

FRANCISCO ERNESTO MORENO GARCIA

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM CONTROLE ADAPTATIVO PARA
UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO.**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2006

FRANCISCO ERNESTO MORENO GARCIA

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM CONTROLE ADAPTATIVO PARA
UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Energia e Sistemas Térmicos.

Orientador: Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho.

UBERLÂNDIA - MG

2006

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

- M843e Moreno Garcia, Francisco Ernesto, 1981-
Estudo experimental de um controle adaptativo para um sistema de refrigeração / Francisco Ernesto Moreno Garcia. - 2006.
95 f. : il.
- Orientador: Enio Pedone Bandarra Filho.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.
1. Refrigeração -Teses. I. Bandarra Filho, Enio Pedone. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621.56

FRANCISCO ERNESTO MORENO GARCIA

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM CONTROLE ADAPTATIVO PARA
UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO.**

Dissertação **APROVADA** pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

Área de Concentração: Energia e Sistemas Térmicos.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho – UFU - Orientador

Prof. Dr. Oscar Saul Hernandez Mendoza – FEMEC – UFU

Prof. Dr. João M. D. Pimenta – UNB

Uberlândia, Novembro de 2006.

Aos meus pais, **Elizabeth Garcia** e **Ernesto Moreno Fossi**, exemplos de amor, de humildade, de luta, incentivadores constantes e inigualáveis na minha caminhada, que sempre orientaram meus primeiros passos imprescindíveis, dedico essa conquista.

A minha irmã **Flor Elizabeth**, pelo amor, amizade e apoio.

FRANCISCO

AGRADECIMENTOS

A Deus por me dar todas as oportunidades presentes na minha vida.

A Prof. Dr. Enio Bandarra Filho pelo exemplo de trabalho e por ser um ótimo pesquisador. Também pelo ensino e paciência que teve ao me orientar.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Coordenação da Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, em nome de todos os professores e funcionários que direta e indiretamente contribuíram para a realização desta dissertação de mestrado.

Aos meus amigos do LEST: Ângelo Tumialan Borja, Gleyzer Martins e Jose Edmundo Pitillo, pela colaboração dedicada e despretenciosa que ofereceram à esta dissertação.

Aos meus amigos e irmãos Manuel Villafañe Saldarriaga, Israel Cardenas Nuñez, José Antônio Tumialan Borja, pelo apoio motivacional e pelo companheirismo manifestados ao longo da duração desta pós-graduação.

Aos meus amigos e amigas pelas horas de descontração, atualização cultural e alegria nas oportunidades de convivência vividas no Brasil.

À CAPES (Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro.

À empresa BITZER compressores pela doação do compressor para a montagem da bancada de ensaios, a ACP pelos trocadores de calor, e EMERSON Climate Technologies, pela válvula de expansão e a Polipex pelo isolamento da Bancada.

A toda minha família CANAL COLMENARES, família GARCIA, família MORENO FOSSI, e Padre Humberto Nieto pela importância que representam na minha vida. E finalmente, expresso o mais sincero agradecimento ao Prof. Oscar Saul Hernandez Mendoza, compreensão, oportunidade, paciência, conhecimento transmitido e amizade fraternal dispensados à minha pessoa. Muito obrigado.

ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM CONTROLE ADAPTATIVO PARA UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO.

SUMÁRIO

Capítulo I	INTRODUÇÃO	1
Capítulo II	REVISÃO BIBLIOGRAFICA	3
2.1	Sistemas de Refrigeração por compressão de vapor	3
2.2	Otimização e controle de operação de sistemas de refrigeração	7
Capítulo III	BANCADA EXPERIMENTAL	13
3.1	Considerações Iniciais	13
3.2	Construção da Bancada experimental	14
3.3	Componentes da Bancada Experimental	17
3.3.1	Compressor	17
3.3.2	Condensador e evaporador	19
3.3.3	Válvula de expansão	20
3.3.4	Filtro secador	21
3.3.5	Controlador Lógico Programável (CLP)	22
3.3.6	Variador de frequência	25
3.3.7	Medidor de vazão tipo Coriolis	28
3.4	Sistema aquisição de dados e comando	29
3.4.1	Conceito da Automatização como ferramenta básica	29
3.4.2	Nível Sensores / Ação / Condicionamento	30
3.4.3	Nível de Controle (Nível de campo)	36
3.4.4	Nível Supervisionamento, Gestão e Análise	38
Capítulo IV	CONTROLE ADAPTATIVO	41
4.1	Introdução	41
4.2	Fundamentos da Lógica fuzzy	41
4.2.1	Base de regras	44

