0,69  |       |       |       |       |
|            |                      | 31                    | 1,57                            | 1,47  | 1,34  | 1,24  |       |       |       |       |
| 0,25       | 0,039                | 32                    | 2,03                            | 1,93  | 1,85  | 1,78  |       |       |       |       |
|            |                      | 23                    | -1,18                           | -1,18 | -1,39 | -1,81 | -1,97 | -2,25 |       |       |
|            |                      | 24                    | -0,79                           | -0,79 | -1,02 | -1,22 | -1,54 | -1,80 | -2,01 |       |
|            |                      | 25                    | -0,42                           | -0,42 | -0,64 | -0,83 | -1,11 | -1,34 | -1,54 | -2,21 |
|            |                      | 26                    | -0,04                           | -0,07 | -0,27 | -0,43 | -0,68 | -0,89 | -1,06 | -1,65 |
|            |                      | 27                    | 0,33                            | 0,29  | 0,11  | -0,03 | -0,25 | -0,43 | -0,58 | -1,09 |
|            |                      | 28                    | 0,71                            | 0,64  | 0,49  | 0,37  | 0,18  | 0,03  | -0,10 | -0,64 |
| 0,50       | 0,078                | 29                    | 1,07                            | 0,99  | 0,87  | 0,77  | 0,61  | 0,49  | 0,39  | 0,03  |
|            |                      | 30                    | 1,43                            | 1,35  | 1,25  | 1,17  | 1,05  | 0,95  | 0,87  | 0,58  |
|            |                      | 18                    | -2,01                           | -2,01 | -2,17 | -2,38 | -2,70 |       |       |       |
|            |                      | 20                    | -1,41                           | -1,41 | -1,76 | -2,04 | -2,25 | -2,42 |       |       |
|            |                      | 22                    | -0,79                           | -0,79 | -0,97 | -1,13 | -1,36 | -1,54 | -1,69 | -2,17 |
|            |                      | 24                    | -0,17                           | -0,20 | -0,36 | -0,48 | -0,68 | -0,83 | -0,95 | -1,35 |
|            |                      | 26                    | 0,44                            | 0,39  | 0,26  | 0,16  | -0,01 | -0,11 | -0,21 | -0,52 |
| 0,75       | 0,118                | 28                    | 1,05                            | 0,98  | 0,88  | 0,81  | 0,70  | 0,61  | 0,54  | -0,31 |
|            |                      | 30                    | 1,84                            | 1,57  | 1,51  | 1,46  | 1,39  | 1,37  | 1,29  | 1,14  |
|            |                      | 32                    | 2,25                            | 2,20  | 2,17  | 2,15  | 2,11  | 2,09  | 2,07  | 1,99  |
|            |                      | 16                    | -1,77                           | -1,77 | -1,91 | -2,07 | -2,31 | -2,49 |       |       |
|            |                      | 18                    | -1,27                           | -1,27 | -1,42 | -1,56 | -1,77 | -1,93 | -2,05 | -2,45 |
|            |                      | 20                    | -0,77                           | -0,77 | -0,92 | -1,04 | -1,23 | -1,36 | -1,47 | -1,82 |
|            |                      | 22                    | -0,25                           | -0,27 | -0,40 | -0,51 | -0,66 | -0,78 | -0,87 | -1,17 |
| 1,00       | 0,155                | 24                    | 0,27                            | 0,23  | 0,12  | 0,03  | -0,10 | -0,19 | -0,27 | -0,51 |
|            |                      | 26                    | 0,78                            | 0,73  | 0,64  | 0,57  | 0,47  | 0,40  | 0,34  | 0,14  |
|            |                      | 28                    | 1,29                            | 1,23  | 1,17  | 1,12  | 1,04  | 0,99  | 0,94  | 0,80  |
|            |                      | 30                    | 1,80                            | 1,74  | 1,70  | 1,67  | 1,62  | 1,58  | 1,55  | 1,46  |
|            |                      | 16                    | -1,18                           | -1,18 | -1,31 | -1,43 | -1,59 | -1,72 | -1,82 | -2,12 |
|            |                      | 18                    | -0,75                           | -0,75 | -0,88 | -0,98 | -1,13 | -1,24 | -1,33 | -1,59 |
|            |                      | 20                    | -0,32                           | -0,33 | -0,45 | -0,54 | -0,67 | -0,76 | -0,83 | -1,07 |
| 1,50       | 0,233                | 22                    | 0,13                            | 0,10  | 0,00  | -0,07 | -0,18 | -0,26 | -0,32 | -0,52 |
|            |                      | 24                    | 0,58                            | 0,54  | 0,46  | 0,40  | 0,31  | 0,24  | 0,19  | 0,02  |
|            |                      | 26                    | 1,03                            | 0,98  | 0,91  | 0,86  | 0,79  | 0,74  | 0,70  | 0,58  |
|            |                      | 28                    | 1,47                            | 1,42  | 1,37  | 1,34  | 1,28  | 1,24  | 1,21  | 1,12  |
|            |                      | 30                    | 1,91                            | 1,86  | 1,83  | 1,81  | 1,78  | 1,75  | 1,73  | 1,67  |
|            |                      | 12                    | -1,09                           | -1,09 | -1,19 | -1,27 | -1,39 | -1,48 | -1,55 | -1,75 |
|            |                      | 14                    | -0,75                           | -0,75 | -0,85 | -0,93 | -1,03 | -1,11 | -1,17 | -1,35 |
| 2,00       | 0,310                | 16                    | -0,41                           | -0,42 | -0,51 | -0,58 | -0,67 | -0,74 | -0,79 | -0,96 |
|            |                      | 18                    | -0,06                           | -0,09 | -0,17 | -0,22 | -0,31 | -0,47 | -0,42 | -0,56 |
|            |                      | 20                    | 0,28                            | 0,25  | 0,18  | 0,13  | 0,05  | 0,00  | -0,04 | -0,16 |
|            |                      | 22                    | 0,63                            | 0,60  | 0,54  | 0,50  | 0,44  | 0,39  | 0,36  | 0,25  |
|            |                      | 24                    | 0,99                            | 0,95  | 0,91  | 0,87  | 0,82  | 0,78  | 0,76  | 0,67  |
|            |                      | 26                    | 1,35                            | 1,31  | 1,27  | 1,24  | 1,20  | 1,18  | 1,15  | 1,08  |
|            |                      | 10                    | -0,77                           | -0,78 | -0,86 | -0,92 | -1,01 | -1,06 | -1,11 | -1,24 |
|            |                      | 12                    | -0,49                           | -0,51 | -0,58 | -0,63 | -0,71 | -0,76 | -0,80 | -0,92 |
|            |                      | 14                    | -0,21                           | -0,23 | -0,29 | -0,34 | -0,41 | -0,46 | -0,49 | -0,60 |
|            |                      | 16                    | 0,80                            | 0,06  | 0,00  | -0,04 | -0,10 | -0,15 | -0,18 | -0,27 |
|            |                      | 18                    | 0,37                            | 0,34  | 0,29  | 0,26  | 0,20  | 0,17  | 0,14  | 0,05  |
|            |                      | 20                    | 0,67                            | 0,83  | 0,59  | 0,58  | 0,52  | 0,48  | 0,43  | 0,39  |
|            |                      | 22                    | 0,97                            | 0,93  | 0,89  | 0,87  | 0,83  | 0,80  | 0,78  | 0,72  |
|            |                      | 24                    | 1,27                            | 1,23  | 1,20  | 1,18  | 1,15  | 1,13  | 1,11  | 1,06  |

Tabela 2.5 - Tabela do PMV para atividade metabólica de 1,2 met (69,6 W/m<sup>2</sup>) e umidade relativa do ar de 50%  
Fonte: ISO 7730 (1994)

Obtido o grau de desconforto térmico experimentado pelas pessoas, era necessário estabelecer uma relação entre esse índice PMV e o número de pessoas insatisfeitas com o ambiente térmico. A esse índice Fanger chamou de PPD - *Predicted Percentage of Dissatisfied* ou PPI – Percentagem de Pessoas Insatisfeitas. Lamberts e Xavier (2002, p. 18) esclarecem,

O índice PPD, estabelece a quantidade estimada de pessoas insatisfeitas térmicamente com o ambiente.

Ele se baseia na percentagem de um grande grupo de pessoas que gostariam que o ambiente estivesse mais quente ou mais frio, votando +3, +2 ou -3 e -2, na escala sétima de sensações.

Como o cálculo do índice PPD por meio da equação é muito trabalhoso, Fanger elaborou um gráfico relacionando o índice PMV com o índice PPD. Esse gráfico é mostrado na figura 2.1.

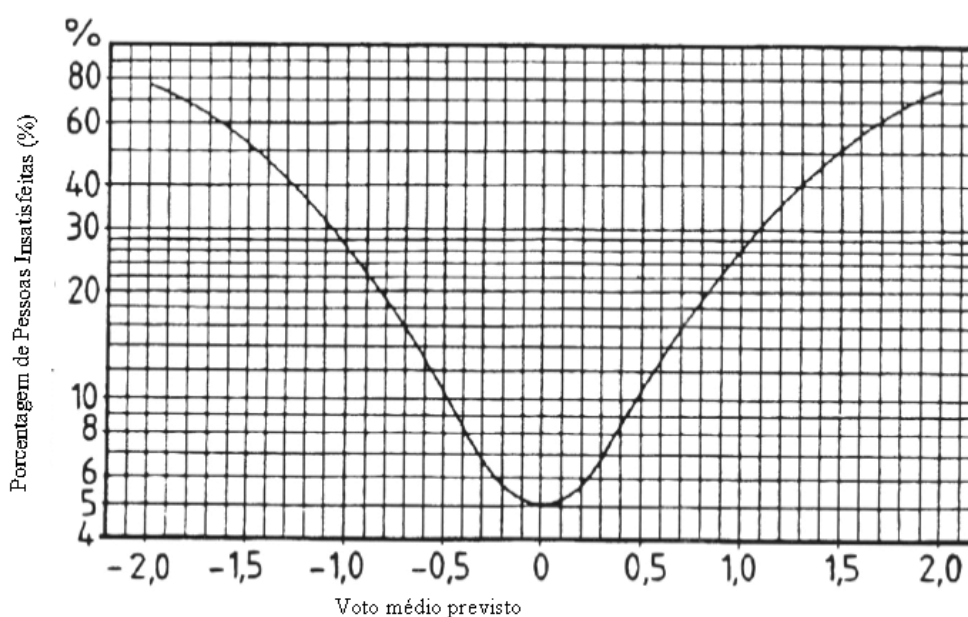


Figura 2.1 – Gráfico do PMV - Correlação entre PMV (ou VME) e PPD (ou PPI)  
Fonte: ISO 7730 (1994)

Do gráfico da figura 2.1 podemos verificar que é impossível obter um ambiente onde a combinação das variáveis de conforto satisfaça a todos. Note-se que na condição de neutralidade térmica,  $PMV = 0$ , existem 5% de insatisfeitos.

### **2.3. Desconforto localizado**

As equações de balanço térmico e o índice do PMV refletem uma satisfação com o ambiente térmico para o ser humano como um todo. Porém, muitas podem ser as situações onde o corpo humano está submetido a desconfortos localizados. A pessoa pode estar satisfeita com a temperatura do corpo como um todo, mas insatisfeita com uma determinada situação incomoda (LAMBERTS; XAVIER, 2002).

Segundo Leite (2003, p.48) são quatro os fatores mais comuns que causam o desconforto localizado, ou seja;

- a assimetria de temperatura radiante;
- as correntes de ar;
- a diferença vertical de temperatura do ar, e;
- temperatura do piso.

No caso da assimetria de temperatura radiante, a pessoa tem uma parte do corpo diferentemente atingida por radiação em relação às demais. A assimetria de temperatura radiante pode ser causada tanto por fontes localizadas de calor ou frio, tais como, janelas e paredes frias, calor de máquinas, etc., quanto à radiação solar direta, muito comum em prédios de escritórios sem persianas para bloqueio solar.

O gráfico da figura 2.2 mostra a percentagem de insatisfeitos com a assimetria da radiação.

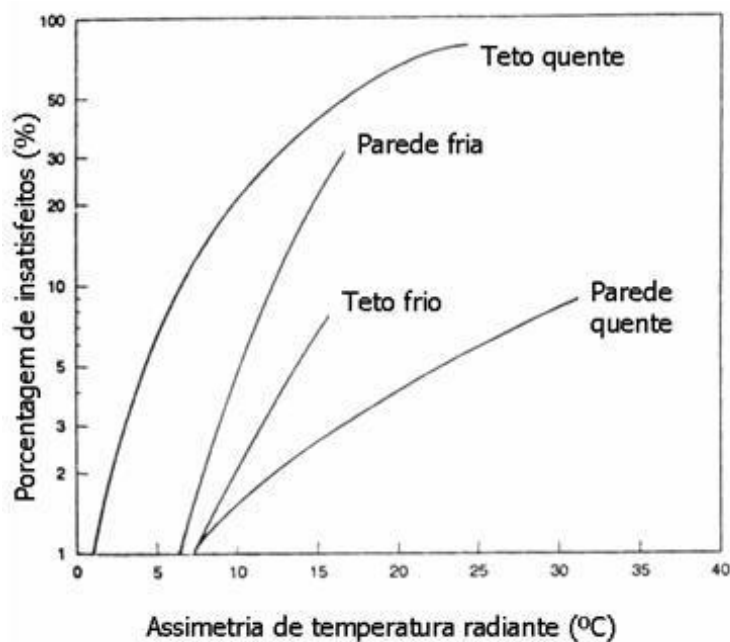


Figura 2.2 – Gráfico da percentagem de insatisfeitos com a assimetria de radiação  
Fonte: ASHRAE (1997)

Com relação às correntes de ar, figura 2.3, trata-se do resfriamento localizado causado pelo ar em movimento sobre alguma parte do corpo humano.

Lamberts e Xavier (2002, p.11) mencionam que

Essas correntes de ar tem sido identificadas como um dos fatores mais aborrecedores em escritórios. Normalmente quando isso ocorre, a reação natural das pessoas é aumentar a temperatura interna, ou parar o sistema de ventilação, sendo que às vezes essas reações podem tender a deixar o local ainda mais desconfortável.

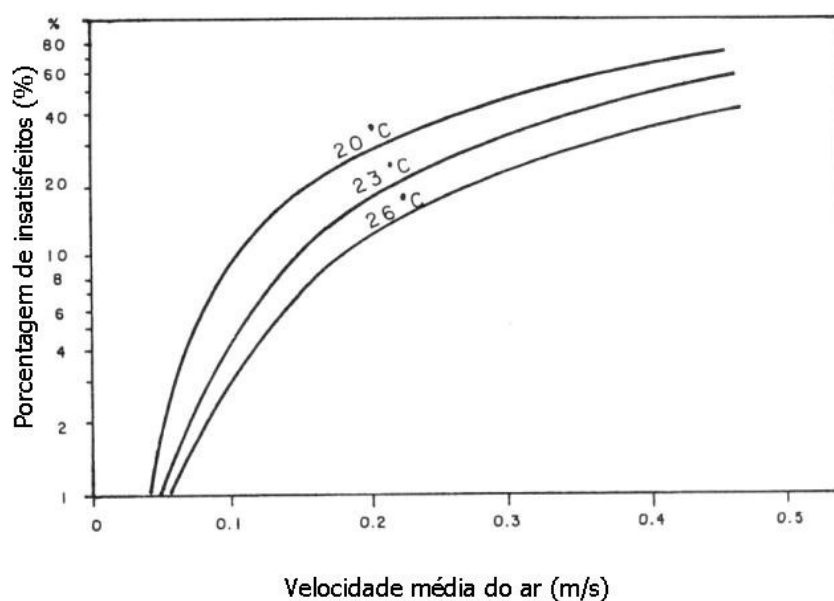


Figura 2.3 – Gráfico da percentagem de insatisfeitos com as correntes de ar, para diferentes temperaturas do ar  
Fonte: ASHRAE (1997)

Conhecida como DR (*Draught Rate*), esse movimento de ar que interfere no conforto térmico das pessoas acabou sendo mencionado na Norma ISO 7730/94, que propõe o seu limite em 15 % de insatisfeitos.

Referente à diferença vertical de temperatura do ar, mostrada na figura 2.4, se a diferença de temperatura do ar entre a cabeça e o tornozelo for suficientemente grande, ocorre desconforto por calor na altura da cabeça ou um desconforto por frio ao nível dos pés, estando o corpo como um todo em neutralidade térmica (LAMBERTS; XAVIER, 2002).

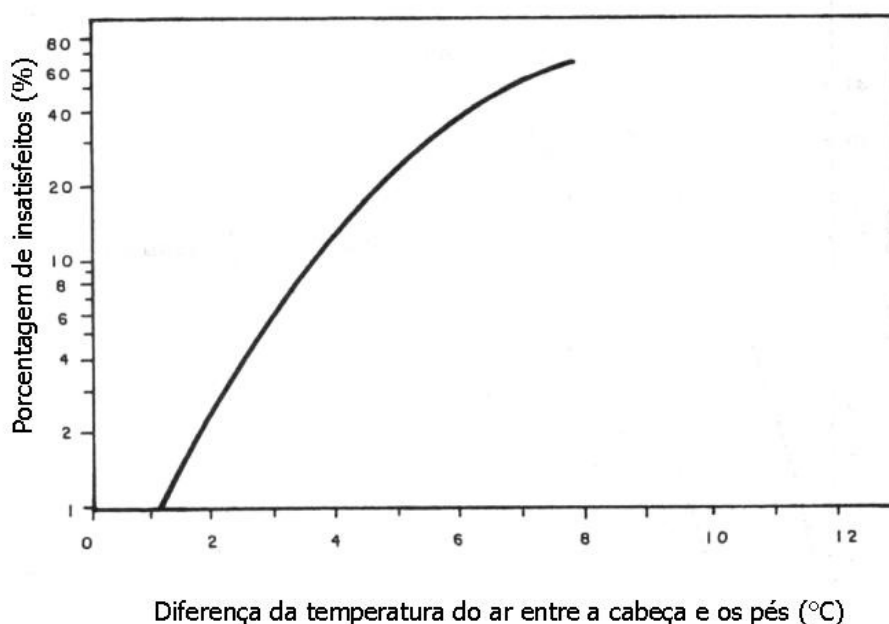


Figura 2.4 – Gráfico da percentagem de insatisfeitos com a diferença de temperatura entre a cabeça e pés.  
Fonte: ASHRAE (1997)

Finalmente, a respeito da temperatura do piso, o desconforto ocorre devido ao contato direto dos pés com o piso, mesmo calçados. A temperatura do piso é mais quente ou mais fria em função das características construtivas dos edifícios, isto é, depende dos materiais de construção empregados e de seu isolamento térmico. A figura 2.5 mostra o gráfico que relaciona temperatura de piso com o percentual de insatisfeitos.

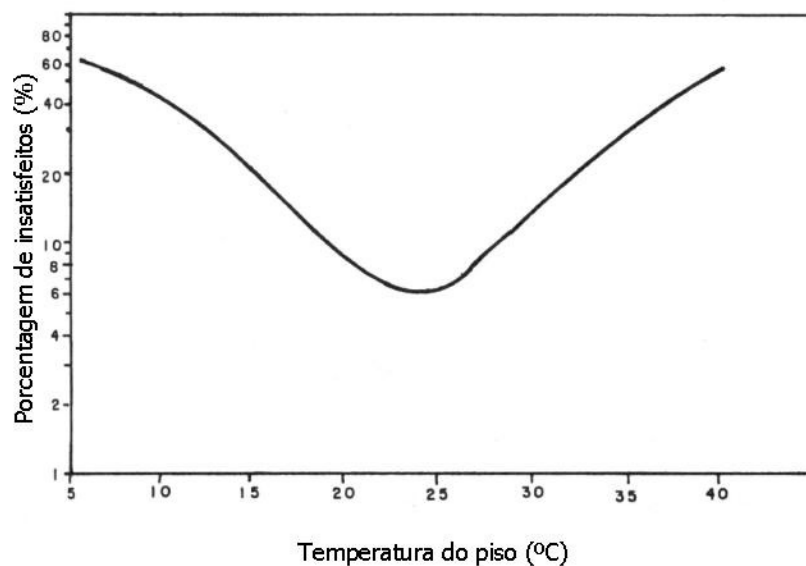


Figura 2.5 – Gráfico da percentagem de insatisfeitos devido à temperatura do piso  
Fonte: ASHRAE (1997)

## 2.4. Aceitabilidade térmica dos ambientes

Conforme visto, o ser humano pode estar insatisfeito com o conforto térmico de um ambiente devido às condições gerais de conforto relacionados aos índices PMV e PPD e/ou às condições de desconforto localizado. Até o presente momento não existe um método que combine os índices correspondentes a essas duas situações de modo que se possa obter uma estimativa precisa de pessoas insatisfeitas com o ambiente (OLESEN; PARSONS, 2002).

Com o intuito de oferecer um critério simples e combinado das duas situações, a ASHRAE 55 estabelece os seguintes parâmetros relativos à aceitabilidade térmica de ambientes (OLESEN; PARSONS, 2002):

- Máxima percentagem de insatisfeitos (PPD) = 10 %, (PMV entre -0,5 e +0,5);
- Limite máximo de insatisfação devido ao desconforto local = 10 %, e;
- Pelo menos 80 % dos ocupantes satisfeitos.