4.2.2	Fuzzyficação	44
4.2.3	Inferência	45
4.2.4	Defuzzyficação	45
4.3	Controlador Fuzzy Adaptativo	46
4.3.1	Monitor do Processo	46
4.3.2	Mecanismo de adaptação	47
Capítulo V	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	53
5.1	Identificação física dos parâmetros	53
5.2	Procedimento Experimental	54
5.2.1	Conhecimento de condições iniciais da bancada experimental	58
5.2.2	Resposta do sistema ao aumentar a massa do refrigerante	63
5.2.3	Avaliação do sistema em Malha fechada	68
Capítulo VI	CONCLUSÕES	83
Referencias Bibliográfica		85
ANEXOS		
ANEXO I		91
ANEXO II		93

SIMBOLOGIA

Letras Latinas

A	- Variável lingüística aumenta
c_p	- Calor específico
$C_{\$}$	- Tarifa custo por kWh consumido
CV	- Variável de controle
COP	- Coeficiente de eficácia
D	- Variável lingüística “DIMINUI”
DTw,cd	- Diferença de temperatura da água no condensador
DTw,ev	- Diferença de temperatura da água no evaporador
E_w	- Encargo da energia utilizada
e	- Erro da entrada
FE	- Fator de Escala
Freq	- Frequência
G	- Variável lingüística grande
h	- Entalpia
K_p	- Ganho proporcional
K_i	- Ganho integrativo
K_d	- Ganho derivativo
Kv	- Fator de escala
KKv	- Saída mecanismo interno de adaptação do controlador
M	- Variável lingüística mantém
m	- Massa
$\dot{m}_{ref,ev}$	- Vazão mássica do refrigerante no evaporador
$\dot{m}_{ref,cd}$	- Vazão mássica do refrigerante no condensador
$\dot{m}_w$	- Vazão mássica da água evaporada
N	- Variável lingüística NEGATIVO
P	- Variável lingüística POSITIVO
P_m	- Demanda potência elétrica
PV	- Variável do processo
$\dot{Q}$	- Fluxo de transferência de calor

$\dot{Q}_{ev,pl}/\dot{Q}_{ev,fl}$	- Fluxo de transferência de calor do evaporador com carga parcial/ carga total
R	- Regra <i>fuzzy</i>
ref	- Refrigerante
r	- Referência " <i>setpoint</i> "
T	- Norma t
T_{sat}	- Temperatura Saturação
T_{eev}	- Temperatura de entrada do refrigerante no evaporador
T_{sev}	- Temperatura de saída do refrigerante no evaporador
T_{ecd}	- Temperatura de entrada do refrigerante no condensador
T_{scd}	- Temperatura de saída do refrigerante no condensador
Tsb	- Temperatura de subresfriamento
Tsp	- Temperatura de superaquecimento
T_{ev}	- Temperatura de evaporação
T_{cd}	- Temperatura de condensação
TR	- Tonelada Refrigeração
U	- Universo do discurso
U_c	- Saída de controle
V	- Volume
w	- Água
W	- Potência
W_u	- Energia consumida
Z	- Variável lingüística zero

Letras Gregas

α	- Valor de pertinência
μ	- Função de pertinência
Ω	- Resistência (Ohmios)