Continuando, Olesen e Parsons (2002, p. 541) fazem a seguinte consideração,

Nos edifícios, pode ser desejável estabelecer diferentes níveis de insatisfação com o ambiente térmico baseado no que é termicamente possível, o que é economicamente viável, considerações energéticas, poluição ambiental ou nível de ocupação. Por essa razão, na revisão da EN ISO 7730 (e ASHRAE 55) é sugerido especificar diferentes níveis de aceitabilidade como na CR 1752. Determinadas regiões ou contratos entre cliente e projetista podem então especificar que níveis devem ser usados.

A tabela 2.6 indica os níveis de aceitabilidade para três categorias de ambientes (A, B e C) de acordo com a CR - 1752.

| Categoria | Conforto térmico geral |                      | Desconforto Térmico Localizado<br>(% de insatisfeitos) |                                                 |                             |                                            |
|-----------|------------------------|----------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|
|           | PPD<br>%               | PMV                  | Correntes<br>de ar DR<br>%                             | Diferença vertical<br>de temperatura do<br>ar % | Temperatura<br>do piso<br>% | Assimetria da<br>temperatura<br>radiante % |
| A         | < 6                    | $-0,2 < PMV < + 0,2$ | < 15                                                   | < 3                                             | < 10                        | < 5                                        |
| B         | < 10                   | $-0,5 < PMV < + 0,5$ | < 20                                                   | < 5                                             | < 10                        | < 5                                        |
| C         | < 15                   | $-0,7 < PMV < + 0,7$ | < 25                                                   | < 10                                            | < 15                        | < 10                                       |

Tabela 2.6 – 3 categorias de conforto térmico: Percentagem de insatisfeitos devido ao conforto térmico geral e desconforto localizado

Fonte: CR - 1752 (CR, 1998) apud Olesen; Parsons, 2002

Finalmente, todos esses estudos realizados, além de ajudarem a ampliar o conhecimento sobre os mecanismos e parâmetros que levam ao conforto térmico, também tiveram como consequência o desenvolvimento de normas para projeto de equipamentos e instalações de condicionamento de ar. No âmbito dos equipamentos responsáveis pela produção das condições térmicas adequadas ao ser humano no ambiente de trabalho, muito desenvolvimento foi e vem sendo realizado. O estado da arte tem propiciado sistemas cada vez melhores e sofisticados, com diversas alternativas de implantação, buscando atender às expectativas e a satisfação do ser humano com a melhor relação custo-benefício.

### 3. SISTEMAS DE AR CONDICIONADO

A busca por conforto térmico nos diversos ambientes de convivência humana levou o Homem ao desenvolvimento científico nas mais diversas áreas de conhecimento, tais como, engenharia, arquitetura, saúde, etc.

Neste capítulo vamos discorrer somente sobre aspectos relacionados à engenharia empregada nos sistemas de ar condicionado, mais especificamente daqueles que possuem o objetivo de resfriar os ambientes de convivência, uma vez que no Brasil ainda é baixa a utilização de aquecimento para obtenção de conforto térmico. Não iremos também fazer qualquer menção sobre cálculos e critérios de projeto e implantação.

#### 3.1. Transferência de calor

Um princípio básico e fundamental para compreensão do funcionamento de um sistema de ar condicionado, seja de que tipo for, é o de transferência de calor, mostrado na figura 3.1.

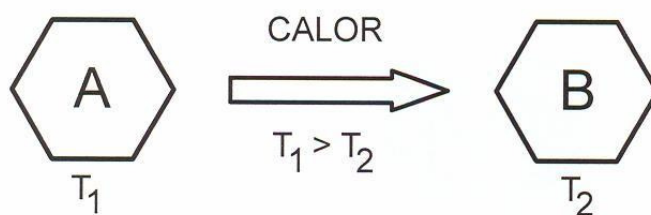


Figura 3.1 – Transferência de calor entre dois corpos.

Postos os dois corpos **A** e **B** em contato e sendo a temperatura de **A** maior que a de **B**, haverá uma transferência (ou fluxo) de energia em forma de calor do corpo **A** para o corpo **B**.

Assim, o corpo **A** cede calor ao corpo **B**, que ganha calor, e o conjunto tende ao equilíbrio térmico.

Por meio da figura 3.2 e de modo bastante simplificado, pois nos tópicos seguintes realiza-se uma explicação mais detalhada do funcionamento dos vários sistemas de produção de frio, pode-se explicar como esse conceito de transferência de calor ocorre num ambiente predial qualquer com ar condicionado.

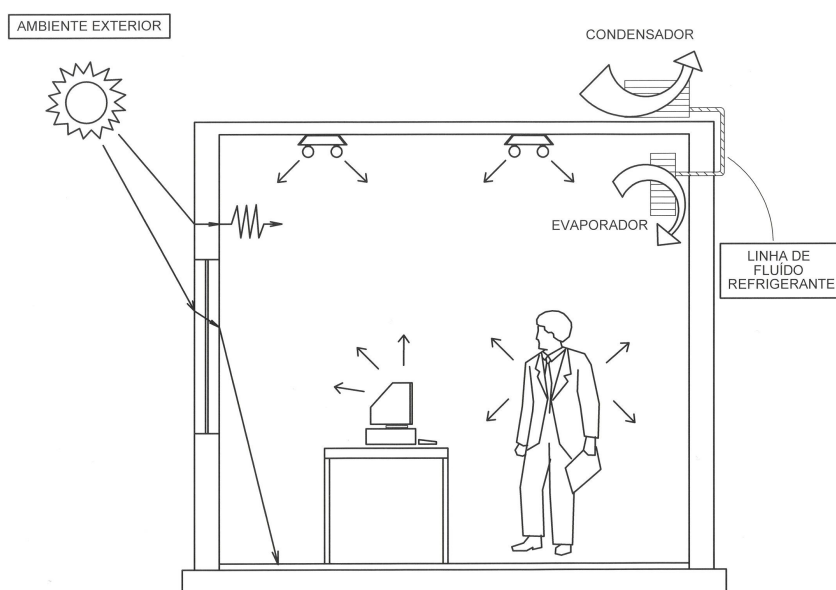


Figura 3.2 – Trocas térmicas num ambiente com ar condicionado

Dentre os diversos componentes de um sistema de ar condicionado, estão o evaporador e o condensador, que possuem a função de resfriar o ambiente interno da edificação e rejeitar esse calor interno para a atmosfera externa à edificação. Esse processo pode ser explicado conforme a seguir:

- O ar quente do ambiente, ao passar pelas aletas do evaporador cede calor ao fluido refrigerante do circuito frigorígeno, se resfria e é novamente distribuído ao restante do ambiente, de modo a manter as condições ambientais em acordo com as necessidades de conforto térmico;

- O calor retirado do ambiente interno pelo evaporador é transferido para o condensador pelo fluído refrigerante do circuito frigorígeno;

- O ar do ambiente externo (atmosfera), mais frio, ao passar pelas aletas do condensador retira calor do fluído refrigerante. Nesse caso diz-se que o calor foi rejeitado para a atmosfera.

- O processo se repete indefinidamente, enquanto durar o funcionamento do sistema de ar condicionado.

A seguir descrevemos as tecnologias dos sistemas de refrigeração e respectivos modos operativos para produção de frio.

### 3.2. Tecnologias dos sistemas de refrigeração e ar condicionado

Baseados em ciclos de refrigeração a vapor, os sistemas de refrigeração e ar condicionado dividem-se em dois grupos de tecnologias, ou seja:

- Sistemas com ciclo de refrigeração a **compressão de vapor**, e;
- Sistemas com ciclo de refrigeração a **absorção de vapor**.

Apesar dos diferentes processos empregados em cada uma dessas tecnologias, esses dois sistemas realizam a remoção de calor de um meio a resfriar da mesma forma, ou seja, por meio da evaporação (expansão) de um fluído refrigerante a baixa pressão e a rejeição do calor adquirido através da condensação (liquefação) desse mesmo fluído refrigerante a alta pressão. O processo para fazer circular o fluído refrigerante e obter essas diferenças de pressões é a principal diferença entre os dois sistemas (RAFFERTY, s.d.).

No processo de compressão a vapor, conhecido também como ciclo operado a trabalho, a energia necessária para circular o refrigerante provém de um compressor acionado

mecanicamente por um motor. Já o processo de refrigeração a absorção, chamado de ciclo operado a calor, aproveita a afinidade química entre dois fluídos e emprega o aquecimento obtido por meio de uma fonte de calor externa, por ex., queima de combustível, vapor de processo, etc., e uma pequena bomba para realizar a mesma tarefa (SBRAVATI; SILVA, s.d).

A tecnologia mais empregada em sistemas prediais de condicionamento de ar é a de compressão de vapor, devido principalmente à facilidade de acionamento do compressor por motores elétricos e aos custos de operação.

Com relação à tecnologia de absorção de vapor, apesar de largamente empregada em sistemas industriais de refrigeração de processos, sua aplicação em sistemas prediais de condicionamento de ar ainda é escassa no Brasil, principalmente devido aos preços dos insumos combustíveis quando comparados com as tarifas de energia elétrica, bem como à dificuldade de lidar com as fontes de calor e a exaustão de gases oriundos da queima desses mesmos combustíveis. Nos últimos anos, com a privatização das concessionárias de gás, a maior disponibilidade do gás natural no país e a difusão de sistemas de cogeração, tem aumentado a viabilidade de sistemas de ar condicionado prediais a absorção de vapor.

### **3.2.1. O circuito de refrigeração a compressão de vapor**

A figura 3.3 apresenta em diagrama, a composição básica de um sistema de refrigeração a compressão de vapor e seus componentes principais, ou seja, a linha de fluído refrigerante, o compressor, o condensador, a válvula de expansão e o evaporador. Evaporador e condensador são trocadores de calor clássicos tipo de placas ou tubo e carcaça (*shell&tubes*). O fluído refrigerante se move no diagrama indicado no sentido das setas pequenas.

A instalação desses componentes é feita de forma que o evaporador fique o mais próximo possível do meio a resfriar. Normalmente a válvula de expansão está instalada o mais próxima possível do evaporador. O condensador está implantado no meio para o qual se deseja rejeitar (transferir) o calor adquirido pelo fluido refrigerante. No caso do condensador, o compressor está implantado bastante próximo do mesmo.

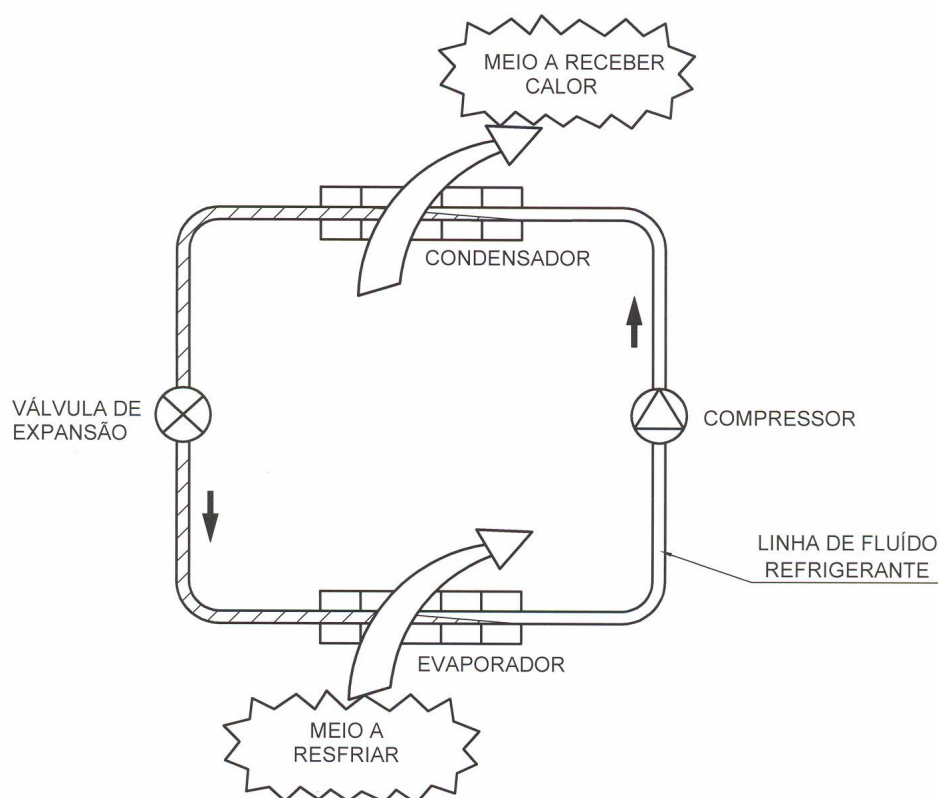


Figura 3.3 – Circuito de refrigeração a compressão de vapor

Para fins de descrição simplificada do processo de resfriamento, que ocorre num sistema de ar condicionado a compressão de vapor, vamos tomar também a figura 3.3.

Ao sair do evaporador o fluido refrigerante, em fase de vapor e em baixa pressão, é succionado e comprimido pelo compressor, aumentando sua pressão e temperatura. Ao passar pelo condensador, que está num meio mais frio, o fluido em alta temperatura rejeita (cede) calor para esse meio mais frio, se resfria e condensa (passa para a fase líquida), continuando em alta pressão. Ao passar pela válvula de expansão, o fluido refrigerante sofre uma súbita

queda de pressão, passa para a fase de vapor (se expande) e se resfria fortemente. Nessa condição, o fluido refrigerante circula pelo evaporador, retira calor desse meio mais quente em que está o evaporador e ganha calor. Ao sair do evaporador, o fluido é novamente succionado pelo compressor, repetindo-se o ciclo.

Para um sistema de ar condicionado predial, o meio a resfriar são os ambientes internos da edificação. O meio a receber calor rejeitado é normalmente a atmosfera externa à edificação.

### **3.2.2. O circuito de refrigeração de absorção de vapor**

Existente desde cerca de 1860, o sistema de refrigeração de absorção de vapor precedeu em muitos anos o sistema de refrigeração de compressão de vapor e pode ser descrito como um ciclo operado a calor, isto é, necessita de uma fonte de calor para que seu processo de refrigeração possa funcionar (SBRAVATI; SILVA, s.d).

Com o crescente emprego da energia elétrica, suas facilidades e segurança de uso, bem como o surgimento a partir da década de 1920-30 dos fluídos refrigerantes CFC, acabou por diminuir sua aplicação.

De pouco emprego em edifícios de escritórios do Brasil, devido a escassez de fontes de calor com potencial de aproveitamento, seu uso vem aumentando, seja por meio de implantação de centrais de cogeração, onde os gases quentes de exaustão podem ser reaproveitados, seja pela obtenção de calor por queima direta de combustível, principalmente gás natural, em seu interior.

O funcionamento do sistema de absorção se baseia na combinação entre duas substâncias, com temperaturas de evaporação bastante diferentes e com propriedades

especiais, de modo que uma substância absorverá (a absorvente) a outra (o refrigerante) sem interação química entre elas, formando uma solução aquosa. Posteriormente essas substâncias poderão ser separadas, conservando suas propriedades individuais, num processo de destilação por meio de calor (SBRAVATI; SILVA, s.d).

Existem vários pares de substâncias refrigerante e absorvente, porém os mais utilizados são:

- Água ( $H_2O$ ) e Brometo de Lítio ( $LiBr$ ), respectivamente como refrigerante e absorvente, e;

- Amônia ( $NH_3$ ) e água, respectivamente como refrigerante e absorvente.

A solução de Água e Brometo de Lítio é mais utilizada em sistemas de ar condicionado (temperatura do evaporador acima de  $0\text{ }^{\circ}C$ ), enquanto a solução de amônia e água é mais utilizada em sistemas frigoríficos (temperatura do evaporador abaixo de  $0\text{ }^{\circ}C$ ) (MATA, s.d.).

Para explicar o funcionamento desse sistema utiliza-se o diagrama da figura 3.4 a seguir e o par  $H_2O + LiBr$ , visto sua aplicação em sistemas de condicionamento de ar de ambientes prediais.

No gerador, a solução  $H_2O + LiBr$  que se encontra a cerca de 690 mmHg, recebe calor de uma fonte externa. Devido às diferentes temperaturas de vaporização desses dois elementos, água próxima de  $100\text{ }^{\circ}C$  e  $LiBr$  a cerca de  $1250\text{ }^{\circ}C$  na pressão de 690 mmHg ( $\sim 0,9$  atm), a água se transforma em vapor e se liberta do Brometo de Lítio num processo de destilação. O absorvente  $LiBr$  que continua em fase líquida, dita concentrada ou “rica” (rica em  $LiBr$ ) vai para o absorvedor, enquanto o refrigerante (água) entra no condensador em estado de vapor (TUMA, s.d.).

O refrigerante, ao passar pelo condensador, perde calor por meio do circuito de arrefecimento e condensa. Esse calor é rejeitado para a atmosfera.

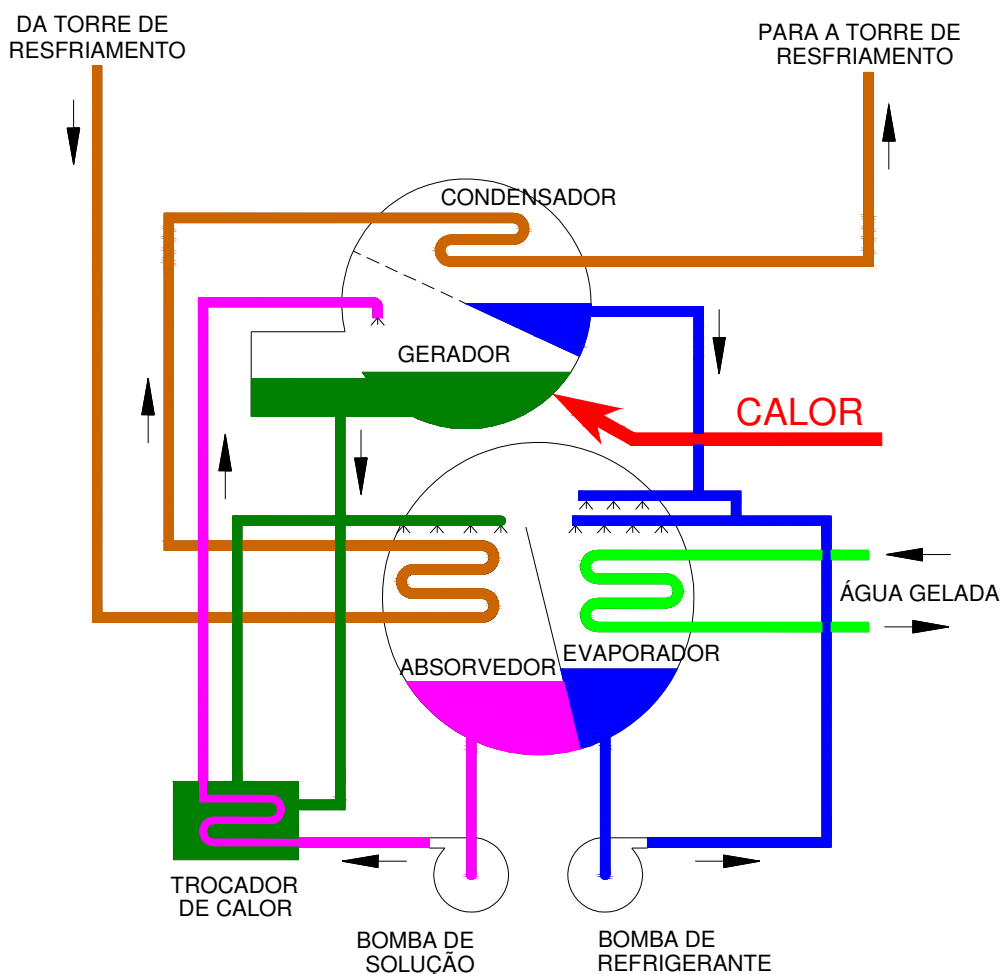


Figura 3.4 – Sistema típico de absorção de vapor  
Fonte: Rafferty, s.d.

Ao passar do condensador para o evaporador, o refrigerante sofre uma queda de pressão, de 690 para 6 mmHg, passa para a fase de vapor (se expande), se resfria para cerca de 4 °C e retira calor do circuito de água gelada dos fan-coils (TUMA, s.d.).

Ao sair do evaporador o refrigerante ainda em estado de vapor, entra no absorvedor, cuja pressão se encontra em torno de 6 mmHg, onde é absorvido pela solução rica em LiBr, altamente higroscópica, dando nome a esse sistema de refrigeração (TUMA, s.d.).

Na saída do absorvedor temos a solução de  $H_2O + LiBr$  ou a assim chamada solução fraca (fraca em LiBr). Essa solução fraca é então bombeada para o gerador e novamente o ciclo se repete (TUMA, s.d.).

A bomba de refrigerante, o trocador de calor e a serpentina do circuito de arrefecimento no interior do absorvedor visam somente melhorar a eficiência do processo. A figura 3.5 mostra uma vista externa de um chiller de absorção típico.

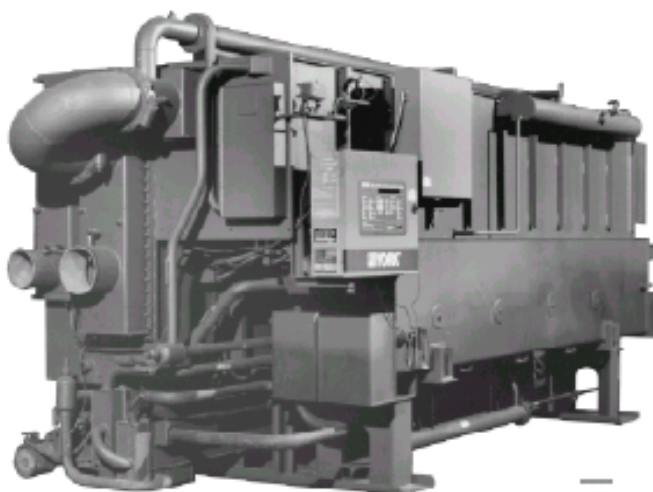


Figura 3.5 – Chiller de absorção

### **3.3. Fluídos refrigerantes**

As tecnologias citadas, isto é, refrigeração a compressão ou absorção de vapor, estão diretamente ligadas ao fluído refrigerante utilizado. Propriedades físicas, químicas e outras acabam por restringir o emprego das mais diversas substâncias em circuitos de refrigeração.

Além dessas limitações técnicas, descobriu-se em meados de 1970 que os fluídos refrigerantes utilizados em sistemas a compressão de vapor contribuíam para destruição da camada de ozônio terrestre.

Em função da capacidade de destruição ou não da camada de ozônio, é comum classificar os refrigerantes em naturais e sintéticos (YORK, 2001).

### **3.3.1. Flúidos refrigerantes naturais**

Dentre os refrigerantes naturais mais empregados em sistemas de refrigeração e ar condicionado estão a Amônia ( $\text{NH}_3$ ) e a Água ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

Um exemplo de uso da água já foi mencionado no tópico onde se descreve o funcionamento do sistema de absorção utilizando o par Água + Brometo de Lítio.

A Amônia, também conhecida como R-717, é completamente inofensiva ao meio ambiente, além de possuir grandes reservas na natureza e menor custo comparativamente aos refrigerantes sintéticos, porém é altamente tóxica e inflamável sob determinadas condições. O controle de vazamentos é muito importante, exigindo sofisticados sistemas de supervisão e controle, apesar de ser facilmente detectável devido ao seu odor (YORK, 2001).

### **3.3.2. Flúidos refrigerantes sintéticos**

Empregados nos sistemas a compressão de vapor, os refrigerantes sintéticos tiveram seu desenvolvimento a partir da década de 1920-30, transformando substancialmente a utilização de sistemas de refrigeração e ar condicionado. Os refrigerantes sintéticos podem ser classificados em CFC, HCFC e HFC (YORK, 2005).

Os CFC foram os primeiros refrigerantes sintéticos desenvolvidos e são compostos de cloro, flúor e carbono. São refrigerantes com alto ODP (*Ozone Depletion Potential*), ou seja, com grande poder de destruição da camada de ozônio, além de contribuir para o efeito estufa. Nesta categoria estão o CFC-11 (R11), CFC-12 (R12), CFC-22 (R22) e CFC-502 (R-502) (YORK, 2005).

HCFC são fluídos refrigerantes compostos de hidrogênio, cloro, flúor e carbono que em relação ao CFC afetam em menor intensidade a camada de ozônio e o efeito estufa. Considerados fluídos de efeito intermediário, exemplos desses refrigerantes são o HCFC-123 (substituto do CFC-11), HCFC-22 (R-22) e HCFC-409 (R-409) (YORK, 2005).

A última geração em gases sintéticos são os HFC, refrigerantes compostos de hidrogênio, flúor e carbono, sem cloro e que não contribuem para a diminuição da camada de ozônio. Colaboram com o efeito estufa, porém em menor intensidade se comparados com os CFC. Dentre os refrigerantes que se encontram nessa classificação estão o HFC-134a (substituto do CFC-12) e o HFC-407C, de desempenho similar ao HCFC-22. (YORK, 2005).

Devido aos efeitos nocivos à camada de ozônio os CFC e HCFC foram objeto de atenção de vários organismos internacionais, culminando com o Protocolo de Montreal, que estabeleceu para os países signatários prazos limites de produção e uso desses refrigerantes conforme tabela 3.1.

| Medidas de controle do Protocolo de Montreal |                         |                 |                           |                 |
|----------------------------------------------|-------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------|
|                                              | PAÍSES DESENVOLVIDOS    |                 | PAÍSES EM DESENVOLVIMENTO |                 |
| Substância                                   | Congelamento do consumo | Eliminação      | Congelamento do Consumo   | Eliminação      |
| Clorofluorcarbono (CFC)                      | 1 julho, 1989           | 1 janeiro, 1996 | 1 julho, 1999             | 1 janeiro, 2010 |
| Outras substancias halogenadas CFCs          | ---                     | 1 janeiro, 1996 | ---                       | 1 janeiro, 2010 |
| Hidroclorofluorcarbonos (HCFCs)              | 1 janeiro, 1996         | 1 janeiro, 2030 | 1 janeiro, 2016           | 1 janeiro, 2040 |

Tabela 3.1 – Prazos para eliminação de substâncias destruidoras da camada de ozônio

Fonte: ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica

O Protocolo de Montreal foi adotado e regulamentado no Brasil através da Resolução CONAMA 267/2000 de 14/09/2000, que determinou a proibição do uso de CFC em novos

equipamentos, produtos e instalações. A partir de 01/01/2007 está proibida a importação de CFC, exceto para casos especiais conforme definido na Resolução e, a partir de 1º de janeiro de 2010, fica proibida totalmente a comercialização de CFC.

Aparentemente as únicas alternativas ambientalmente limpas parecem ser a amônia e compostos de hidrogênio e carbono (HC), porém a amônia é tóxica e inflamável sob certas condições e os compostos de HC são altamente inflamáveis. Essas características limitam o emprego desses fluídos refrigerantes.

### **3.4. Tipos de sistemas de ar condicionado**

Os sistemas de condicionamento de ar se dividem em dois tipos: Expansão Direta e Expansão Indireta, com condensação a ar ou a água.

No sistema de expansão direta, o ar do ambiente é forçado por meio de ventiladores através do evaporador. O refrigerante contido no sistema, ao passar pelo evaporador, resfria esse ar que é, então, novamente insuflado no ambiente. Emprega a tecnologia de refrigeração de compressão de vapor e é indicado para edificações de pequeno a médio porte, tendo como vantagem a simplicidade de sua implantação.

No caso do sistema de expansão indireta, água é forçada por meio de bombas através dos tubos do evaporador. O refrigerante que passa entre os tubos do evaporador resfria essa água, que por sua vez é distribuída pela edificação até os condicionadores de ar tipo fan-coil, onde troca calor com o ar do ambiente. Indicado para ambientes de médio a grande porte, necessita de controles sofisticados para funcionar adequadamente. Pode empregar tanto a tecnologia de refrigeração de compressão de vapor quanto a de absorção.

Por sua vez, os sistemas de expansão direta e indireta podem rejeitar o calor para a atmosfera de duas formas. Quando o ar é forçado por meio de ventiladores diretamente sobre o condensador, dizemos que o sistema é do tipo condensação a ar. Quando água é empregada para essa função dizemos que o sistema é do tipo condensação a água.

### **3.4.1. Sistema de Expansão Direta**

É um sistema simples, com modo de operação tipo liga-desliga do compressor de acordo com uma faixa de temperatura pré-ajustada e se dividem mais comumente em:

- Aparelhos de janela;
- Sistema “*self-contained*” com condensação a ar ou a água;
- Sistema “*split- system*”.

#### **3.4.1.1. Aparelhos de Janela**

É o sistema mais simples existente. Possui todos os componentes do sistema de condicionamento de ar num único gabinete, especialmente construído para fixação em janelas e vãos de fachada das edificações, requer apenas um ponto de energia elétrica próximo ao aparelho. A temperatura e velocidade do ar de trabalho são reguladas diretamente pelo próprio usuário. Sua maneira de instalar, simples e direta, deixa o condensador em contato direto com a atmosfera externa, nada mais sendo necessário. As figuras 3.6(a) e (b) mostram esse aparelho.



Figura 3.6 (a) – Aparelho de janela - Vista externa  
Fonte: LG, s.d.

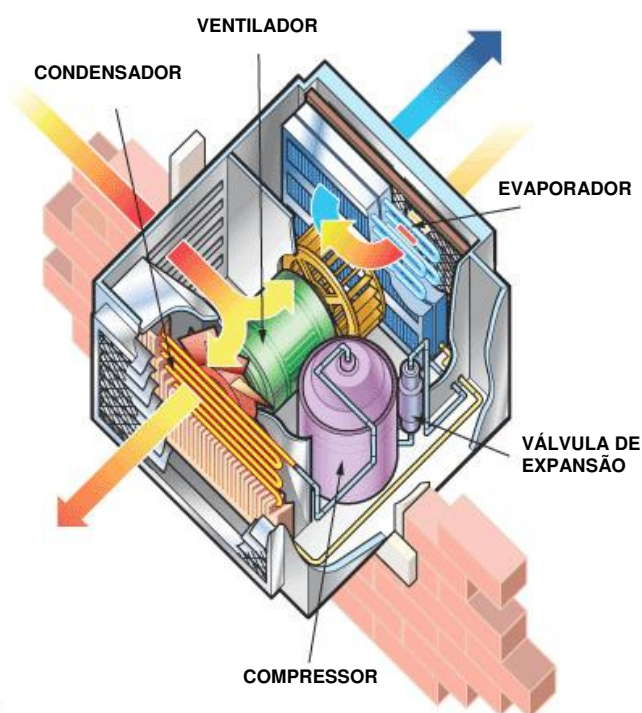


Figura 3.6 (b) – Aparelho de janela – Vista interna  
Fonte: HowStuffWorks, s.d.

De pequeno porte, sua capacidade de refrigeração varia de 5.000 a 30.000 Btu com limitada condição de distribuição de ar, sendo especialmente indicado para ambientes de pequenas dimensões.

### 3.4.1.2. Sistema Self-Contained com Condensação a Ar

Destinados a ambientes bem mais amplos que os aparelhos de janela, podem ser divididos em dois modelos:

- **gabinete único** para todos os componentes do sistema de refrigeração, conforme figuras 3.7(a) e (b), adotando-se o mesmo conceito de montagem do aparelho de janela, porém para instalação sobre piso e contra parede, sendo obrigatória a existência de abertura na fachada da edificação, de modo que seu condensador tenha contato com a atmosfera externa.



Figura 3.7 (a) - Sistema *self-contained* com condensação a ar - Vista frontal externa  
Fonte: Silva, 2004, p.100

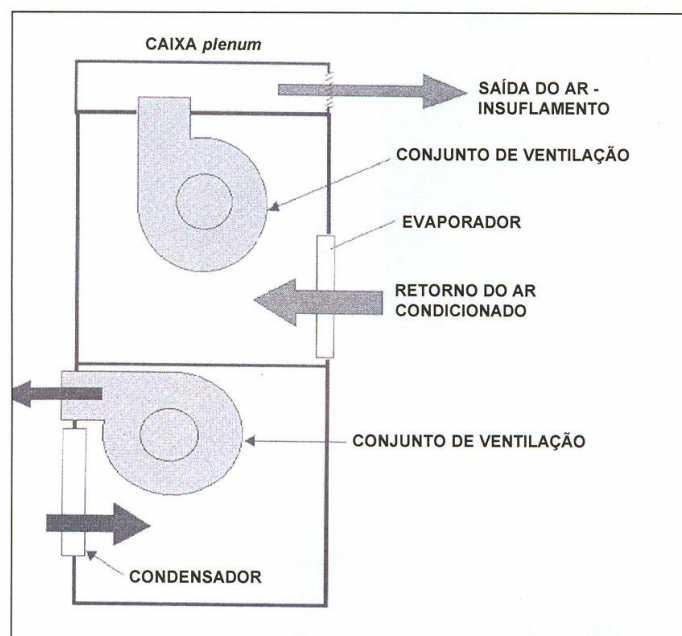


Figura 3.7 (b) - Sistema *self-contained* com condensação a ar -Vista interna simplificada  
 Fonte: Silva, 2004, p.101

- **com condensador remoto**, figura 3.8, onde o sistema é dividido em duas partes, uma, externa, no caso o condensador, que pode ser ou não montado na fachada da edificação e outra, interna, o evaporador, no recinto a condicionar, distante do condensador. A ligação entre evaporador e condensador é feita por meio de tubulação de cobre e deve possuir um comprimento máximo em acordo com o fabricante do equipamento, sob pena de perda de eficiência.

Ambos os modelos podem insuflar ar condicionado diretamente no ambiente, porém, caso necessário, também permitem a adoção de dutos de distribuição, conforme mostrado nas figuras 3.9(a) e (b).

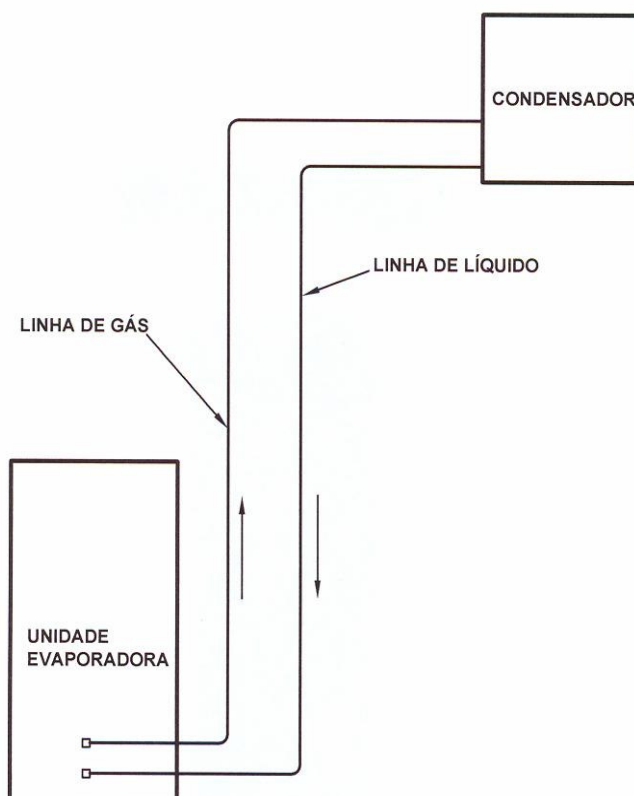


Figura 3.8 – Sistema *self-contained* com condensação a ar remota  
 Fonte: Silva, 2004, p. 104, adaptada

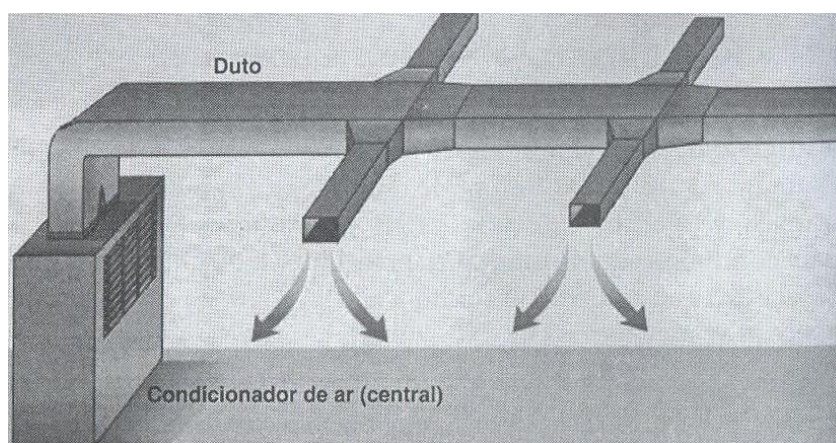


Figura 3.9 (a) – Sistema *self-contained* com condensação a ar remota – Distribuição de ar condicionado por meio de dutos  
 Fonte: Silva, 2004, p. 100

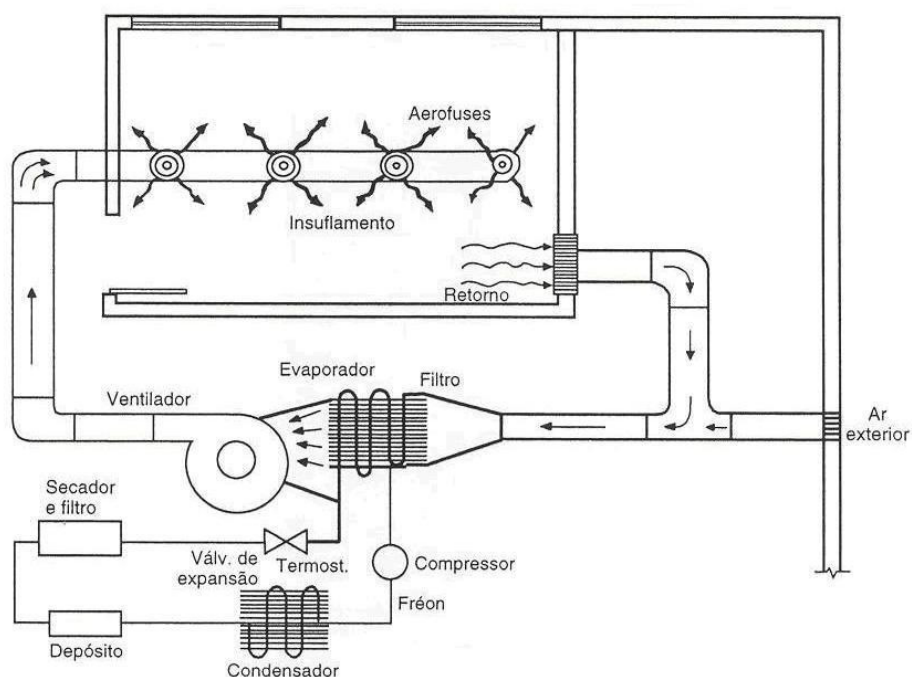


Figura 3.9 (b) - Sistema *self-contained* com condensação a ar remota – Distribuição de ar condicionado por meio de dutos com tomada de ar externo  
 Fonte: Creder, 2004, p. 82

### 3.4.1.3. Sistema Self-Contained com Condensação a Água

Nesse tipo de sistema, a água ao passar pelo condensador retira (recebe) calor do fluido refrigerante. Ao sair do condensador, essa água, em alta temperatura, é direcionada para uma torre de resfriamento, onde seu calor é rejeitado (cedido) para a atmosfera. Ao sair da torre, essa água a baixa temperatura é bombeada novamente para o condensador, repetindo-se o ciclo de troca de calor. As figuras 3.10 e 3.11 oferecem de um modo simples uma visão desse sistema.

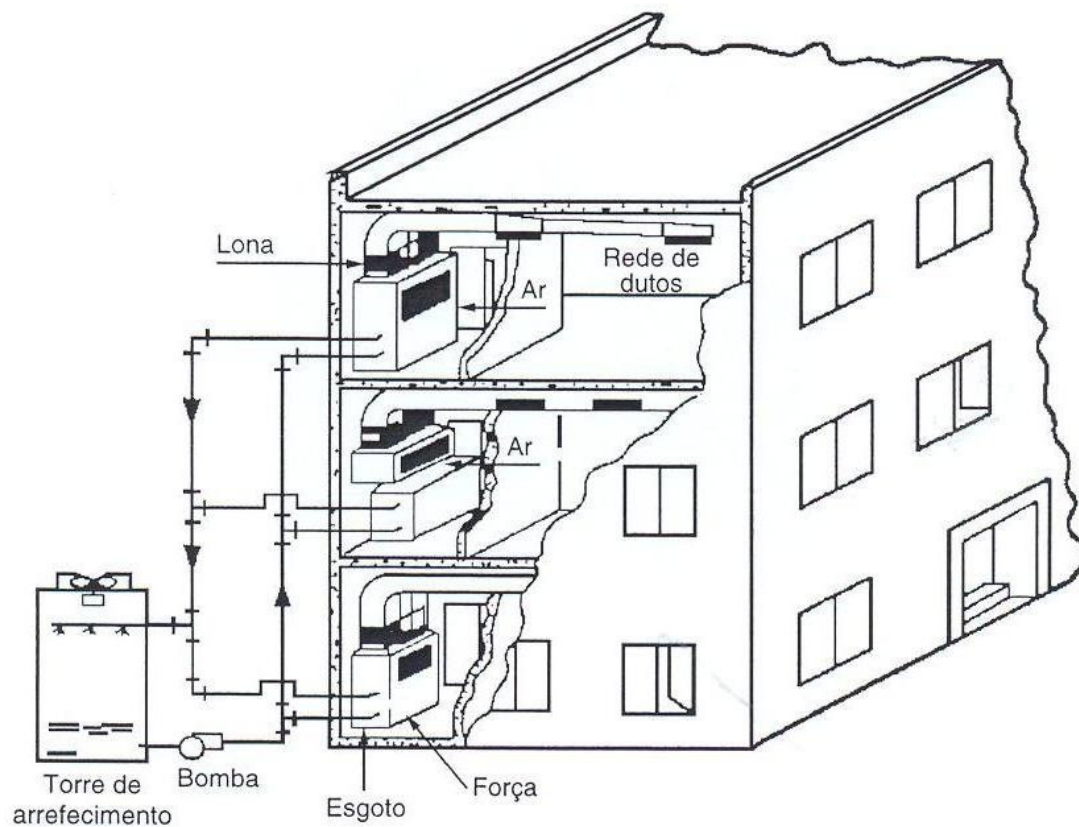


Figura 3.10 – Sistema de ar condicionado *self-contained* com condensação a água – exemplo de arranjo físico

Fonte: Creder, 2004, p. 225

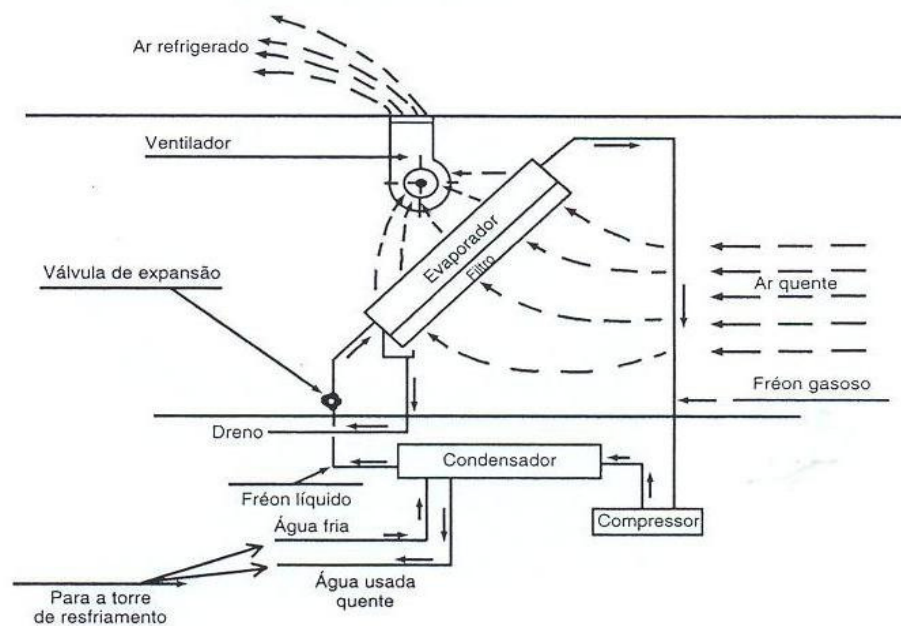


Figura 3.11 – Sistema de ar condicionado *self-contained* com condensação a água - exemplo de *fan-coil*

Fonte: Creder, 2004, p. 82

### 3.4.1.4. Sistema Split-System

Com conceito semelhante ao sistema *self-contaneid* com condensação a ar, o sistema *split-system* possui como diferença principal o fato do compressor ser montado junto ao condensador remoto, evitando ruído para o ambiente condicionado. A figura 3.12 mostra esse sistema.