SIGLAS

ASCII	Código Standard Americano para troca de informação
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CLP	Controlador Lógico Programável
CMRR	Radio Rechaço modo comum
COP	Coeficiente de eficácia
CPU	Unidade Central de Processamento
DF1	Protocolo de comunicação serial full duplex
DH485	Protocolo de alta comunicação
EES	Software solução equações engenharia.
FET	Transistor Efeito campo
HMI	Interface homem maquina
HVAC	Ar condicionado, aquecedor e ventilação
IGBT	Transistor Bipolar com porta isolado
JOG	Classe de interruptor elétrico non-mantido set de dois estados.
LABVIEW	Software visual de laboratório e instrumentação
LADDER	Diagrama de Contatos de Reles
LEST	Laboratório de Energia e Sistemas Térmicos
MIMO	Múltiplas entradas e múltiplas saídas
OPserver	Servidor interativo de informação para equipamentos <i>on-line</i>
PID	Proporcional Integral Derivativo
PI	Proporcional Integral
PWM	Modulação largo de pulso
R22	Refrigerante Monoclorofluorometano
RS232	Interconexão física serial binária entre dois equipamentos
RSlinx	Aplicação de servidor completa de comunicação da <i>Allan Bradley</i> .
RUN	Modo de trabalho
SCADA	Sistema de controle e aquisição de dados
SLC5/03	Modelo processador marca <i>Allan Bradley</i>
SIGNET	George Fischer Signet Inc.
TAG	Línea pacotes de dados de transmissão
TOGGLE	Classe de Interruptor elétrico com mecanismo para aplicar set de dois estados.
TIXA	Tipo de família válvula de expansão
VAC	Volumem de ar constante

GARCIA, F. E. M. **Estudo experimental de um controle adaptativo para um sistema de refrigeração**. 2006. 95 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

RESUMO

Este trabalho trata do uso de um controle adaptativo num sistema de refrigeração por compressão de vapor visando economia de energia, utilizando R-22 como fluido de trabalho. O equipamento experimental é composto por um compressor semi-hermético alternativo, condensador e evaporador de tubos concêntricos resfriados a água e válvula de expansão termostática com equalização manual e variador de frequência para controlar a velocidade de rotação do compressor. O sistema foi totalmente instrumentado, usando sensores de temperaturas tipo PT-100 na entrada e saída de cada componente, sensores de pressão piezo-resistivos, medidor de vazão de refrigerante tipo coriolis, placa condicionadora de sinais com saída analógica, uso de controlador lógico programável (CLP) para digitalizar os sinais analógicos, software de monitoração e operação do sistema, implementado em LABVIEW, uso de controle difuso – adaptativo para controle da velocidade de rotação do compressor, uso de PID para controle de temperatura de alimentação da água para o evaporador, torre de resfriamento para resfriar a água saindo do condensador. O estudo utilizou além do controlador difuso, controle On-Off e controle PI, analisando os resultados obtidos, realizando comparações e recomendações.

GARCIA, F. E. M. **Experimental study of a refrigeration system using an adaptative control**. 2006. 95 f. M.Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

ABSTRACT

This research deals with a experimental study of vapor compression refrigeration system, with variable speed compressor using adaptative fuzzy control, comparing it's results with On-Off and PI control. The experimental equipment used is composed of a semi-hermetic compressor, concentric tube evaporator and condenser, thermostatic expansion valve with manual equalization. The equipment was totally instrumented using PT-100 temperature sensors, piezo-resistive pressure transducers, coriolis mass flow rate meter, cooling tower to refrigerant water leaving condenser, electrical resistance, using PID to control water temperature supply to evaporator, analogical signal amplification and conditioning and logic programming controller (PLC) to digitalize and operate PID and variable speed compressor. It was used LABVIEW software for monitoring and operation of experimental equipment. Results are compared using different mass refrigerant inventory in the experimental equipment, as will as different temperatures of water supply to evaporator. Keeping exhaust evaporator water temperature constant, analysis and recommendation are given when the three types of control are used, showing advantages and limitation of each one.

CAPITULO I

INTRODUÇÃO

Instalações de refrigeração com oito ou mais horas de uso diário contínuo, ou que apesar de recentes, mostram-se ineficientes por falhas no projeto, execução, ou ainda, por falta de manutenção adequada são passíveis de apresentarem defeitos com o tempo. Tanto em um caso como em outro, a percepção do usuário é à eficiência no consumo energético para qualquer sistema de refrigeração. A economia de energia é parte propiciada pela otimização do desempenho dos equipamentos como resultado de uma racionalização e técnicas de controle aplicadas a estes sistemas.

Aspectos importantes, como por exemplo, custos da energia elétrica, trouxeram aos ambientes residenciais, comerciais e, principalmente, industriais, estratégias e tecnologias com o objetivo de corresponder às exigências requeridas em função da relação entre o rendimento em cada instalação com as diferentes condições de operação, para obtenção de um controle com uma maior qualidade e confiabilidade nos processos termodinâmicos e mecânicos, além, é claro, de um menor consumo de energia.

Paralelamente e conjuntamente com as estratégias de controle, a instrumentação tem apresentado uma evolução significativa hoje em dia, o que tem facilitado a obtenção de um completo registro de variáveis, baseado na utilização de processadores, cujo campo de aplicação em áreas como a refrigeração e ar condicionado vêm crescendo substancialmente.

Assim, a instrumentação é uma ferramenta fundamental para automatizar e otimizar sistemas de ar-condicionado e de refrigeração. Isso permite que o usuário passe a ter condições de controlar e analisar o sistema, a partir de uma central, utilizando para tal o funcionamento e as condições da instalação com programas (softwares) apropriados. No futuro, os processos integrados tendem a crescer ainda mais, bem como a integração entre

sistemas correntes, além da utilização cada vez maior de equipamentos integrados gerando um desempenho ótimo nos processos e propiciando a diminuição dos erros.

O presente trabalho se concentrou na implementação do controle e avaliação do desempenho de um aparelho de ar condicionado comercial tipo *Self-Contained* com capacidade de refrigeração de 17,5 kW (5 TR). Entretanto, devido à dificuldade em controlar as condições ambientes, optou-se pela substituição dos trocadores de calor resfriados /aquecidos a ar por trocadores em que o fluido secundário era a água. Essa alteração possibilitou um melhor controle da variação da carga térmica no evaporador. Nessas condições, o sistema adaptado tornou-se um resfriador de Líquido “*Chiller*”, onde era possível variar a carga térmica no evaporador e a rotação do compressor, utilizando um variador de frequência comandado por um Controlador Lógico Programável CLP. Com isso, foi possível levantar os melhores pontos de operação, com o objetivo principal de economizar energia com base no conhecimento em uma das áreas de pesquisa de suma importância para comunidade científica.

A seguir, é apresentado, de forma resumida, o conteúdo de cada capítulo desta dissertação.

No Capítulo II, é apresentada uma revisão bibliográfica levantada sobre os diferentes estudos desenvolvidos no desempenho, otimização e controle dos sistemas de refrigeração por compressão de vapor.

No Capítulo III se encontra a descrição dos principais componentes da bancada experimental que foi construída no Laboratório de Energia e Sistemas Térmicos (LEST) da Universidade Federal de Uberlândia.

No capítulo IV, são apresentados os fundamentos básicos do Controlador Lógico Fuzzy Adaptativo no controle do sistema de refrigeração.

Os resultados experimentais, a partir de testes de avaliação em diferentes condições de operação do sistema de refrigeração são apresentados no Capítulo V, bem como sua análise.

Finalmente, o capítulo VI apresenta as conclusões gerais deste trabalho, incluindo futuros desdobramentos deste trabalho.

No anexo I é apresentada as curvas de calibração dos sensores de Temperatura, Pressão, entre outros de nossa bancada experimental. No anexo II uma apresentação do código de programação LABVIEW desenvolvido exclusivamente para esta pesquisa.

CAPITULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Sistemas de Refrigeração por compressão de vapor

Na maioria dos equipamentos que são utilizados nos sistemas de refrigeração e de ar condicionado, a técnica de controle implementada é a garantia de uma determinada condição térmica, a fim de condicionar um ambiente, variando a condição operacional de funcionamento do compressor do sistema de refrigeração em função de um intervalo de tempo pré-definido. Nesses equipamentos, quando o sensor de temperatura do ambiente a ser refrigerado acusa uma temperatura igual à temperatura máxima do intervalo de temperaturas, um termostato de dois estados tipo liga/desliga (*On-Off*) é direcionado para a posição liga e o compressor é acionado, em velocidade constante, até que o sensor acuse uma temperatura igual à temperatura mínima do intervalo, fazendo assim com que a termostato altere seu estado para a condição desliga e o compressor seja desligado. Dessa forma, termostato atua na realimentação do sistema e no acionamento do compressor, devendo por isso ser dimensionada para suportar correntes e tensões elevadas, as quais levam a picos de corrente. Entretanto, apesar de funcionais com este dispositivo de controle, tais equipamentos não apresentam, nem de longe, a melhor eficiência energética nos setores de refrigeração e ar condicionado pela própria condição de operação.

É assim Nguyen *et al.* (1982) estudaram a degradação de rendimento das diferentes configurações de ar condicionado devido às perdas do ciclo à modulação liga-desliga (*On-Off*) e concluíram que o funcionamento intermitente do sistema causa ainda mais inconvenientes, como por exemplo, a quantidade de energia consumida para acionar o compressor, em condições de manter uma ótima temperatura através do evaporador.