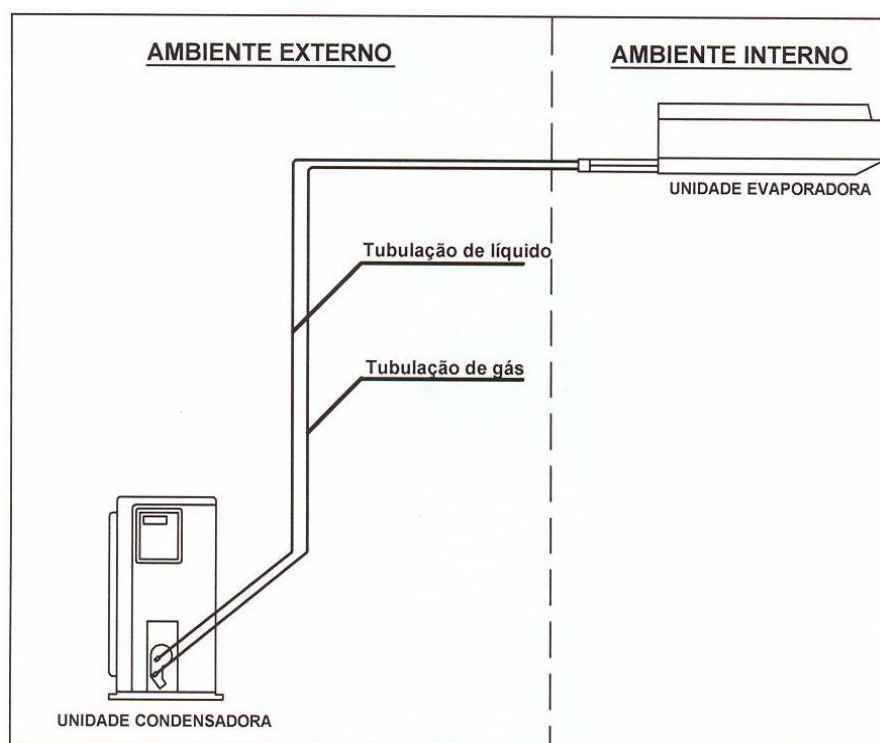


Figura 3.12 – Sistema *split system* – Arranjo físico simplificado  
Fonte: Silva, 2004, p. 112, adaptado

O dispositivo de expansão pode ser montado na unidade de condensação, de modo a evitar ruídos indesejáveis no ambiente interno.

Quando da existência de várias salas, pode-se implantar o tipo Multi-Split, que consiste num só condensador atendendo a vários evaporadores (Figura 3.13).



Figura 3.13 – Sistema *multi-split*  
Fonte: LG, s.d.

#### **3.4.1.5. Sistema de Expansão Indireta**

Mais conhecido como sistema de água gelada, possui controle muito sofisticado e se destina a grandes sistemas de condicionamento de ar, com inúmeras unidades *fan-coil*, necessitando de locais especiais para implantação de suas unidades de produção de água gelada e arrefecimento do circuito de condensação.

Quanto ao tipo de arrefecimento do circuito de condensação empregado podem ser:

- Com condensação a água, ou;
- Com condensação a ar.

##### **3.4.1.5.1. Sistema com condensação a água**

A figura 3.14 apresenta os componentes principais desse sistema. Assim temos a unidade de produção de água gelada, mais comumente conhecida como *chiller* (ou unidade

resfriadora de líquido), que pode ser uma unidade a compressão ou absorção de vapor já descritas nos tópicos 3.2.1 e 3.2.2.

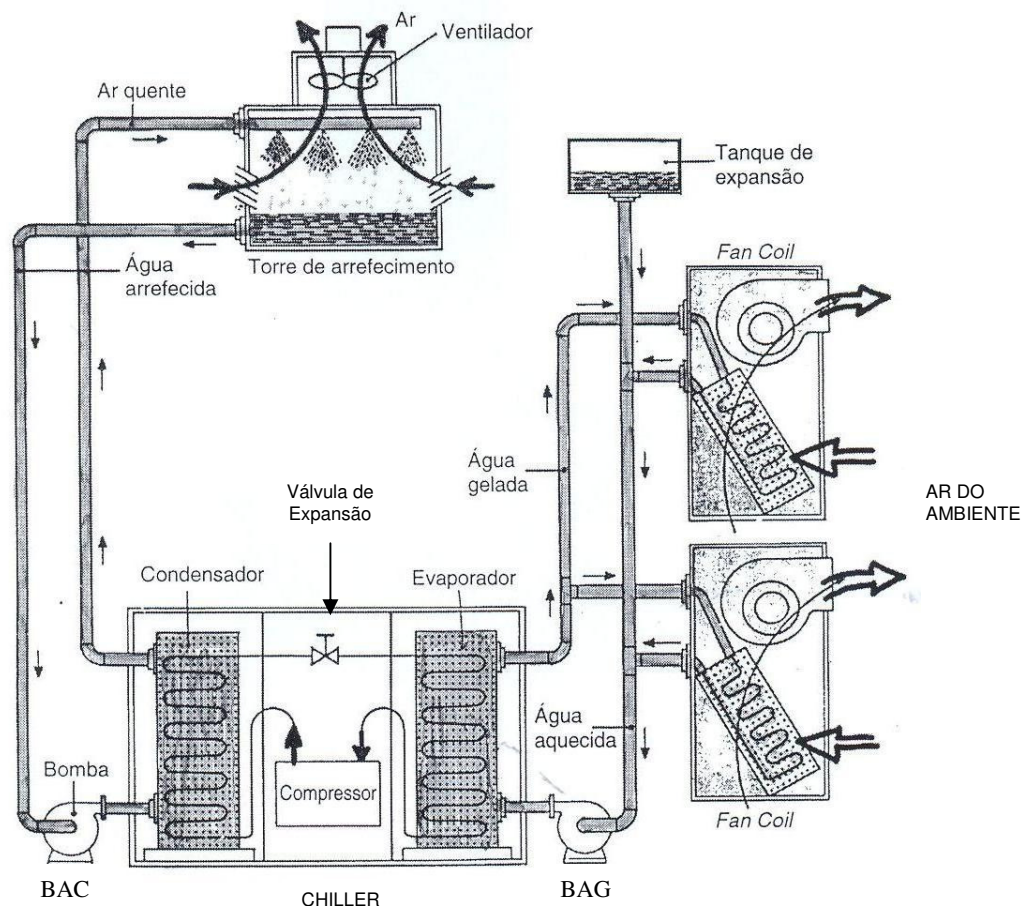


Figura 3.14 – Sistema de ar condicionado de expansão indireta de condensação a água – Principais componentes

Fonte: Silva, 2004, p. 135, adaptada

Para realizar a rejeição de calor para o ambiente externo, no lado do condensador do chiller e externamente a ele temos um trocador de calor de grande porte, a torre de arrefecimento (ou de resfriamento) de água de condensação, respectivas tubulações e bomba de circulação (chamada também de BAC, Bomba de Água de Condensação). Também externamente, no lado do evaporador, temos o circuito que realiza a troca de calor no ambiente interno da edificação, ou seja, os *fan-coils* (com suas serpentinas de evaporação no ambiente condicionado) e os equipamentos que circulam a água gelada, tubulações, bomba de

circulação de água gelada (ou BAG, Bomba de Água Gelada) e tanque de expansão. O tanque de expansão ou de reposição de água tem finalidade de somente compensar as perdas de água do sistema, evitando entrada de ar no mesmo.

#### **3.4.1.5.2. Sistema com condensação a ar**

Composto por praticamente os mesmos componentes descritos no item anterior, esse sistema difere somente em relação à torre de resfriamento, que neste caso é do tipo a ar. Devido ao seu partido construtivo, muito compacta, seu compressor é montado o mais próximo possível da torre de resfriamento a ar, normalmente na mesma estrutura. É muito comum encontrar esse sistema montado no topo das edificações. A figura 3.15 mostra um desses sistemas.



Figura 3.15 – Vista externa de um sistema de expansão indireta com condensação a ar  
Fonte: York, s.d

Apresentados os diversos tipos de sistemas de ar condicionado, percebe-se as várias configurações de sistemas possíveis de implantação. A escolha da melhor alternativa depende de inúmeros quesitos, tais como, carga térmica do ambiente a ser condicionado,

disponibilidade de área para instalação dos equipamentos, sofisticação dos dispositivos de supervisão e controle, etc. Especificamente no caso de sistemas de expansão indireta com condensação a água, objeto do estudo de caso, são inúmeras as possibilidades de implantação ou de melhoria em sistemas já existentes, com variados graus de sofisticação, permitindo ao gestor predial escolher aquelas mais convenientes em acordo com o grau de satisfação com o conforto térmico desejado.

## **4. ESTUDO DE CASO**

### **MODERNIZAÇÃO DE SISTEMA DE AR CONDICIONADO: IMPLANTAÇÃO DE MELHORIAS PARA UM EDIFÍCIO DE ESCRITÓRIOS**

Após os esclarecimentos a respeito de conforto térmico e a apresentação dos diversos sistemas e componentes de uma instalação de condicionamento de ar, neste 4º capítulo, pretende-se apresentar o estudo de caso de modernização de sistema de ar condicionado, descrevendo a implantação de melhorias e respectivos benefícios.

#### **4.1. Descrição do sistema de ar condicionado**

O sistema de ar condicionado é do tipo de expansão indireta com condensação a água, dotado de Central de Água Gelada (CAG) única para atendimento de todos os pavimentos dos edifícios.

O sistema de bombeamento de água gelada é do tipo primário-secundário, isto é, toda a água gelada produzida na Central de Água Gelada é bombeada pelas bombas primárias e distribuída aos prédios por meio de rede de tubulações denominada Anel Primário. Em cada um dos prédios existe o chamado Anel Secundário, que circula água gelada para todos os *fan-coils* daquele edifício.

O circuito primário é formado pela CAG, que é composta de bombas primárias de água gelada e de água de condensação, torre de resfriamento, tanque de expansão, *chillers* a compressão de vapor e respectiva instrumentação de supervisão e controle. O Anel Primário de distribuição de água gelada (tubulação de alimentação e de retorno) liga a CAG às casas de bombas do Anel Secundário dos edifícios. Interligando as tubulações de alimentação e retorno do Anel Primário, existe uma válvula de controle de pressão diferencial, que atua no caso da

vazão circulante no circuito primário for superior à do somatório dos circuitos secundários. A figura 4.1 mostra o diagrama dessa instalação.

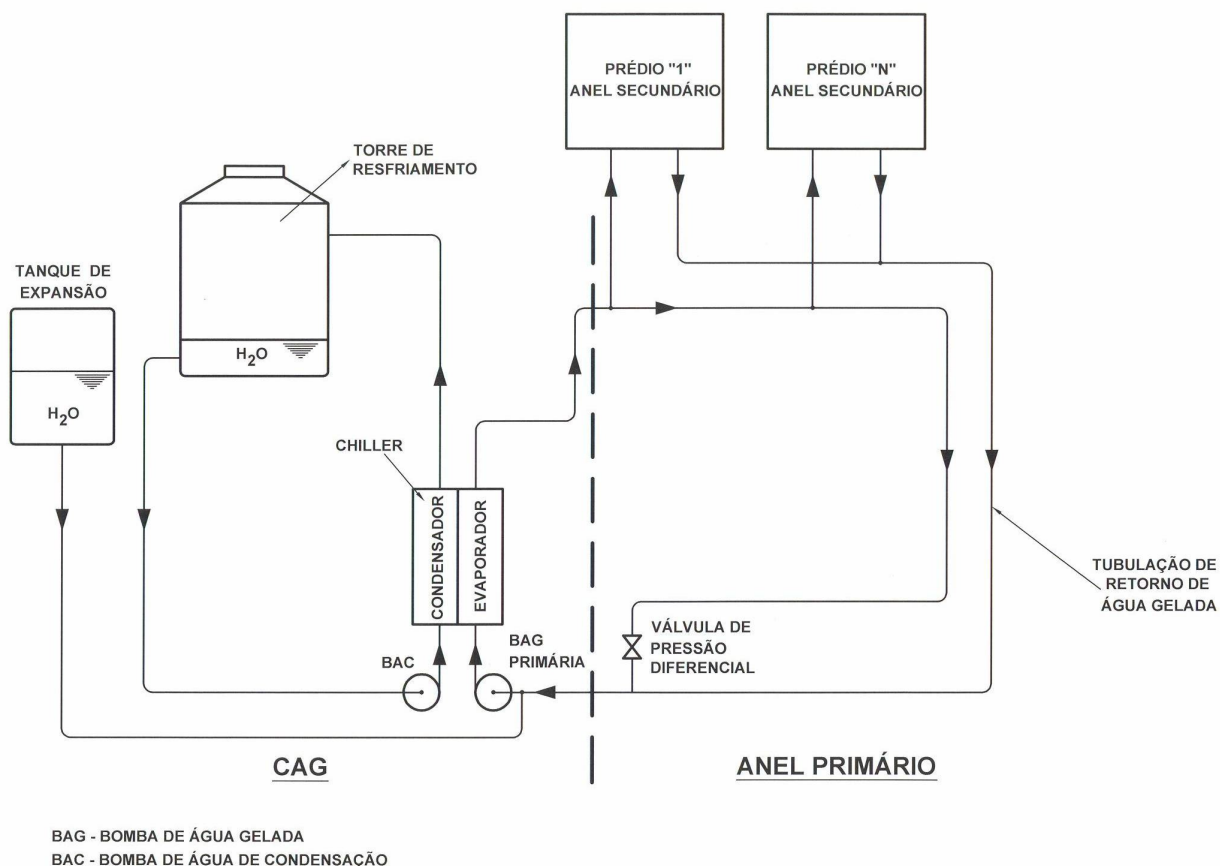


Figura 4.1 – Circuito primário de distribuição de água gelada

O Anel Secundário de cada edifício é formado por três bombas de água gelada montadas em paralelo, suas tubulações e respectiva instrumentação de supervisão e controle, que a partir da tubulação de alimentação do Anel Primário, bombeiam a água gelada para os *fan-coils*, tipo VAF (volume de ar fixo), cada um com uma válvula de 2 vias comandada por controlador/atuador proporcional. A saída de água gelada de cada *fan-coil* está conectada à tubulação de retorno de água gelada do prédio e esta à tubulação de retorno do Anel Primário. Todo o excesso de água bombeada é também dirigido à tubulação de retorno por meio da válvula de alívio de pressão controlada por meio de dispositivo de controle de pressão diferencial. O diagrama simplificado dessa instalação está mostrado na figura 4.2.

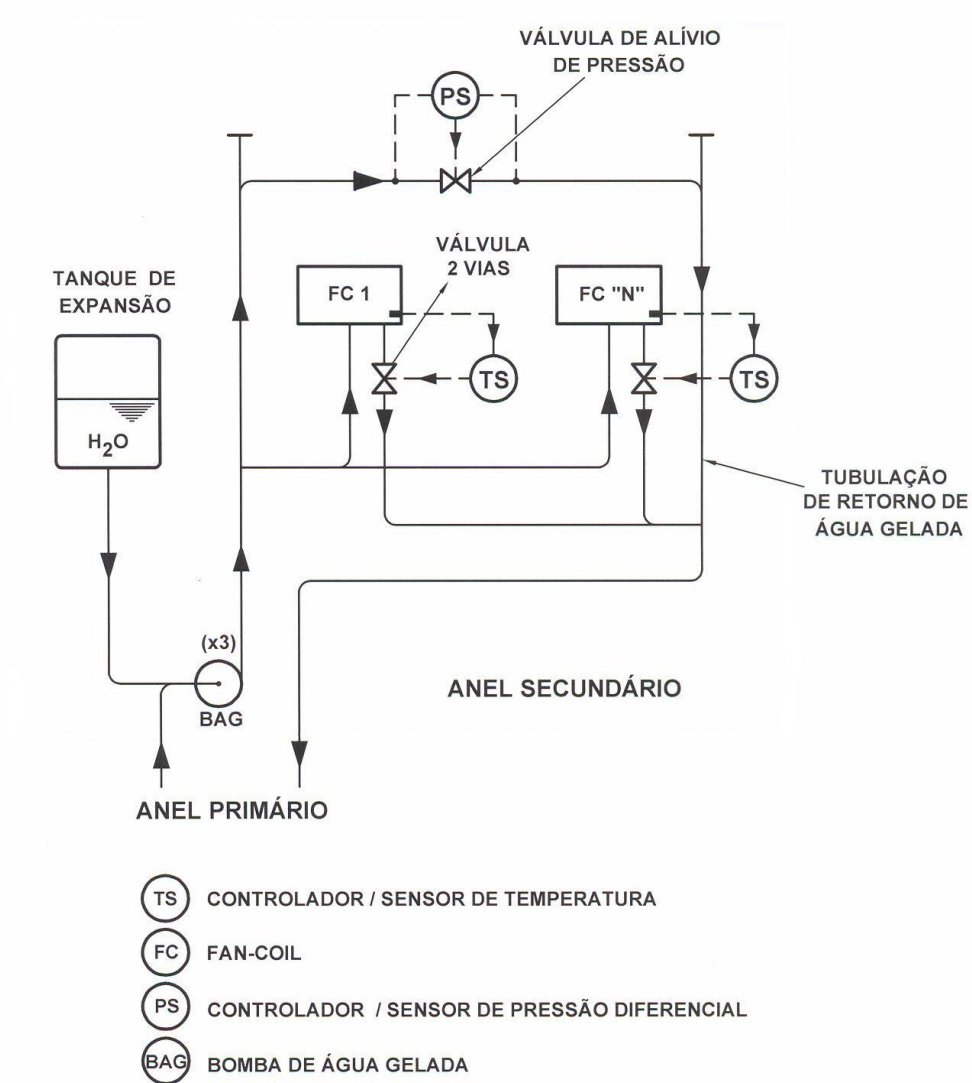


Figura 4.2 – Circuito secundário de distribuição de água gelada

## 4.2. Motivação para realização das melhorias

Com concepção avançada para a época de sua implantação, o projeto e construção do sistema existente empregou as melhores técnicas, equipamentos e os mais modernos conceitos de controle e automação. Sua instrumentação, à base de ar comprimido, contava com um moderno CLP (Controlador Lógico Programável) central, típico das mais avançadas indústrias de processo e que supervisionava e controlava todo o funcionamento do sistema.

Porém, mesmo com todos os seus equipamentos em boas condições de funcionamento e manutenção, o sistema de ar condicionado apresentava a seguinte situação:

- As máquinas centrífugas existentes operavam com baixa eficiência, pois o refrigerante das mesmas havia sido substituído (de R-500 para R-12). Além disso, a produção de refrigerante R-12 estava com seus dias contados, colocando em risco a operação dos *chillers*;
- Todo o bombeamento de água gelada e condensada era feito com motores de tensão alternada sem controle de velocidade e de vazão, formando um acionamento de baixa eficiência energética;
- Válvulas, posicionadores, atuadores, etc., de tecnologia pneumática, eficiente, porém exigindo grande atenção e grande demanda de mão de obra para sua manutenção, inclusive na prevenção de vazamentos de ar comprimido;
- Toda a automação do sistema, baseada num CLP central, apesar de conceitualmente moderna, apresentava vários inconvenientes, que prejudicavam a confiabilidade, tais como:
  - Qualquer falha nesse CLP que provocasse a indisponibilidade do mesmo, provocava a imediata paralisação de todo o sistema de ar condicionado;
  - A rede de controle de automação de campo empregava grande quantidade de fiação e eram constantes os defeitos de conexão elétrica;
  - Baixa qualidade na aquisição de dados de campo, prejudicando a emissão de relatórios de operação.
- Impossibilidade de supervisão e controle remoto dos *set-points* (pontos de ajuste) da instrumentação de controle de temperatura dos *fan-coil*.

O surgimento de tecnologias mais avançadas, seja na construção de *chillers* mais eficientes, seja de componentes eletroeletrônicos, tais como os variadores de velocidade de motores, *softwares* e *hardwares* de controle, redes de automação e controle, etc, apresentavam-se como alternativas significativas para melhoria de eficiência e confiabilidade

do sistema como um todo, incluindo aquelas relativas a conforto térmico, vistas a maior sensibilidade e possibilidade de regulação da instrumentação.

Diante dessa situação, a direção do empreendimento decidiu dar início a um planejamento de melhorias do sistema de ar condicionado que fosse possível implantar gradativamente. Basicamente tratava-se de aproveitar a oportunidade para implantar tecnologias e conceitos os mais modernos possíveis e com boa relação custo-benefício.

### **4.3. Planejamento das melhorias**

Devido à extensão do trabalho, pois se tratava tanto de propor melhorias técnicas, como de desembolsos financeiros para viabilizá-las, o planejamento foi dividido nas seguintes etapas:

- Levantamento das modernizações necessárias, baseada em levantamentos de dados históricos, riscos de operação e conforto aos usuários;
- Levantamento dos custos e prazos estimados de implantação;
- Elaboração de cronograma físico-financeiro para implantação das melhorias, levando em conta a prioridade das várias implantações, e;
- Aprovação do cronograma físico-financeiro junto à direção da empresa.

Na fase de levantamentos de dados foram desenvolvidos vários trabalhos em campo e com o sistema operando em diferentes condições, sendo os principais:

- a. Medição das condições de operação dos *chillers*:
  - ◆ Medição dos diferenciais de temperatura de água gelada (entrada/saída).
  - ◆ Medição dos diferenciais de pressão no evaporador (entrada/saída).
  - ◆ Medição das tensões e correntes dos motores.
  - ◆ Determinação da vazão circulante nos evaporadores.
- b. Medição das condições de operação das bombas de circulação de água gelada (primárias e secundárias):
  - ◆ Medição das pressões de sucção e descarga.
  - ◆ Medição das voltagens e amperagens dos motores.
  - ◆ Determinação da vazão circulante.
- c. Medição das temperaturas de alimentação e retorno de água gelada do circuito primário.
- d. Medição das temperaturas de alimentação e retorno de água gelada dos circuitos secundários.
- e. Inspeção visual da instalação.

Desse trabalho resultou a relação de melhorias da Tabela 4.1, que foram analisadas segundo a consequência de suas implantações de acordo com 4 critérios, ou seja: melhoria do conforto, menor consumo de energia, melhoria de supervisão e controle e melhoria de segurança operacional.

| Item | Especificação                                                                                                                                                             | Melhoria do conforto?       | Menor consumo de energia?                           | Melhoria da supervisão e controle?                          | Aumento da segurança operacional?                    |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 1    | Implantação de variadores de velocidade no sistema de bombeamento do anel secundário de cada edifício. Inclui itens de supervisão/controle e válvula de alívio de pressão | Sim                         | Sim<br>Diminui energia de bombeamento               | Sim                                                         | Não                                                  |
| 2    | Substituição dos <i>chillers</i> da CAG                                                                                                                                   | Não                         | Sim<br>Máquinas mais eficientes                     | Sim<br>Máquinas mais modernas e com maiores recursos        | Sim<br>Máquinas mais modernas e com maiores recursos |
| 3    | Implantação de válvulas de balanceamento hidráulico nos <i>chillers</i> da CAG                                                                                            | Não                         | Sim                                                 | Sim                                                         | Não                                                  |
| 4    | Mudança da configuração da rede de automação                                                                                                                              | Não                         | Não                                                 | Sim                                                         | Sim                                                  |
| 5    | Implantação de válvulas de balanceamento hidráulico na entrada do anel secundário de cada edifício                                                                        | Não                         | Sim<br>Diminui o excesso de bombeamento no primário | Sim<br>Com adequação das diferenças de vazões nos edifícios | Não                                                  |
| 6    | Implantação de válvulas de balanceamento hidráulico na entrada de cada andar                                                                                              | Não                         | Sim<br>Melhora a perda de carga                     | Não                                                         | Não                                                  |
| 7    | Implantação de válvulas de balanceamento hidráulico na entrada de cada <i>fan-coil</i>                                                                                    | Não                         | Sim<br>Melhora a perda de carga                     | Não                                                         | Não                                                  |
| 8    | Substituição dos sistemas de controle de temperatura dos <i>fan-coils</i>                                                                                                 | Sim                         | Não                                                 | Sim                                                         | Não                                                  |
| 9    | Implantação de rede de automação para todos os sistemas de controle de temperatura dos <i>fan-coils</i>                                                                   | Sim<br>Controle à distância | Não                                                 | Sim                                                         | Sim                                                  |
| 10   | Implantação de estação metereológica                                                                                                                                      | Não                         | Não                                                 | Sim                                                         | Não                                                  |

Tabela 4.1 – Melhorias necessárias e suas respectivas consequências

Com o resultado obtido foi então elaborado o Quadro 4.1 – Cronograma de implantação das melhorias, anualizado, segundo critérios que levavam à melhoria do conforto e maior eficiência na operação do sistema, pois cada uma das etapas deveria proporcionar um benefício tangível aos usuários e aos proprietários do empreendimento.

|                                                                                                         | Item | ANO |   |   |   |   |   |   |   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----|---|---|---|---|---|---|---|
|                                                                                                         |      | 1   | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Implantação de variadores de velocidade no sistema de bombeamento do anel secundário de cada edifício   | 1    |     |   |   |   |   |   |   |   |
| Substituição dos <i>chillers</i> da CAG                                                                 | 2    |     |   |   |   |   |   |   |   |
| Mudança da configuração da rede de automação                                                            | 4    |     |   |   |   |   |   |   |   |
| Substituição dos sistemas de controle de temperatura dos <i>fan-coils</i>                               | 8    |     |   |   |   |   |   |   |   |
| Implantação de rede de automação para todos os sistemas de controle de temperatura dos <i>fan-coils</i> | 9    |     |   |   |   |   |   |   |   |
| Implantação de estação metereológica                                                                    | 10   |     |   |   |   |   |   |   |   |
| Implantação de válvulas de balanceamento hidráulico nos chillers da CAG                                 | 3    |     |   |   |   |   |   |   |   |
| Implantação de válvulas de balanceamento hidráulico na entrada do anel secundário de cada edifício      | 5    |     |   |   |   |   |   |   |   |
| Implantação de válvulas de balanceamento hidráulico na entrada de cada andar                            | 6    |     |   |   |   |   |   |   |   |
| Implantação de válvulas de balanceamento hidráulico na entrada de cada <i>fan-coil</i>                  | 7    |     |   |   |   |   |   |   |   |

Quadro 4.1 – Cronograma de implantação das melhorias

#### 4.4. Melhorias, características e benefícios

Devido à extensão do trabalho, esta apresentação visa apenas discorrer sobre 6 das 10 melhorias identificadas, seus aspectos principais, porém sem entrar em detalhes e cálculos demasiados, somente aqueles essenciais para esclarecimento e compreensão dos temas.

#### **4.4.1. Substituição de chillers**

Com vários anos de trabalho, os *chillers* da CAG – Central de Água Gelada ainda apresentavam bom funcionamento e estado de conservação, a mudança de seu refrigerante original R-500 para R-12, realizada quando o R-500 teve sua fabricação encerrada, teve como consequência a diminuição do rendimento das máquinas. Além disso, esses chillers não conseguiam trabalhar em capacidades menores que 55% da nominal, o que limitava a utilização dos mesmos em diversas ocasiões.

Os *chillers* deveriam ser substituídos, mas antes da efetivação desse trabalho era necessário checar a capacidade do sistema de ar condicionado em atender a carga térmica existente, pois a ocupação do prédio havia mudado ao longo dos anos. Essa checagem também visava confirmar a capacidade unitária de cada *chiller* e a composição do parque de máquinas.

Além disso, a aquisição de novas máquinas oferecia a oportunidade de especificar características que levassem a maior performance, disponibilidade e manutenabilidade dos *chillers*, incluindo maior segurança operacional da Central de Água Gelada.

##### **4.4.1.1. Determinação da carga térmica atualizada e da capacidade requerida para o sistema de ar condicionado**

Com a grande automação dos escritórios e novos conceitos de distribuição de espaços de trabalho, a quantidade de pessoas e equipamentos havia aumentado ao longo dos anos. Essa situação, apesar da maior eficiência dos equipamentos de escritório, tais como, computadores, lâmpadas e reatores, levava a uma maior carga térmica no ambiente.

Tornava-se necessário, antes de qualquer substituição, verificar se as capacidades de *chillers* e bombas do sistema de ar condicionado eram suficientes para combater a carga térmica nessas novas condições. Para tanto foram feitos vários levantamentos relacionados a seguir.

#### **4.4.1.1.1. Levantamentos efetuados e dados considerados**

Na fase de levantamentos de dados foram desenvolvidos vários trabalhos em campo e com o sistema operando em diferentes condições, sendo os principais (VETOR, 2001):

- Medição das condições de operação dos *chillers*:
  - Medição dos diferenciais de temperatura de água gelada (entrada / saída).
  - Medição dos diferenciais de pressão no evaporador (entrada / saída).
  - Medição das voltagens e amperagens dos motores.
  - Determinação da vazão circulante nos evaporadores.
- Medição das condições de operação das bombas de circulação de água gelada (primárias e secundárias):
  - Medição das pressões de sucção e descarga.
  - Medição das voltagens e amperagens dos motores.
  - Determinação da vazão circulante.
- Medição das temperaturas de alimentação e retorno de água gelada do circuito primário.
- Medição das temperaturas de alimentação e retorno de água gelada dos circuitos secundários.

- Inspeção visual da instalação.

Para os cálculos efetuados foram considerados os valores atualizados do empreendimento, tais como, taxa de ocupação, área condicionada, carga térmica de equipamentos.

#### **4.4.1.1.2. Carga máxima a ser combatida**

Calculada por meio do software específico e proprietário, a máxima carga térmica a ser combatida resultou em 4.834 TR (VETOR, 2001).

Deixa-se de aqui apresentar o relatório, visto sua extensão, mais de 100 páginas, e também por não ser o objetivo da presente monografia.

#### **4.4.1.1.3. Capacidade do sistema de ar condicionado**

Para determinação da capacidade do sistema foi utilizada a equação 4.1 a seguir:

$$Q = (m.c.\Delta T)/3024 \quad (4.1)$$

Onde:

Q = Quantidade de calor, em TR;

m = massa de água gelada, em kg;

c = calor específico da água, em kcal/kg.°C ( $c_{\text{água}} = 1 \text{ kcal/kg.}^{\circ}\text{C}$ );

$\Delta T$  = Diferencial de temperatura, no *chiller* ou no *fan-coil*, em °C;

3024 = Fator de conversão de kcal para TR;

1 m<sup>3</sup> = 1.000 kg.

Dos dados levantados e aplicação da equação 1, obteve-se as capacidades da CAG – Central de água Gelada e do sistema de fan-coil, respectivamente tabelas 4.2 e 4.3 seguintes (VETOR, 2001).

| Bombas<br>Máxima Vazão de<br>Água Gelada<br>(m <sup>3</sup> /h) | Diferencial de<br>Temperatura no <i>Chiller</i><br>(°C) | <i>Chillers</i><br>Máxima Capacidade de<br>Refrigeração<br>(TR) |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 1663                                                            | 11,1                                                    | 6104                                                            |

Tabela 4.2 – Capacidade máxima da CAG

| Bombas de Distribuição<br>Máxima Vazão de<br>Água Gelada<br>(m <sup>3</sup> /h) | Diferencial de<br>Temperatura no Fan-Coil<br>(°C) | <i>Fan-Coils</i><br>Máxima Capacidade de<br>Refrigeração<br>(TR) |
|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 3130                                                                            | 5,5                                               | 6548                                                             |

Tabela 4.3 – Capacidade máxima dos *fan-coils*

#### 4.4.1.1.4. Determinação da capacidade final do sistema de ar condicionado

Comparando-se os resultados dos itens anteriores percebe-se que a capacidade do sistema de ar condicionado, Central de Água Gelada, bombeamento e *fan-coils*, eram suficientes para combater a carga térmica de 4834 TR com folga.

Diante dessa situação, decidiu-se que os novos *chillers*, deveriam manter a capacidade e composição do parque de máquinas da CAG conforme projeto original, ou seja:

- 3 *chillers* de 1500 TR cada, e;

- 2 *chillers* de 800 TR cada um.

Totalizando a capacidade instalada de 6100 TR, com folga de cerca de 1300 TR, praticamente uma máquina de 1500 TR, propiciando capacidade reserva e segurança operacional para o sistema. Nas figuras 4.3 e 4.4 pode-se ver a vista externa dos *chillers* substituídos e dos novos.

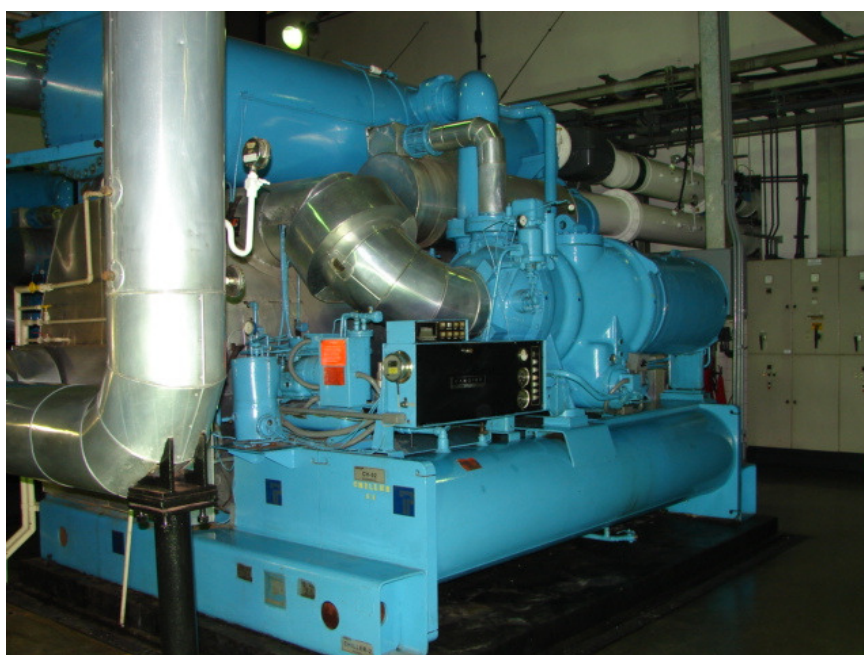


Figura 4.3 – Vista do *chiller* substituído

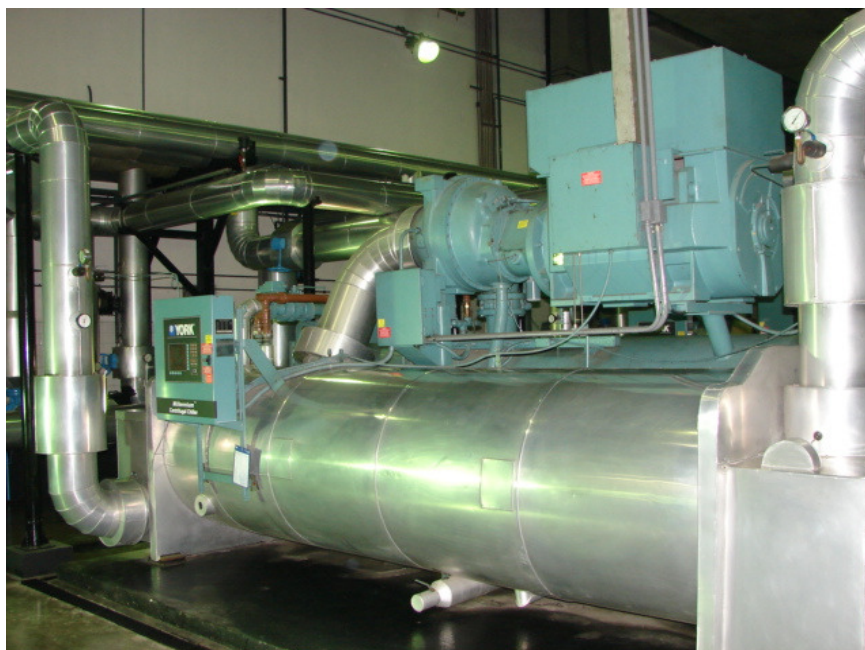


Figura 4.4 – Vista do novo *chiller*

Outro ponto importante oferecido pelos novos chillers era relativo ao seu painel de supervisão e controle, bastante sofisticado e com inúmeros recursos que possibilitavam um nível superior de automação de toda a produção de água gelada. As figuras 4.5 e 4.6 mostram esse novo painel.



Figura 4.5 – Vista frontal externa do painel de supervisão e controle dos novos *chillers*

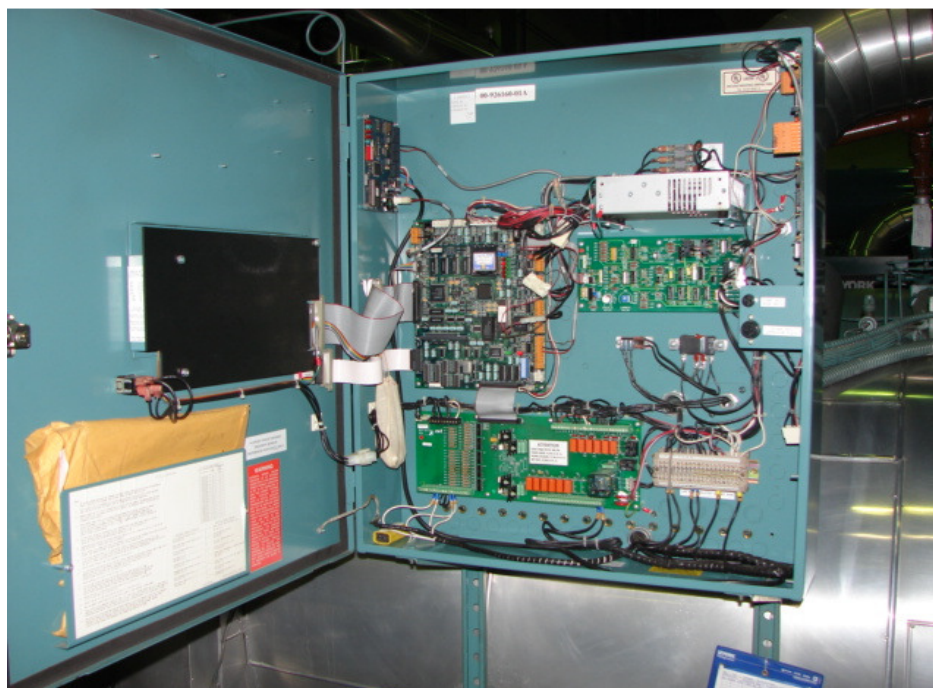


Figura 4.6 – Vista interna do painel de supervisão e controle dos novos *chillers*

#### 4.4.1.2. Eficiência

Com o intuito de checar a eficiência dos novos *chillers*, desde o início da operação dos mesmos, suas produções, em TR, bem como o respectivo consumo de energia elétrica, em kWh, vêm sendo rigorosamente registrados.

A eficiência pode ser expressa segundo 3 diferentes índices, ou seja, em Energia Elétrica Consumida por Resfriamento Produzido, EER e COP (ARI 550/590, 2003).

O índice Energia Consumida por Resfriamento Produzido, expresso em kWh/TRh é muito usado e o modo mais direto empregado. Compara a energia elétrica solicitada para uma determinada produção de frio. Quanto menor essa relação, melhor é a performance do chiller.

O índice EER (*Energy Efficiency Ratio* ou Razão de Eficiência Energética), em Btu/Watt, compara a produção de frio de um chiller com a energia elétrica solicitada. No

presente caso, devido aos montantes de produção e consumo envolvidos, utiliza-se esse índice expresso em TR/kWh. No caso deste índice, quanto maior essa relação maior é a eficiência do chiller.

Com relação ao COP (*Coefficient of Performance* ou Coeficiente de Performance ou de Desempenho) trata-se de um índice adimensional, onde a produção de frio é comparada com a energia consumida, ambas na mesma unidade de medida, em Watts. Como no índice anterior, quanto maior a relação, melhor o desempenho do chiller.

Utilizando os valores médios registrados, encontramos os índices mostrados na Tabela 4.4.

|                       | kWh/TRh | EER<br>(TR/kWh) | COP<br>(kWh/kWh) |
|-----------------------|---------|-----------------|------------------|
| Chillers substituídos | 0,87    | 1,15            | 4,05             |
| Chillers novos        | 0,67    | 1,50            | 5,28             |

Tabela 4.4 – Índices comparativos de eficiência entre chillers

Note-se a eficiência média encontrada de 0,67 kWh/TRh, valor este abaixo do especificado quando da contratação do fornecimento, que foi de 0,7 kWh/TRh na melhor faixa de operação. Nos melhores períodos de operação consegue-se 0,61 kWh/TRh.

Fazendo-se a comparação entre os índices dos *chillers* substituídos e os novos percebe-se a economia propiciada pelos novos equipamentos.