Lida *et al.* (1982) realizaram investigações experimentais em uma bomba calor com um compressor hermético com potência de 3 kW (4 HP), averiguando, assim, que os limites práticos para a variação da velocidade do compressor devem permanecer na faixa entre 25 e 75 Hertz. Tais resultados indicaram melhorias em relação à eficiência de energia com o compressor inversor-dirigido, comparado a um sistema de capacidade fixa. A razão indicada para essa melhoria era uma eficiência, que reduzisse as perdas de consumo e proporcionasse um ciclo de potência satisfatório. Garstang (1990) observou que em condições especiais de funcionamento, com um rígido controle da temperatura do ambiente ou grande variação da carga térmica, provocam uma alta taxa de intermitência na operação destes sistemas, acelerando o desgaste dos equipamentos, principalmente da unidade compressora. O'Neal e Katipamula (1991) desenvolveram um modelo de primeira ordem validado experimentalmente para ar condicionado e bombas de calor. Os resultados apresentados mostraram uma redução na eficiência nestes sistemas, a medida em que se liga e desliga o aparelho durante pequenos intervalos de tempo.

As aplicações de novas tecnologias, como é o caso da utilização de variadores de frequência, facilitam a implementação de sistemas mais eficientes em relação à redução do consumo de energia dos sistemas de refrigeração. Desde que tais sistemas operem, na maioria das vezes, em condições estáveis, as economias consideráveis de energia podem ser conseguidas levantando a eficiência da combinação do inversor e do motor com a carga em operação às baixas velocidades.

Assim, no Brasil, em meados da década de 90, observou-se desenvolvimentos de sistemas que utilizaram compressor de capacidade variável. Em 1996, uma empresa nacional de compressores (Embraco), conseguiu um método de controle da velocidade de operação de um compressor hermético, apresentando motor de velocidade variável, para manter a temperatura do ambiente sob refrigeração dentro de um intervalo de temperaturas previamente definido, sem a necessidade de submeter o motor do compressor a operações contínuas de liga e desliga (*On-Off*) ou ainda, utilizar circuitos eletrônicos complexos para tratamento do sinal de realimentação. O sistema era composto por um termostato acionável em pelo menos dois estados limites de temperatura de um ambiente a ser refrigerado e um motor de velocidade variável provido de uma unidade de controle.

Na maioria dos sistemas de refrigeração convencionais, a pressão diferencial ideal de operação é mantida entre as pressões de alta e baixa do sistema, assegurada pela operação eficiente da válvula termostática de expansão. Esta estratégia não aproveita a vantagem oferecida pelas variações na temperatura do ambiente para que o sistema opere a temperaturas adequadas. O benefício significativo na economia de energia é permitir que o sistema opere a pressões adequadas nos períodos quando a carga térmica e

temperaturas ambientes são baixas. Os diferentes estudos realizados por diversos pesquisadores introduzem uma série de ensaios que permitem, por exemplo, variar as pressões dentro de uma escala ótima, de acordo as exigências da válvula de expansão. Este estudo foi avaliado por Tassou e Qureshi (1998), que apresentaram o desenvolvimento de uma bancada experimental para um sistema de refrigeração, mostrada na figura 1a, com diferentes tipos de compressores, operando com uma válvula de expansão termostática. Os resultados apresentados mostraram um pouco aumento representativo do COP com o aumento da frequência para as distintas temperaturas de condensação, como pode ser observado na figura 1b para o compressor semi-hermético. Finalmente os autores concluíam, que, em termos energéticos, observou-se uma melhora quando se trabalha com a tecnologia de um inversor acionado por modulação de pulso largo (PWM) como dispositivo para variar a velocidade, que forneceu as mínimas perdas da ordem de 5%. Isto mostrou a viabilidade de variar a velocidade por intermédio de sistemas inversores por modulação de pulso largo (PWM) com motores de indução “Standard”, pois permitem uma eficiência ótima quando comparados aos sistemas de refrigeração com velocidade fixa.