#### 4.4.1.3. Fluido refrigerante

Na aquisição de novos *chillers* era imperativo observar as restrições impostas pelo protocolo de Montreal e Resolução CONAMA nº 267/2000 aos fluidos refrigerantes com efeitos nocivos comprovados sobre a atmosfera terrestre.

Foram realizadas pesquisas com os vários fabricantes de máquinas a compressão de vapor e suas opções de fluido refrigerante, levando a escolha de máquinas que utilizassem refrigerante HCF- 134a (ou R-134a), cujo ODP (*Ozone Depletion Potencial* ou Capacidade de Destruição da Camada de Ozônio) é igual a zero, além de não possuir nenhuma restrição de produção e consumo mesmo a longo prazo.

Apesar de possuir um preço mais alto que as demais opções, o R-134a era uma excelente alternativa e oferecia pleno atendimento ao quesito de proteção ao meio ambiente requerida pelos administradores do empreendimento.

#### 4.4.1.4. Chiller aberto

Todos os *chillers* existentes eram do tipo semi-hermético, onde o motor de acionamento e o compressor são montados numa mesma carcaça. Nesse tipo de montagem o motor fica imerso no fluxo do fluido refrigerante. Ao passar pelo motor, o fluido, que se encontra em fase de gás, serve para resfriar o mesmo.

No *chiller* semi-hermético mostrado na figura 4.7, o bobinado do motor fica sujeito às características químicas do fluido refrigerante, o que pode levar a defeitos e falhas

difíceis de detectar com suficiente antecedência por métodos preventivos ou preditivos. Além disso, a queima do motor por qualquer motivo provoca a contaminação do refrigerante.

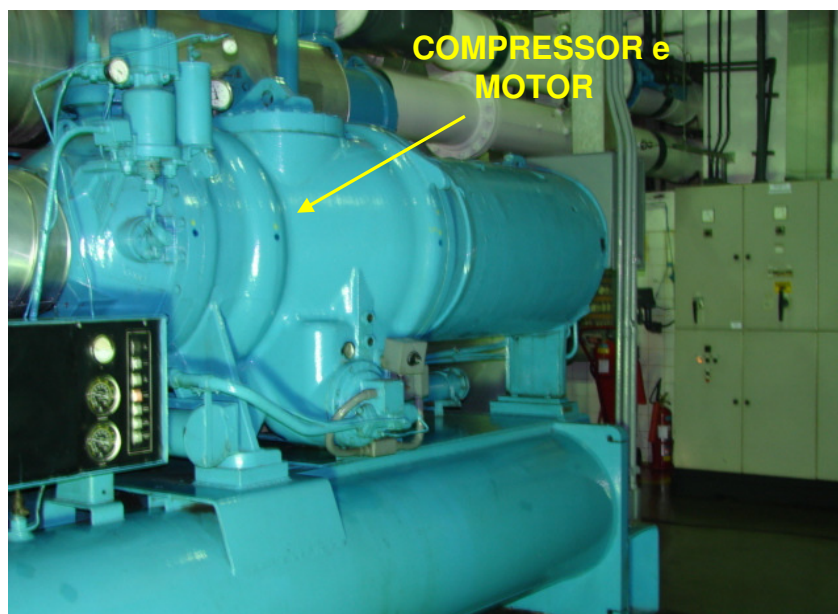


Figura 4.7 – *Chiller* semi-hermético substituído

Em geral, nesse tipo de máquina a queima do motor provoca um grande custo de reparo e de indisponibilidade, pois o rebobinamento do motor só pode ser feito a longo prazo, além de ser muito comum a perda de cerca de 40 a 50 % de todo o refrigerante devido à contaminação. Nessas ocasiões também são substituídos todos os filtros, óleo lubrificante e feita a limpeza interna. É muito comum este tipo de ocorrência deixar o *chiller* indisponível para operação por cerca de 30 a 60 dias, de acordo com seu porte.

Para evitar toda essa situação, a direção do empreendimento optou por adquirir máquinas abertas, isto é, equipamentos cujo motor de acionamento do compressor fica montado externamente e sobre a carcaça do *chiller*, completamente fora do circuito do fluído refrigerante. Sua montagem é tipicamente convencional, onde um motor, por meio de seu eixo, aciona a carga, neste caso o compressor. É uma montagem bastante semelhante a de um conjunto moto-bomba. A figura 4.8 mostra o aspecto externo final desse modelo de *chiller*.

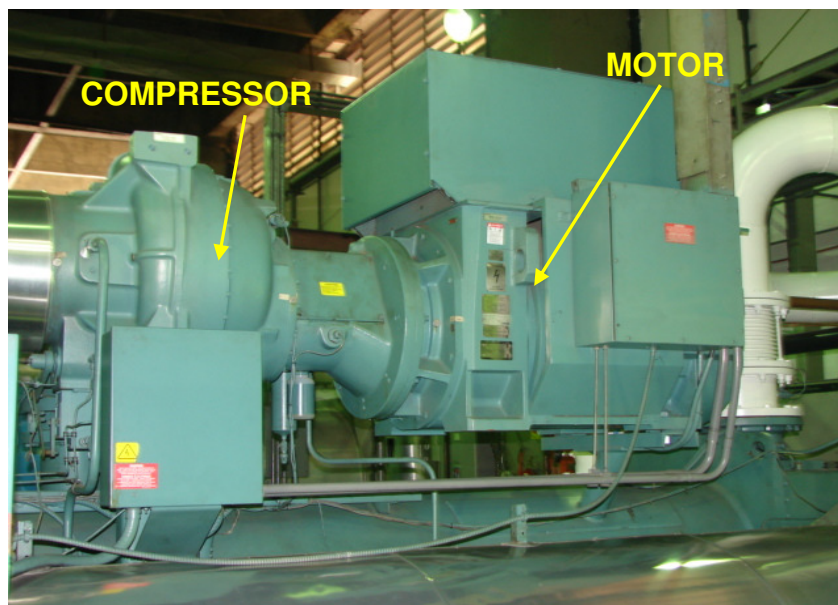


Figura 4.8 – *Chiller* aberto implantado

Com esse tipo de montagem, o *chiller* fica totalmente protegido contra os efeitos da queima do motor sobre o refrigerante, permitindo o acompanhamento por meio de manutenção preventiva e preditiva do estado do motor, elétrica e mecânicamente. Nesse tipo de máquina, devido às características de acoplamento motor-compressor, é possível também manter um motor reserva com condições de atender as diversas máquinas.

#### **4.4.1.5. *Hot Gas By Pass***

A operação eficiente de uma central de água gelada é bastante influenciada pela composição de seu parque de *chillers*. Em seu funcionamento normal durante os diversos períodos do ano e em acordo com as diferentes cargas térmicas a serem combatidas, exigem-se diferentes capacidades da central de água gelada, o que provoca a necessidade de se implantar um parque de máquinas com suficiente flexibilidade para operar com baixas ou

altas cargas térmicas. Além disso, é comum o risco de uma certa indisponibilidade de máquinas, seja devido à manutenção preventiva-preditiva, seja por correção de defeito ou falha.

Pelo exposto percebe-se a importância da composição do parque de máquinas. Se por um lado precisa-se de equipamentos que funcionem com máxima eficiência, por outro, é imperativo garantir a segurança de atendimento das necessidades operacionais nas diversas situações, mesmo com prejuízo da eficiência.

Visto ser comum o combate de pequenas cargas térmicas, principalmente nos horários noturnos e nos fins de semana, da ordem de 150 a 200 TR, era importante para a área de Operação de Utilidades do empreendimento que, na substituição dos *chillers*, fossem considerados novos equipamentos com flexibilidade para atender essas cargas.

*Chillers* de nova geração como os que iam ser adquiridos, sem qualquer componente adicional, normalmente conseguem trabalhar até o limite de cerca de 20% de sua capacidade nominal. Abaixo desses valores o equipamento desliga por motivos de segurança, de modo a preservar a máquina contra defeitos que podem danificar seu compressor e levar a perda completa do equipamento. Os valores de 150 a 200 TR estavam no limiar dessa condição, levando-se em conta que seriam adquiridas máquinas de 1500 e 800 TR de capacidade unitária.

Para conseguir superar essa limitação, foi decidido especificar a contratação de 3 máquinas, uma de 1500 TR e duas de 800 TR, com dispositivo especial que permite que os *chillers* funcionem até 10% da capacidade nominal e com segurança. Tal dispositivo é conhecido como *Hot Gas By Pass* e é mostrado na figura 4.9.

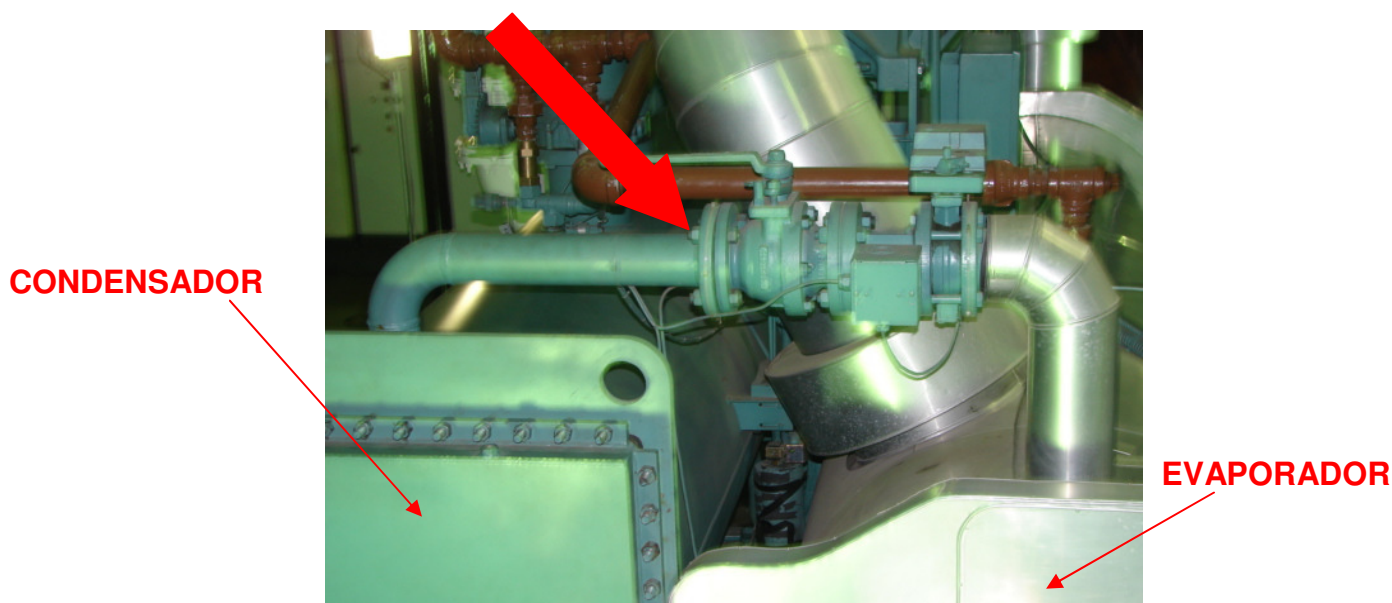


Figura 4.9 – Vista do *Hot Gas by Pass* instalado num *chiller*

Tomando-se a figura 4.9, e de modo simples, percebemos que o dispositivo *Hot Gas By Pass* permite que uma parte do calor existente no condensador seja transferido diretamente para o evaporador, de maneira a provocar uma carga fictícia nesta parte do equipamento, levando o compressor a operar até o limite de 10% já citados.

A implantação desse componente é uma excelente opção e de baixo custo, cerca de 1% do valor total da máquina, que oferece muita flexibilidade e segurança operacional para instalações de ar condicionado com muita variação de carga, situação térmica típica de empreendimentos prediais de escritórios.

#### **4.4.1.6. Caixa de ligação *Water Marine Box***

Durante o ciclo de vida de um chiller, cerca de 20 a 30 anos, milhões de litros de água circulam por seu condensador e evaporador, provocando corrosão e incrustações em suas tubulações. É impossível impedir esses efeitos e o controle e manutenção dos mesmos em

baixos níveis assume importância relevante, pois acima de determinados valores prejudica a eficiência do equipamento e pode provocar diminuição de vida útil ou perda total do chiller.

Para manutenção do controle das incrustações e corrosões, são executadas basicamente três tarefas:

- Medição da espessura dos tubos por meio de métodos de manutenção preditiva. Quando a espessura é considerada baixa devido às corrosões, preventivamente o tubo é tamponado nas suas duas extremidades, evitando danos graves para o chiller. As figuras 4.10 e 4.11 mostram uma sequência desse trabalho;
- Tratamento e supervisão contínua da qualidade da água, de modo a manter sob controle o nível de incrustação e corrosão nas tubulações do próprio *chiller* (condensador e evaporador) e nas de distribuição de água gelada e condensada;
- Limpeza dos tubos do condensador e evaporador do *chiller* segundo um plano de manutenção preventiva.



Figura 4.10 – Medição eletrônica de espessura dos tubos do condensador



Figura 4. 11 – Vista de aparelho de análise e registro de dados de medição de espessura

A limpeza dos tubos do evaporador e condensador é feita normalmente por escovação ou por meio de hidrojateamento (água pressurizada). As figuras 4.12 e 4.13 mostram uma parte desse procedimento.



Figura 4.12 – Limpeza dos tubos do condensador por meio de hidrojateamento

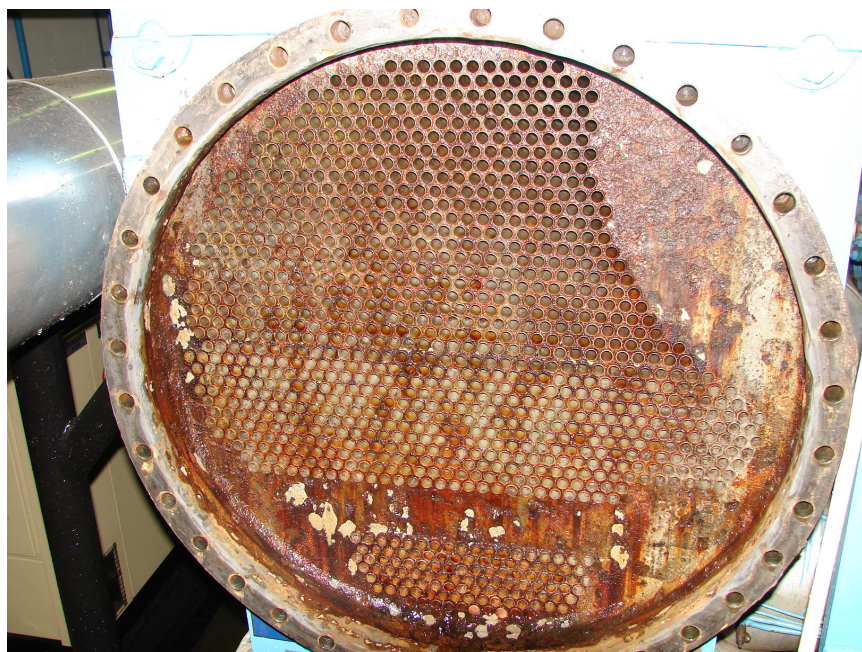


Figura 4.13 – Vista de uma das extremidades dos tubos do condensador após hidrojateamento

No evaporador a frequência de limpeza é menor do que no condensador, uma vez que a qualidade da água que circula por seus tubos é melhor do que aquela que circula nos tubos do condensador. A água que passa pelo evaporador circula em circuito fechado, menos sujeita a contaminação, ao contrário da água de condensação que circula em circuito aberto e, portanto, com maior quantidade de contaminantes.

A execução de manutenção de limpeza dos tubos do condensador e do evaporador do chiller é uma atividade que exige a desmontagem das tubulações de campo conectadas à máquina. É normal em máquinas de grande porte a desmontagem das tubulações de entrada e saída demorar cerca de 5 horas. Igual tempo é necessário para sua remontagem. Esse tempo se soma ao da execução de limpeza dos tubos e a máquina fica indisponível durante todo esse período.

Ao especificar a caixa de ligação *Water Marine Box*, mostrada na figura 4.14, para implantação em todas as máquinas a equipe de Operação de Utilidades teve como objetivo

principal eliminar a necessidade de desmontagem/remontagem das tubulações de conexão ao chiller e aumentar a manutenabilidade dos equipamentos.

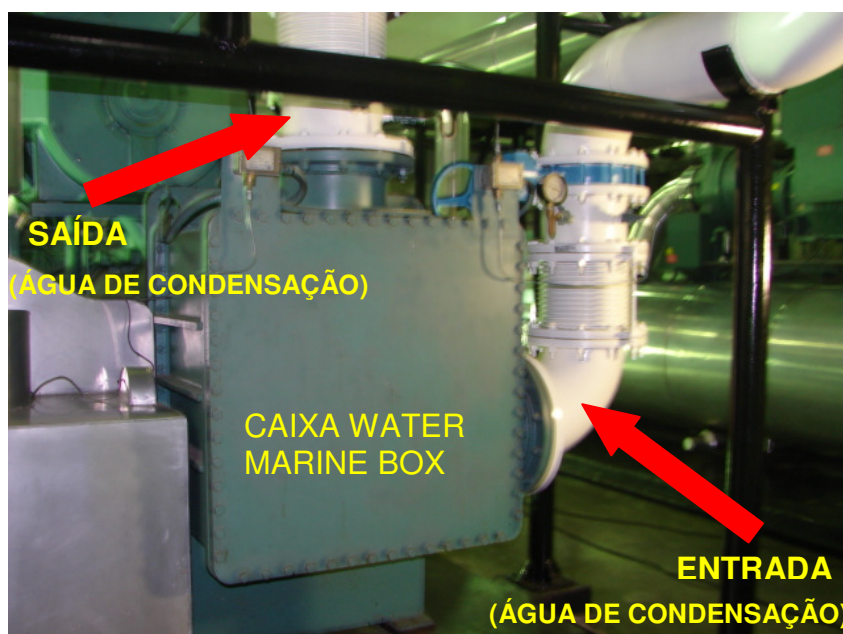


Figura 4.14 – Vista da caixa *Water Marine Box* no condensador do *chiller*

O acesso aos tubos do condensador ou evaporador do chiller fica muito facilitado. Basta soltar os parafusos e retirar a tampa. A operação é simplificada e o tempo requerido para esse trabalho de abertura ou fechamento da tampa é reduzido para cerca de 40 minutos, deixando de exigir grande preparação para os serviços de manutenção e diminuindo os riscos de acidentes com componentes muito pesados. Somente para fins de comparação, a figura 4.15 mostra um chiller sem a caixa *Water Marine Box*, onde se pode ver que o acesso aos tubos do condensador exige a desmontagem das tubulações de água de condensação e suas flanges.



Figura 4.15 - Vista de *chiller* sem caixa *Water Marine Box*

#### **4.4.2. Variadores de velocidade nos sistemas de bombeamento dos anéis secundários**

Conforme já descrito em 4.1 – Descrição do sistema de ar condicionado, toda a água gelada produzida na Central de Água Gelada é bombeada pelas bombas primárias e distribuída aos prédios por meio do Anel Primário, onde é novamente bombeada e distribuída pelo Anel Secundário. Os diagramas dessas instalações se encontram nas figuras 4.1 e 4.2 anteriores.

#### **4.4.2.1. Análise da situação nos sistemas de bombeamento dos anéis secundários**

O projeto original do sistema de bombeamento de cada edifício foi executado de modo que duas bombas fossem suficientes para combater a máxima carga térmica. A terceira bomba foi prevista somente para servir como reserva em caso de parada de qualquer uma das outras duas. A vazão requerida para combate da máxima carga térmica em cada edifício foi checada quando da análise efetuada no item 4.4.1.1 – Determinação da carga térmica atualizada e da capacidade requerida para o sistema de ar condicionado, ficando confirmada a capacidade e modo de operação do sistema de bombeamento previsto no projeto original. Nessa etapa também notamos que a vazão total de duas bombas era superior à necessária para combate à máxima carga térmica do edifício.

Da análise do histórico de operação do anel secundário notamos que na maioria das vezes, a 2ª bomba entrava em operação somente para complementar a vazão necessária para combate à carga térmica. O funcionamento simultâneo de duas bombas para combate à máxima carga térmica era pequeno. Por outro lado, em dias muito frios, quando as válvulas de duas vias ficavam bastante fechadas, uma só bomba, a plena capacidade, muitas vezes também era demais.

Nas duas situações citadas, o excesso de água gelada, pois as bombas operam sob rotação constante e vazão máxima, é dirigido à tubulação de retorno de água gelada por meio da válvula de alívio de pressão, de controle de pressão diferencial, localizada no final da linha e toda a energia empregada no bombeamento dessa parcela de água não aproveitada é desperdiçada, além do maior desgaste de equipamentos e respectivos custos de manutenção.

Da análise dessa situação, percebeu-se que o estado da arte de controle de velocidade de motores elétricos de tensão alternada permitia controlar o bombeamento de água gelada e

assim obter uma vazão proporcional em acordo com a carga térmica a ser combatida, diminuindo-se o consumo de energia elétrica. Em vista disso tomou-se a decisão de adquirir e implantar variadores eletrônicos de velocidade para os sistemas de bombeamento de água gelada dos anéis secundários de todos os edifícios.

#### **4.4.2.2. Variadores eletrônicos de velocidade**

Os variadores eletrônicos de velocidade para motores elétricos, comumente também conhecidos como inversores de frequência, passaram por grande desenvolvimento tecnológico nos últimos anos, tendo como consequência direta razoável diminuição de seu preço final. Esses dispositivos têm aplicação em sistemas onde o controle de velocidade ou de rotação é parte importante do processo, além de proporcionar razoável economia de energia (RODRIGUES; LUVIZOTTO, s.d.).

No caso de sistemas de ar condicionado de expansão indireta, a vazão de água gelada no anel secundário está diretamente relacionada à abertura e fechamento das válvulas de controle existentes em cada um dos fan-coils. Essa abertura e fechamento, proporcional à temperatura no ambiente de trabalho é bastante dinâmica e aleatória. Neste caso, percebe-se a grande vantagem da aplicação dos inversores de frequência em bombeamento de água gelada para os fan-coils, pois somente será bombeada a quantidade de água realmente necessária para combater a carga térmica existente em cada ambiente, sem desperdício de energia. Nos sistemas convencionais de bombeamento, a vazão é constante e portanto a parcela não aproveitada retorna à Central de Água Gelada sem realizar qualquer trabalho.

### a) Funcionamento

Acoplados a conjuntos moto-bombas, os inversores de frequência são equipamentos eletrônicos que visam o controle da velocidade de rotação de motores elétricos. Por meio desse controle é possível realizar a variação da vazão bombeada, de acordo com a demanda do sistema.

A figura 4.16 mostra a vista externa de um inversor de frequência.



Figura 4.16 – Inversor de frequência

O diagrama da figura 4.17 mostra os 4 módulos internos desse equipamento, que são:

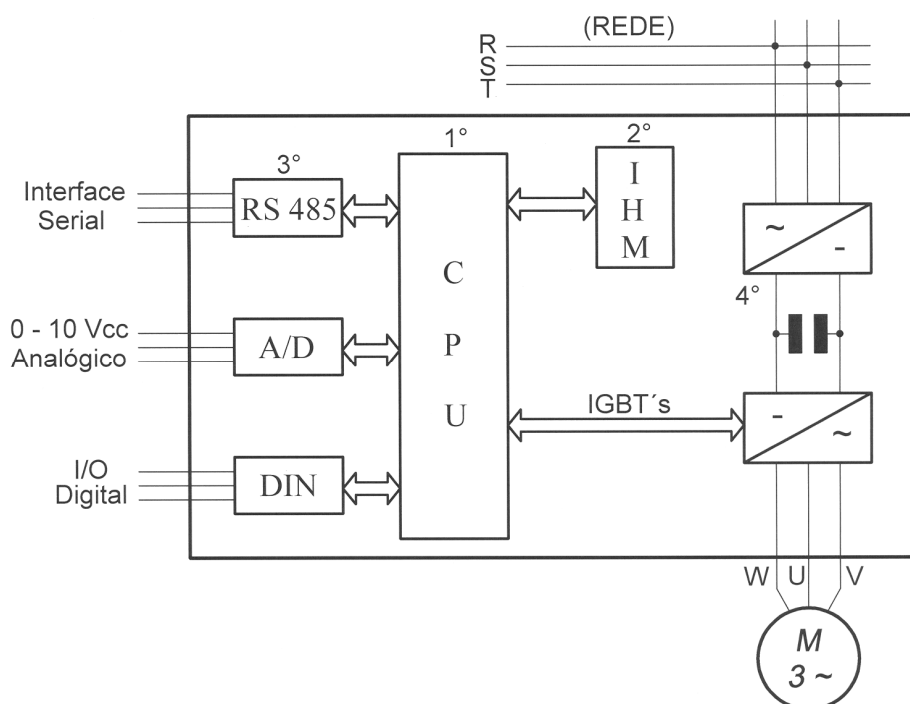


Figura 4.17 – Diagrama de blocos de um inversor de frequência  
 Fonte: Capelli apud Rodrigues; Luvizoto Jr, s.d.

- **1° Módulo - CPU (Unidade Central de Processamento) de controle:** composto de microprocessadores, processa todos os parâmetros obtidos de campo de acordo com fórmulas e procedimentos operacionais embutidos em seu programa de controle. Emite os pulsos de controle para o módulo de potência;
- **2° Módulo - IHM:** interface homem-máquina, permite verificar “in loco” os parâmetros armazenados no inversor e realizar a alteração dos mesmos, se for o caso. Permite a operação local do inversor caso o sistema de automação predial esteja desativado;
- **3° Módulo - Interfaces:** entrada de dados de instrumentação de campo, tais como medidores de pressão e vazão necessários para que o módulo de controle da velocidade do motor possa realizar o controle de velocidade de modo adequado. Possui também entradas e saídas para o sistema de automação predial, permitindo seu controle à distância.

**- 4 ° Módulo - Potência:** responsável pelo acionamento do motor elétrico, transforma a corrente alternada senoidal na frequência fixa de 60 hz da rede de alimentação, em corrente alternada não senoidal, com frequência variável controlada e com potência suficiente para acionamento do conjunto motor-bomba;

#### **b) Princípio de funcionamento**

O princípio de funcionamento de um inversor de frequência é baseado nas equações indicadas a seguir:

$$N = 60.f/p \quad (4.2)$$

$$Q_1/Q_2 = N_1/N_2 \quad \text{A vazão é diretamente proporcional à rotação} \quad (4.3)$$

$$P_1/P_2 = (N_1/N_2)^3 \quad \text{A potência absorvida varia com o cubo da rotação} \quad (4.4)$$

Onde:

$P_1$  = Potência nominal do motor, kW

$P_2$  = Potência absorvida pelo motor, na rotação “N”, kW

$N$  = Rotações por minuto do motor, RPM;

$f$  = Frequência da rede de alimentação elétrica do motor, hertz;

$p$  = Par de pólos do motor

$Q_1$  = Vazão na rotação conhecida, m<sup>3</sup>/h;

$Q_2$  = Vazão na nova rotação, m<sup>3</sup>/h;

$N_1$  = Rotação conhecida, RPM;

$N_2$  = Nova rotação, RPM;

Da equação 4.2, sendo a quantidade de pólos fixa, percebe-se que a rotação  $N$  do motor elétrico de corrente alternada varia em função da frequência  $f$  de sua rede de

alimentação, podendo assumir valores variados. Essa é a característica principal de funcionamento dos inversores de frequência, que leva ao controle de velocidade ou de rotações de uma bomba, proporcionando controle efetivo e variável sobre a capacidade de vazão do sistema.

Das equações 4.3 e 4.4, temos que a vazão  $Q$  é diretamente proporcional à rotação da bomba e a potência absorvida  $P$  pelo motor nessas condições varia com o cubo da rotação, mostrando a vantagem da aplicação de inversores de frequência em sistemas de bombeamento variável.

Devido à sua grande importância para verificação de viabilidade de implantação, para explicar o que acontece com a potência absorvida, vamos tomar o exemplo a seguir.

Seja um sistema com as seguintes características:

$$Q_1 = 220 \text{ m}^3/\text{h}, \text{ com } N_1 = 1800 \text{ RPM e } P_1 = 50 \text{ CV}$$

Qual a vazão  $Q_2$  e a potência absorvida  $P_2$  para  $N_2 = N_1/2$ ?

Da equação 4.3:

$$Q_1/Q_2 = N_1/N_2$$

$$Q_2 = Q_1 \cdot N_2/N_1 = Q_1/2 = 110 \text{ m}^3/\text{h}$$

Da equação 4.4:

$$P_1/P_2 = (N_1/N_2)^3$$

$$P_2 = P_1/(N_1/N_2)^3 = P_1/2^3 = (50/8) \text{ CV}$$

Do exemplo notamos o efeito provocado pela diminuição de rotação à metade. Enquanto a vazão cai na proporção direta da rotação, no exemplo cai pela metade, a potência absorvida da rede elétrica pelo motor cai na razão cúbica, isto é, para 1/8, demonstrando a

grande vantagem da aplicação de inversores de velocidade em sistemas de bombeamento variável.

### **c) Cuidados especiais**

Devido às suas características de funcionamento, o inversor de frequência pode provocar distúrbios tanto na rede elétrica de alimentação, como nas redes de comunicação, que podem levar a efeitos danosos sobre equipamentos e instalações. A implantação desses equipamentos supera os cuidados normais adotados para as instalações elétricas em geral.

Para eliminar os efeitos indesejados de sua implantação, em sua instalação devem ser analisados os efeitos sobre transformadores de potência, cabos elétricos e interferências eletromagnéticas. Esses efeitos podem comprometer o bom funcionamento das instalações e exigir sobredimensionamento de equipamentos, por ex. de transformadores alimentadores, cabos elétricos blindados e com cobertura isolante maior que o normal devido ao efeito Corona típico dessas instalações, bem como filtros especiais para eliminar ruídos elétricos e efeitos indesejados da corrente elétrica pulsada. (TECNAUT; BELDEN, s.d.).

### **4.4.3. Mudança da configuração da rede de automação**

Com concepção industrial, a rede de automação do Sistema de Ar Condicionado centralizava todas as informações de campo de todos os prédios num CLP central localizado na CAG, conforme mostrado na figura 4.18 seguinte.

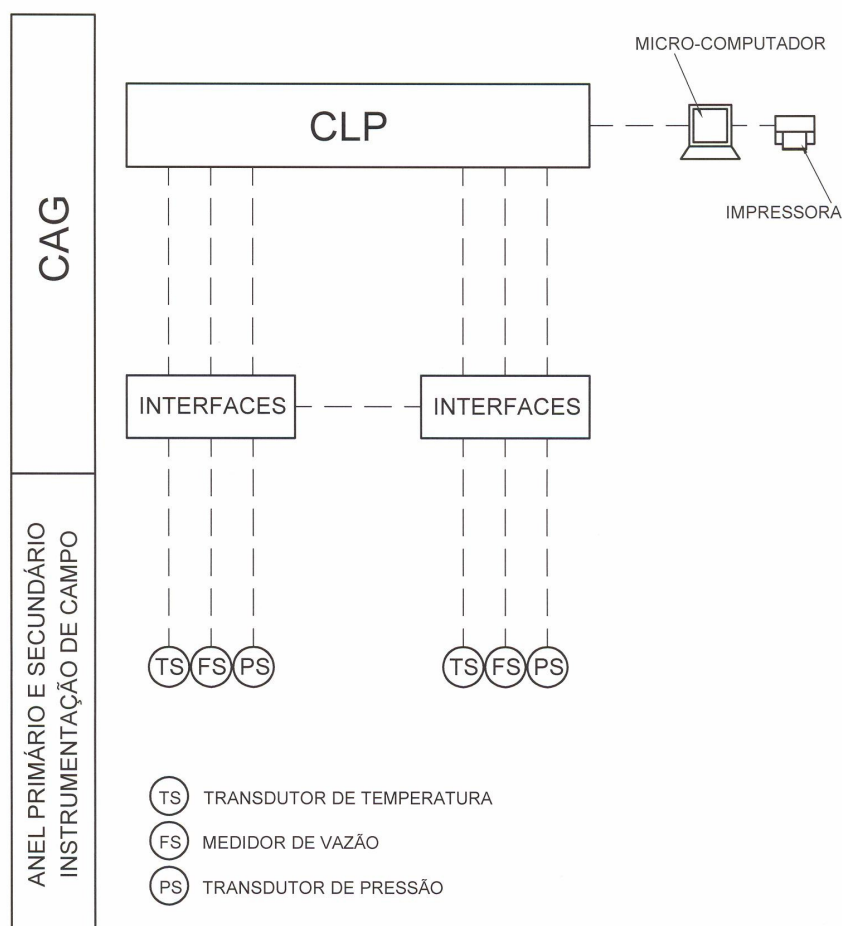


Figura 4.18 – Configuração anterior da rede de automação do Sistema de Ar Condicionado

Essa configuração, apesar de bastante robusta, não atendia aos novos padrões de confiabilidade e flexibilidade requeridos pela direção do empreendimento. Qualquer distúrbio na alimentação de energia do CLP, pane em seus módulos centrais ou necessidades específicas de manutenção, provocava a perda de supervisão e controle sobre todos os edifícios e causava grandes transtornos operacionais. Outro ponto fraco era a grande quantidade de interfaces campo-CLP, ou seja, transdutores para várias finalidades, que provocavam indisponibilidades parciais do sistema e exigiam constante manutenção. Seus relatórios, eram bastante padronizados e possuíam pouca flexibilidade de manipulação dos dados. Muitos não podiam ser vistos em tela de computador antes de sua impressão.

Outros pontos importantes, além do aumento de confiabilidade e flexibilidade requeridos, eram o quesito de expansibilidade requerido para os sistema e o atendimento ao Plano Estratégico de Automação Predial, que estabelecia a integração de todos os sistemas prediais (ar condicionado, prevenção e combate à incêndio, distribuição elétrica, etc) por meio de um sistema de gerenciamento predial.

#### 4.4.3.1. Nova configuração da rede de automação

A nova configuração da rede de automação adotou o modelo de controle distribuído conforme diagrama da figura 4.19 seguinte.

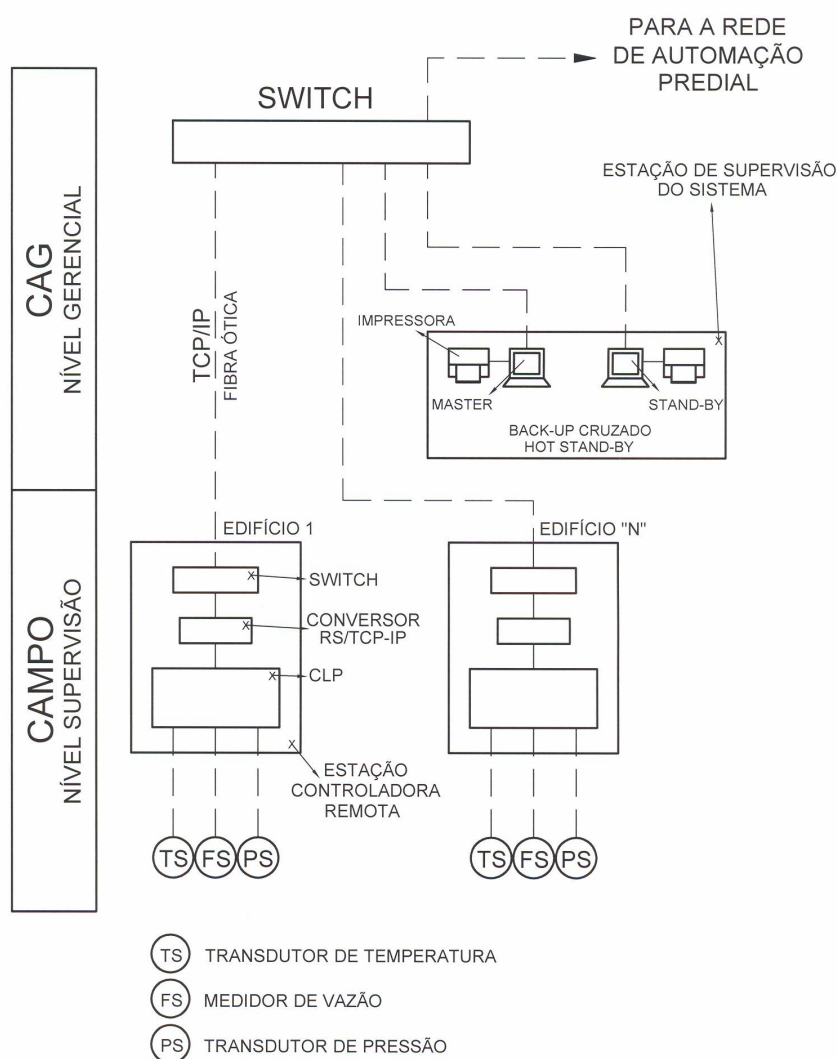


Figura 4.19 – Nova configuração da rede de automação do Sistema de Ar Condicionado

A concepção dessa configuração teve como premissa a aquisição de um sistema com arquitetura aberta que permitisse ampla escolha de componentes e fornecedores e cuja implantação fosse modular, independente em cada etapa, porém com capacidade de integração ao restante do sistema à medida de sua evolução. Essas características eram importantes, visto que se tratava da substituição de um sistema existente e a nova implantação seria feita com o sistema de ar condicionado em funcionamento. Além disso o sistema deveria ser capaz de atender modificações e expansões futuras, estando preparado para a substituição de equipamentos que viessem a se tornar obsoletos.

Por meio da figura 4.19 pode-se descrever as principais características de cada parte desse novo sistema implantado.

#### **4.4.3.2. Redes de comunicação**

A comunicação entre as estações controladoras remotas e a estação de supervisão do sistema é realizada por meio de fibra óptica com protocolo de comunicação Ethernet TCP/IP. Essa rede é conectada a *switchs*, ou seja, distribuidores de comunicação, permitindo ampliação da rede sem necessidade de interrupção do serviço, sendo que os sinais desde e até o CLP são convertidos através de um conversor de protocolo serial RS para protocolo Internet (RS/TCP-IP). Essa solução além de diminuir o cabeamento e respectivas tubulações, é imune a ruídos devidos a interferências eletromagnéticas, tornando a transmissão de dados muito confiável.

Entre a instrumentação de campo e o CLP da Estação Controladora Remota a comunicação pode ser feita por meio de redes com protocolo aberto disponíveis no mercado, como por exemplo, LonMark, BacNet, Fieldbus, Modbus, Profibus, InterBus e DeviceNet.

Outra grande vantagem dessa configuração é a grande flexibilidade de transferência da Estação de Supervisão do Sistema para qualquer local do prédio em caso de emergência.

#### **4.4.3.3. Estação controladora remota**

A Estação Controladora Remota é composta por:

- um CLP, que faz a aquisição e transmissão de dados para a instrumentação de campo;
- um conversor de sinal RS/TCP-IP, para adequada transmissão de dados do CLP para a Estação de Supervisão, e:
- um *switch*, que possibilita ampliar o sistema de automação do edifício.

Essa estação controladora faz a aquisição dos dados de entrada e saída de toda a instrumentação de campo do edifício em que está instalado, supervisionando e controlando todo o processo de ar condicionado do mesmo, de forma independente da Estação de Supervisão do Sistema, executando os programas aplicativos e enviando os comandos aos atuadores e interfaces de campo. Essa concepção *stand-alone*, na qual uma parte da inteligência do sistema fica armazenada na própria unidade, visa dotar o sistema de confiabilidade de modo a continuar a funcionar adequadamente em caso de perda de comunicação ou falha da Estação de Supervisão do Sistema. Por meio de Interfaces Homem-Máquina (IHM) locais ou da Estação de Supervisão do Sistema, é possível alterar os parâmetros do processo.

A figura 4.20 mostra a mencionada Estação Controladora Remota.



Figura 4.20 – Estação controladora remota

#### 4.4.3.4. Estação de supervisão do sistema

Utilizando plataforma Windows NT, é uma estação dual, composta de dois postos independentes de trabalho, porém com redundância *hot stand by*, onde a estação reserva (*stand-by*) pode assumir integralmente todas as funções do posto principal em caso de falha deste, permitindo ao operador, através de um conjunto de telas gráficas, supervisionar e controlar o sistema de ar condicionado como um todo. Todas as informações possuem *back-up* cruzado, isto é, os dois postos de trabalho fazem cópia de todos os arquivos entre si, permitindo que mesmo com um dos postos fora de trabalho o monitoramento do processo seja garantido.

Essa estação executa as seguintes funções principais:

- Supervisão e controle do processo pelo operador;
- Configuração, reconfiguração e documentação dos parâmetros de processo;
- Configuração da base de dados local;
- Emissão e configuração de relatórios de desempenho do processo;
- Parâmetros de aquisição de dados;
- Parâmetros de alarmes, incluindo limites e prioridades;
- Cálculos necessários à supervisão e controle do processo;
- Confecção e alteração de relatórios;
- Alteração e programação das Estações Controladoras Remotas.

Estas funções podem ser executadas de qualquer dos dois postos, concomitantemente ou não.

A figura 4.21 mostra essa estação devidamente implantada e a figura 4.22, a nova estação controladora remota de toda a CAG (Central de Água Gelada).



Figura 4.21 - Estação de Supervisão do Sistema de Ar Condicionado



Figura 4.22 - Estação Controladora Remota da CAG

As telas da Estação de Supervisão estão organizadas em uma hierarquia lógica que permite a rápida progressão para qualquer tela desejada, dentro de uma estrutura que contemple o processo, desde o seu diagrama geral até os sub-processos mais importantes, sendo possível supervisionar e controlar qualquer ponto do processo através destas telas, bem como alterar qualquer variável ou parâmetro do processo.

#### **4.4.3.5. Alimentação de energia**

A alimentação de energia elétrica para todas as estações controladoras e de supervisão é feita por redes protegidas contra interferências eletromagnéticas, arcos elétricos e disseminação de harmônicos, além de *no-breaks* com capacidade de funcionamento de 30 minutos em caso de falha da rede elétrica, de maneira que a área de operação possa tomar medidas adequadas em tempo.

Esses *no-breaks* possuem controle microprocessado, com saída RS232 para comunicação com a Estação de Supervisão, informando falhas, estado e tempo de autonomia e possibilitando a pesquisa de defeitos e falhas.

#### **4.4.4. Substituição dos sistemas de controle de temperatura nos fan-coils**

O condicionamento de ar dos ambientes de trabalho é realizado pelos *fan-coils*, distribuídos em zonas de atuação pelo andar tipo.

Esses *fan-coils*, de volume de ar constante, possuíam um circuito de supervisão e controle de temperatura do ar ambiente baseado num sistema pneumático, onde um sensor/transmissor de temperatura enviava um sinal para o transdutor T/P, que transformava proporcionalmente o sinal de temperatura em sinal de pressão, liberando ar comprimido para o atuador pneumático de controle de abertura e fechamento da válvula de água gelada, regulando assim a vazão de água gelada pela serpentina do *fan-coil*. A temperatura do ambiente somente podia ser ajustada por meio de atuação direta no transdutor T/P (temperatura para pressão). Esse sistema não permitia a supervisão e controle remotos. A figura 4.23 mostra esse sistema.