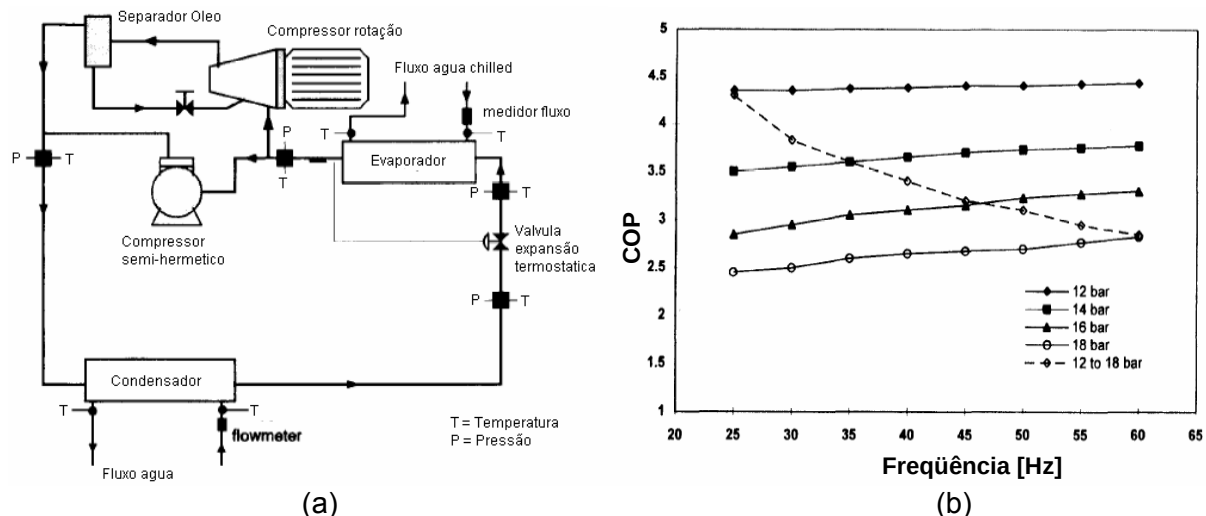


Figura 1. (a) Bancada experimental. (b) Variação do COP em função da variação da frequência para o compressor semi-hermético, para diversas pressões de condensação, Tassou e Qureshi (1998).

Posteriormente, Cuevas e Winandy (2001) analisaram o rendimento de um sistema de ar condicionado com dois tipos de modulação: *On-Off* e velocidade variável com inversor. A modelagem deste sistema foi desenvolvida pelos autores baseando-se no conjunto dos diferentes componentes do ciclo de refrigeração como: válvula expansão, evaporador, compressor rotativo tipo *scroll* e um condensador, tendo o fluido principal no circuito o R-22.

A figura 2 ilustra o esquema da bancada experimental e um fluxograma com as variáveis do sistema proposto por Cuevas e Winandy (2001).

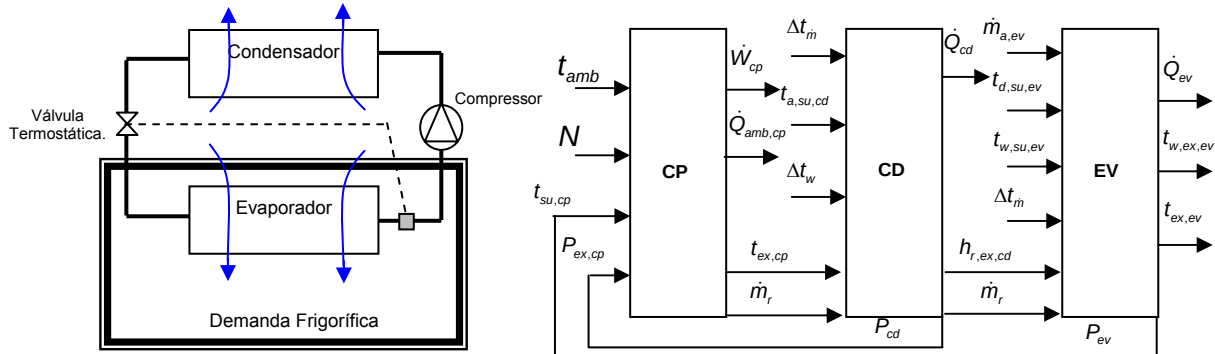


Figura 2. Sistema de refrigeração modelado Cuevas e Winandy (2001).

A completa operação dos ensaios simulados do sistema de ar condicionado foi assumida operando em modo de VAC (Volume de ar constante) nas entradas dos modelos de condensador e evaporador do sistema. A simulação foi realizada durante períodos de funcionamento, tanto em modulação *On-Off* quanto na modulação da velocidade variável.

Os resultados apresentados por Cuevas e Winandy (2001) é ilustrado na Figura 3. É interessante notar que a modulação do inversor proporcionou um melhor desempenho que a modulação tipo *On-Off* em praticamente toda a faixa da capacidade de refrigeração, exceto quando se aproxima da carga máxima, onde o efeito das perdas do inversor faz com que a modulação do inversor seja menos eficiente.

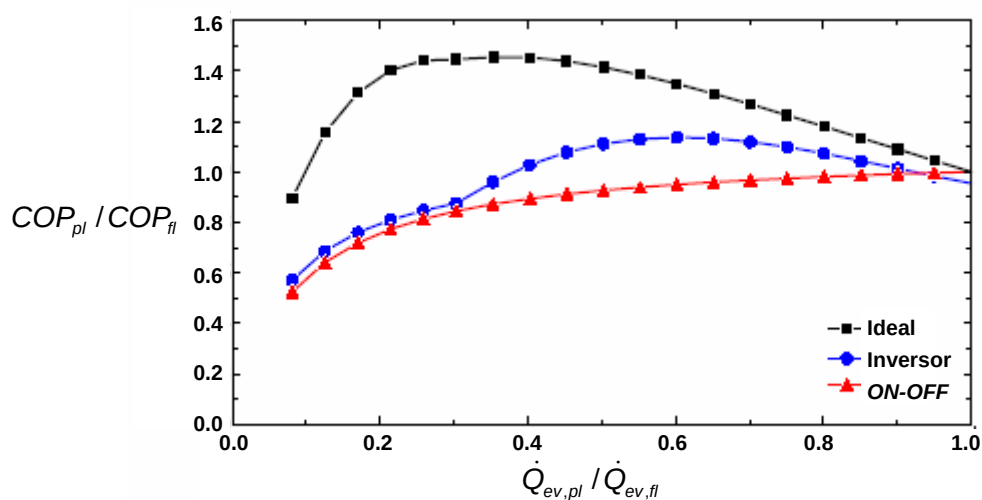


Figura 3. Coeficiente de eficácia, COP, dos três tipos de modulação em função da capacidade de refrigeração com carga parcial e total, Cuevas e Winandy (2001).

2.2. Otimização e controle de operação de sistemas de refrigeração

Na área de estratégias de controle operando nos processos de compressão de vapor, começa na procura de resultados iniciais positivos nas pesquisas, baseados no melhoramento de sistemas de controle tradicional para única entrada e única saída (SISO), devido a que as funções de transferência do sistema não são conhecidas freqüentemente, ou a dinâmica do sistema muda durante o tempo, como é o caso quando ocorre pequenas fugas de fluido refrigerante ou a mudança dos coeficientes na transferência de calor devido a sujeiras ou incrustações. Conseqüentemente, a estratégia ideal de controle para estes sistemas, devido ao pouco conhecimento prévio do sistema, é a capacidade de se adaptar às mudanças nas condições do sistema. Tal é o exemplo de Fredsted e Bernardi (1999) que utilizaram modelos físicos e matemáticos complexos para o compressor e a válvula da expansão, com o objetivo de calcular o sinal retro-alimentado, desenvolvendo então um controlador tipo Proporcional Integral Derivativo (PID) complexo que compensa as desvantagens dos modelos simples.

Qiang e Wen-Jian Cai (2000) apresentaram um desenvolvimento experimental para um sistema ar condicionado controlado por um PID auto-sintonizado, como mostra a figura 4. No referido controlador, foram explorados dois métodos distintos da identificação para servir uma larga escala dos processos. Foram incorporadas duas regras do projeto de PID para conseguir desempenhos elevados do controle para processos com características dinâmicas diferentes ao clássico. A experiência foi executada em um sistema de controle distribuído e aplicado na indústria. Os resultados experimentais demonstraram um ótimo desempenho do referido sistema e a eficiência superior do controlador PID auto-sintonizado sobre o controlador PID clássico manualmente ajustado.