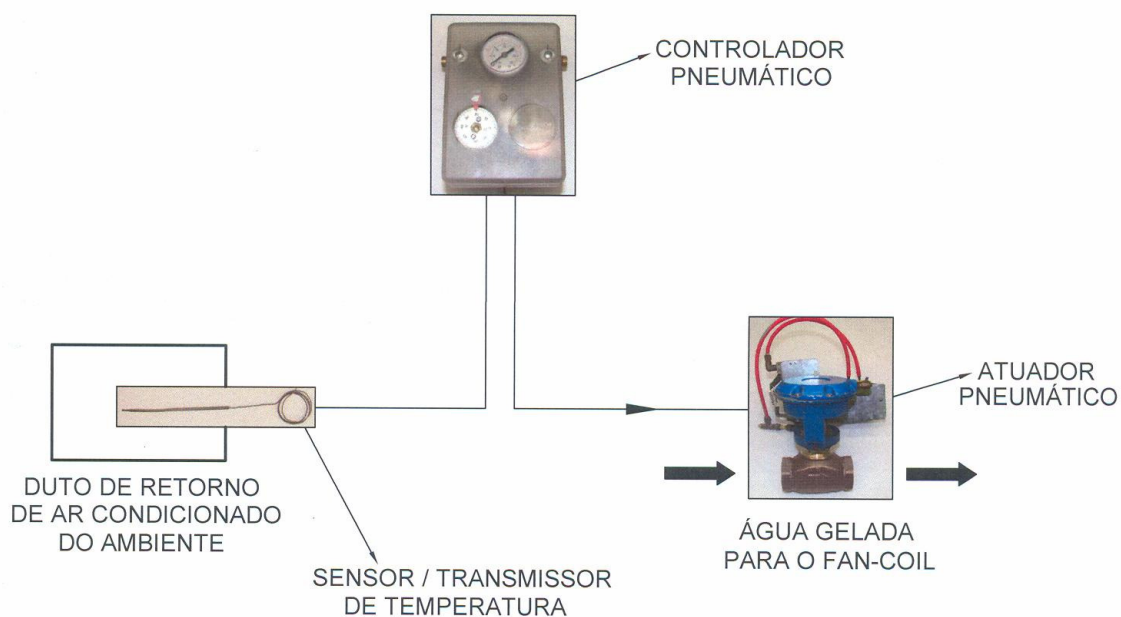


Figura 4.23 – *Fan-coil* – Componentes do circuito pneumático de controle de temperatura

Apesar de eficiente, essa tecnologia de controle pneumática já não era tão competitiva frente ao grande avanço tecnológico alcançado pelos controles eletroeletrônicos. Essa situação se manifestava nos custos de aquisição dos produtos, pois os preços dos equipamentos eletroeletrônicos chegavam a 1/3 daqueles com tecnologia pneumática, sem contar a diminuição dos custos operacionais.

Era importante substituir o sistema de supervisão e controle pneumático por outro com componentes eletroeletrônicos, o que permitiria sua futura interligação à estação de supervisão do sistema de ar condicionado e ao sistema de gerenciamento predial. Essa implantação possibilitaria atuar remotamente sobre os *set-points* de controle de temperatura, realizar aquisição de dados de campo, emissão de relatórios operacionais e a análise da satisfação com o conforto térmico dos ambientes, o que levaria a gestão da satisfação com o ar condicionado a um patamar mais elevado.

Esse novo sistema, mostrado na figura 4.24 a seguir, encontra-se em sua fase final de implantação e funciona de modo similar ao sistema pneumático, somente mudam os componentes.

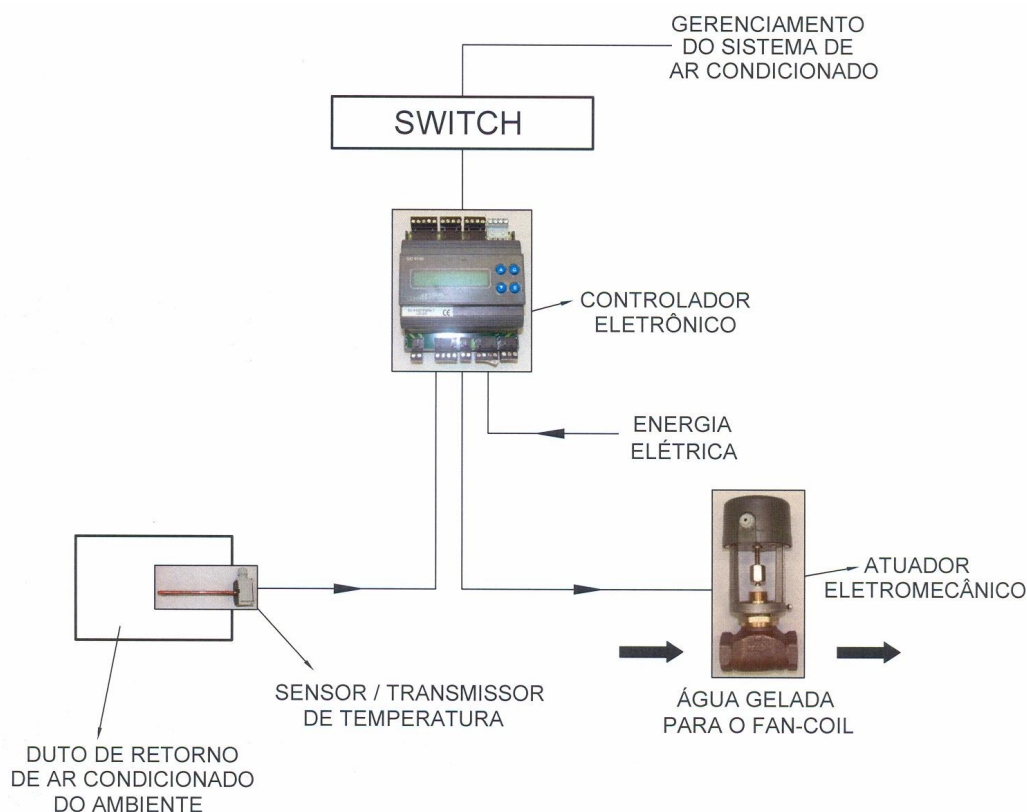


Figura 4.24 – Fan-coil – Novo circuito eletromecânico de supervisão e controle de temperatura

A temperatura do ambiente pode ser ajustada localmente na unidade controladora. Com essa temperatura ajustada, o sensor/transmissor envia um sinal elétrico à unidade controladora que, por sua vez, envia um sinal, também elétrico, para o atuador eletromecânico, que abre ou fecha a válvula de água gelada, controlando a temperatura no ambiente de trabalho. Todo esse processo, no futuro, poderá ser monitorado e controlado à distância por meio da rede de comunicação interligada à estação de supervisão do sistema de ar condicionado.

#### 4.4.5. Estação metereológica

As condições climáticas eram acompanhadas pela equipe de operação de ar condicionado com intuito de analisar a performance do sistema. Esse trabalho era feito diariamente e de hora em hora, porém de modo bastante rudimentar por meio de um termohigrômetro portátil. Além de bastante imprecisas, essas medições ocupavam bastante tempo do pessoal envolvido.

Esse trabalho poderia ser automatizado, melhorando a coleta e confiabilidade dos dados, atingindo-se um patamar mais alto da gestão de operação dos sistema de ar condicionado. Com essa estação seria possível montar um banco de dados confiável, cujos informes poderiam ser cruzados com as condições de ocupação do empreendimento e com a performance do sistema de ar condicionado, de modo a buscar definir critérios de operação baseados em métodos mais científicos e baseados em medições confiáveis.

Para tanto foi adquirida uma estação metereológica composta de radiômetro, sensor de temperatura, sensor de umidade relativa, pluviômetro, indicador de direção e velocidade do vento e unidade transmissora de sinais. A figura 4.25 mostra uma foto dessa estação.

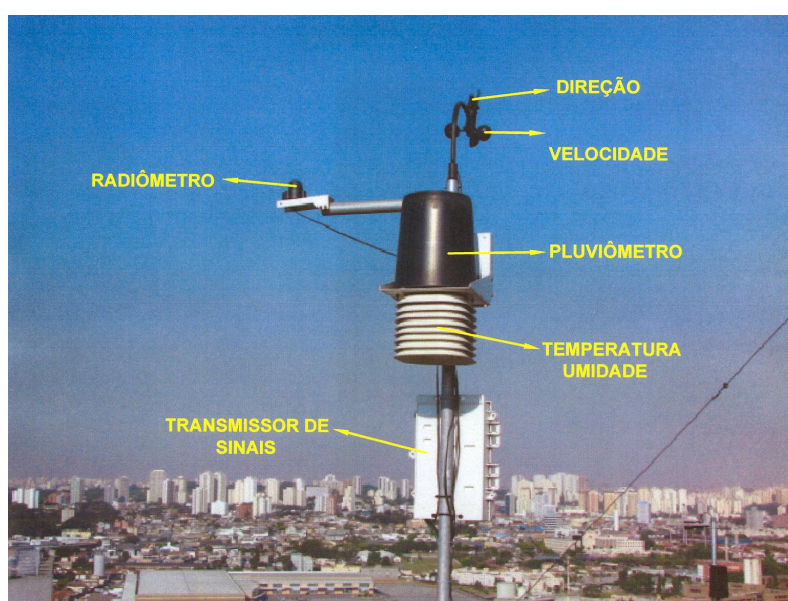


Figura 4.25 – Estação metereológica

Todos os sinais desses instrumentos são concentrados no transmissor dos sinais, que os envia por meio de rede de comunicação até a estação de supervisão do sistema de ar condicionado localizado na CAG.

Na CAG os valores medidos são registrados a cada ½ hora e podem ser visualizados em tela de computador e também ser impressos. A tela de computador dessa estação pode ser vista na figura 4.26.

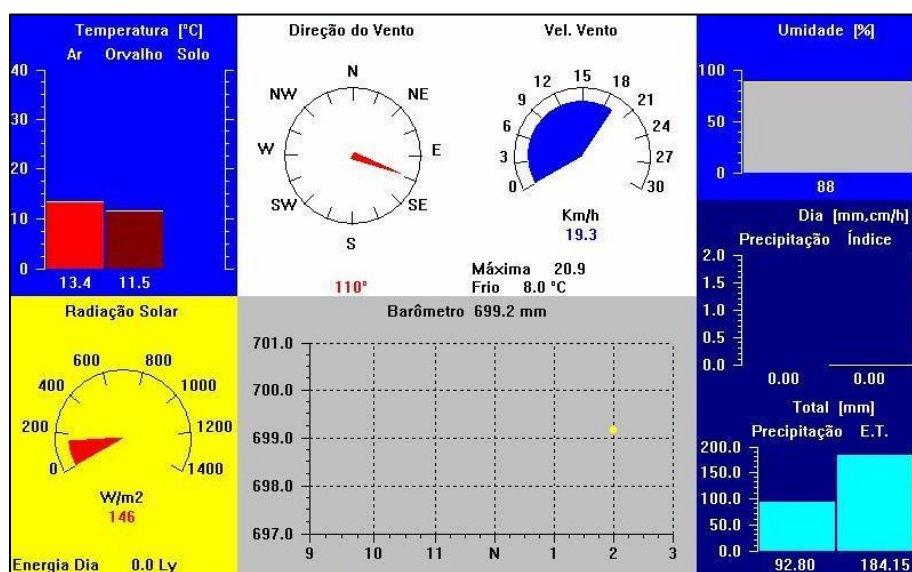


Figura 4.26 – Tela de computador com os dados obtidos da estação meteorológica

Olhando-se cada uma das melhorias citadas neste capítulo, percebe-se que mesmo isoladamente os benefícios gerados são de grande significado. A implantação praticamente simultânea dessas melhorias eleva o sistema de ar condicionado como um todo a um patamar mais alto de qualidade e performance, contribuindo sobremaneira para o conforto térmico nos ambientes dos escritórios.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os grandes avanços tecnológicos dos últimos anos colaboraram de maneira expressiva para a evolução de equipamentos e componentes para sistemas de ar condicionado. Além de mais confiáveis, esses aparatos incorporam características de funcionamento que permitem melhor precisão no controle das diversas variáveis ambientais. A implantação desses componentes, em novos sistemas de condicionamento de ar ou em sistemas existentes pode representar sensível melhora no desempenho e na satisfação com o conforto térmico.

No âmbito do estudo de caso, Modernização de Sistema de Ar Condicionado – Implantação de Melhorias para um Edifício de Escritórios, procurou-se mostrar as principais intervenções num sistema existente e os benefícios alcançados, porém sem se limitar aos aspectos de conforto térmico. Foram também apresentados itens relativos a desempenho, confiabilidade, operação e racionalização de custos de manutenção.

A implantação da nova configuração da rede de automação causou o aumento da confiabilidade do sistema de supervisão e controle, vistos a menor quantidade de falhas e defeitos apresentados. Perdas de comunicação entre as estações remotas e a Estação Central de Supervisão e Controle são imediatamente alarmadas e os reparos são rapidamente realizados. A característica de funcionamento *stand-alone* das unidades remotas confere ainda mais confiabilidade ao sistema.

A nova estação de supervisão propiciou a possibilidade de cruzamento dos dados registrados, incrementando-se vários relatórios de gestão devido a ampliação da base de dados histórica. Como somente parte desses relatórios são automatizados, pretende-se futuramente implantar banco de dados de modo a eliminar essa deficiência. No tocante a relatórios, a existência de uma estação meteorológica permite análise comparativa de desempenho do

sistema de ar condicionado conforme as condições climáticas registradas, propiciando um enfoque mais preciso da operação do sistema.

Com relação ao menor consumo de energia, outro importante quesito almejado, o aumento do EER e do COP dos novos *chillers* comprovam o acerto da substituição dos antigos equipamentos. A escolha do gás refrigerante R134a também mostrou-se acertada, pois percebe-se que atualmente a maioria dos novos *chillers*, mesmo de outros fabricantes, utilizam esse fluido.

Nos *fan-coils*, os novos componentes do circuito de controle de temperatura propiciam melhor controle da passagem de água gelada e consequentemente da temperatura ambiente, fato este percebido pela menor quantidade de reclamações recebidas dos usuários. Com a futura execução da rede de automação, a supervisão e controle de temperatura dos *fan-coils* serão muito melhorados e espera-se aumentar ainda mais a satisfação com o conforto térmico.

Com a implantação dos variadores de frequência nas bombas de água gelada do Anel Secundário, já iniciada, espera-se que além da substancial racionalização de energia elétrica mencionada no Capítulo 4, sejam obtidos dados de funcionamento do sistema em tempo real, que levem ao aprimoramento da operação do sistema.

Em relação aos itens postergados, tais como, a implantação de válvulas de balanceamento hidráulico (itens 5, 6 e 7 da Tabela 4.1), os mesmos serão objeto de nova avaliação em conjunto com a possibilidade de implantação de sistema de controle de velocidade para os ventiladores dos *fan-coils*, item não considerado inicialmente. Juntos, esses itens podem incrementar ainda mais o conforto térmico e a eficiência do sistema.

Finalmente, percebe-se que a gestão predial, por meio de planos de investimentos adequados, focados em resultados tanto econômicos quanto de qualidade de vida no ambiente de trabalho, podem estender a vida útil da edificação como um todo, levando o

empreendimento a um novo ciclo de vida e gerando novas oportunidades de renda para seus proprietários.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABINEE - Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica – **Prazos de eliminação de substâncias destruidoras de ozônio** – Comunicados e Notícias – Assessoria de Coordenação, São Paulo, 12 de julho de 2004. Disponível em: <http://www.abinee.org.br/noticias/com36.htm>. Acesso em: 24/11/2005.

ANDRADE, C.M.; GONÇALVES, J.C.S. – **Gerenciamento de ocupação do espaço e do ambiente de trabalho**. Universidade de São Paulo, MBA Gerenciamento de Facilidades, 2003.

ARI – Air-Conditioning & Refrigeration Institute – **Standard 550/590 – Standard for performance rating of water-chilling packages using the vapor compression cycle**- 2003

BELDEN – **Cabos Belden para inversores de frequência** – Boletim Técnico NP 147–P. São Paulo - 2002. Disponível em: <http://www.belden.com.br/literatura.asp>. Acesso em 07/11/2005.

CREDER, H. - **Instalações de Ar Condicionado**. 6ª edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2004; 318p.

HowStuffWorks – **How air conditioners work** – Atlanta, GA, USA – Sem data. Disponível em: <http://home.howstuffworks.com/ac.htm>. Acesso em: 25/10/2005.

LAMBERTS, R.; XAVIER, A.A.P. - **Conforto térmico e stress térmico**. Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de eficiência energética em edificações, 2002. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/arquivos/publicacoes/Apconf.pdf>. Acesso em 07/08/2005.

LEITE, B.C.C. - **Sistema de ar condicionado com insuflamento pelo piso em ambientes de escritórios: Avaliação do conforto térmico e condições de operação** – 2003. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

LG – **Catálogos de ar condicionado** – São Paulo – Sem data. Disponível em: <http://br.lge.com>. Acesso em: 25/10/2005.

MATA, C.R. – **Análise econômica de sistemas de co-geração de energia elétrica no setor terciário** – Sem data. Disponível em: <http://www.iem.efei.br/dpr/td/julho2001/pdf/Td117.pdf>. Acesso em: 10/10/2005.

OLESEN, B.W.; PARSONS, K.C.. **Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730** – Energy and building, Elsevier Science, Loughborough, UK, 34, 537-548, 2002.

PRADO, R.T.A. - **Conforto térmico**. Universidade de São Paulo, MBA Gerenciamento de Facilidades, 2003.

RAFFERTY, K.D. – **Absorption refrigeration** – Sem data. Disponível em: <<http://geoheat.oit.edu/bulletin/bull19-1/art62.htm>>. Acesso em 09/10/2005.

RODRIGUES, W.; LUVIZOTTO JR, E. **Inversor de frequência em sistemas de bombeamento** – Jaboticabal - Sem Data. Disponível em: <[http://www.semasa.sp.gov.br/Documentos/ASSEMAE/Trab\\_32.pdf](http://www.semasa.sp.gov.br/Documentos/ASSEMAE/Trab_32.pdf)>. Acesso em 06/11/2005.

RUAS, A.C. – **Avaliação de conforto térmico – Contribuição à aplicação prática das normas internacionais** – 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2001. Disponível em: <[http://www.fundacentro.gov.br/ARQUIVOS/PUBLICACAO/I/Avaliacao\\_de\\_Conforto\\_Termico.pdf](http://www.fundacentro.gov.br/ARQUIVOS/PUBLICACAO/I/Avaliacao_de_Conforto_Termico.pdf)>. Acesso em 09/08/2005.

RUAS, A.C. - **Sistematização da avaliação de conforto térmico em ambientes edificadas e sua aplicação num software** – 2002. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2002. Disponível em: <<http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000283945>>. Acesso em 07/08/2005.

SBRAVATI, A.; SILVA, A.F.S.G. – **Refrigeração por absorção** – Sem data. Disponível em: [http://www.fem.unicamp.br/~em672/Absorcao\\_Alan\\_Andre.html](http://www.fem.unicamp.br/~em672/Absorcao_Alan_Andre.html). Acesso em 09/10/2005.

SILVA, J.C. – **Refrigeração comercial e climatização industrial**. 1ª edição. São Paulo: Editora Hemus, 2004; 231p.

TECNAUT – **Harmônicos e inversores de frequência** – Lauro de Freitas - Sem Data. Disponível em: <<http://www.tecnaut.com.br/utilidades/duvidas/Harmonicos/harmonicos.PDF>>. Acesso em 06/11/2005.

TUMA – **Boletim Técnico – Princípios da Absorção** – Sem data. Disponível em: <[http://www.empresastuma.com.br/empresas\\_tuma/broad/utilidades/utilidades\\_06.asp](http://www.empresastuma.com.br/empresas_tuma/broad/utilidades/utilidades_06.asp)>. Acesso em 09/10/2005.

VETOR - **Relatório final consolidado de avaliação do sistema de ar condicionado** - São Paulo - 2001 – 160 p.

XAVIER, A.A.P. – **Predição de conforto térmico em ambientes internos com atividades sedentárias – Teoria física aliada a estudos de campo** – 2000. Dissertação (Doutorado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2000. Disponível em: <http://150.162.76.35/labee/publicacoes/teses.php>. Acesso em 09/08/2005.

YORK – **Refrigerantes naturais** - Boletim técnico nº 31 – Janeiro/2001 – Disponível em: <[http://www.yorkbrasil.com.br/site/content/servicos/servicos\\_boletins.asp](http://www.yorkbrasil.com.br/site/content/servicos/servicos_boletins.asp)>. Acesso em: 23/10/2005.

YORK – **O protocolo de Kyoto** – Boletim técnico nº 71 – Março/2005. Disponível em: <[http://www.yorkbrasil.com.br/site/content/servicos/servicos\\_boletins.asp](http://www.yorkbrasil.com.br/site/content/servicos/servicos_boletins.asp)>. Acesso em: 23/10/2005.

YORK – **Catálogos de chiller, self contaneid e split** – São Paulo – Sem data. Disponível em: <<http://www.yorkbrasil.com.br>>. Acesso em 23/10/2005.