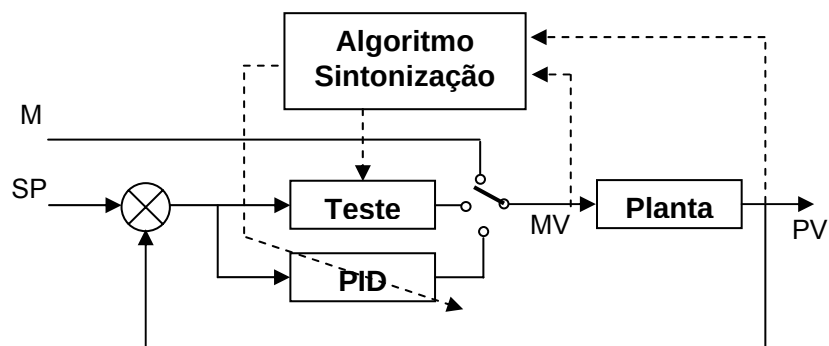


Figura 4. Controle PID auto-sintonizado, Qiang e Wen-Jian Cai (2000).

A melhoria do desempenho e a minimização do consumo de energia também requerem o ajuste de estratégias que levam a procura de desenvolvimentos de pesquisas de novas tecnologias para projetos mais eficientes ou na adequação de sistemas de refrigeração combinado com as condições de cargas dos sistemas. Algumas pesquisas estão centradas nos algoritmos de controle para múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO), que coordenam o conjunto de ações, otimizando os critérios de forma a manter o sistema o mais próximo possível de uma trajetória de referência, que pode ser o próprio *set point* ou, em geral, uma trajetória suave de mudança de *set point*. É o caso do controle do grau da abertura da válvula de expansão, utilizando lógica *fuzzy* com modificador de ganho, conforme apresentou Carvajal (2000), a fim de manter um grau de superaquecimento constante como *set point*. Conseqüentemente, esta estratégia de controle utilizada conseguiu garantir a estabilidade do grau de superaquecimento no sistema com variações inferiores a 1°C, para diferentes níveis de carga térmica, como é mostrado na figura 5.

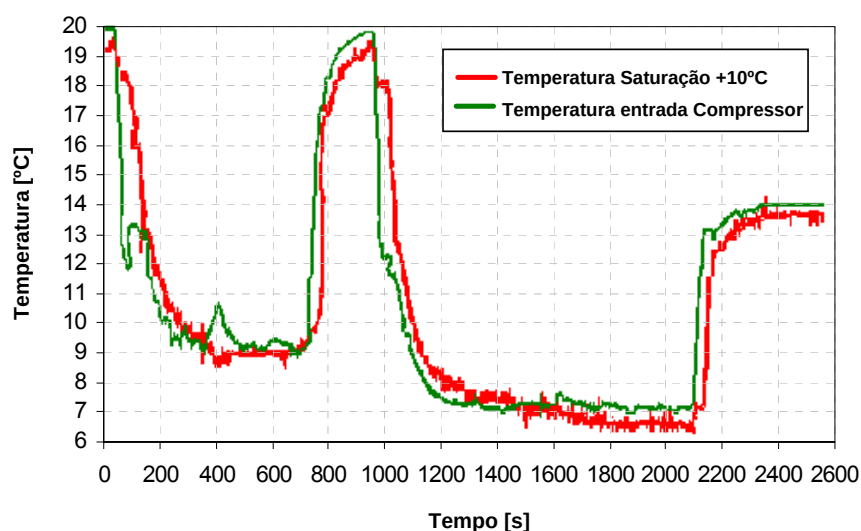


Figura 5. Evolução temporal da variável de controle utilizando o controlador difuso (Carvajal, 2000).

Nessas condições, para sistemas que integram um controle adequado, percebe-se claramente uma melhora do desempenho do processo, minimizando o superaquecimento do evaporador e as rotações do compressor, cumprindo, ainda, as exigências de variações na carga térmica de refrigeração. Tal é caso apresentado, por Deng (2000), que desenvolveu uma estratégia de controle técnica do tipo *feedforward* para um sistema de ar condicionado como mostra a Figura 6a, baseado num modelo matemático, que usa o princípio da conservação de energia. Este projeto incluiu um algoritmo de equações de estado para o

equipamento experimental com ensaios que confirmaram o diagnóstico das rotinas termodinâmicas apropriadas que envolvem o sistema de ar condicionado.

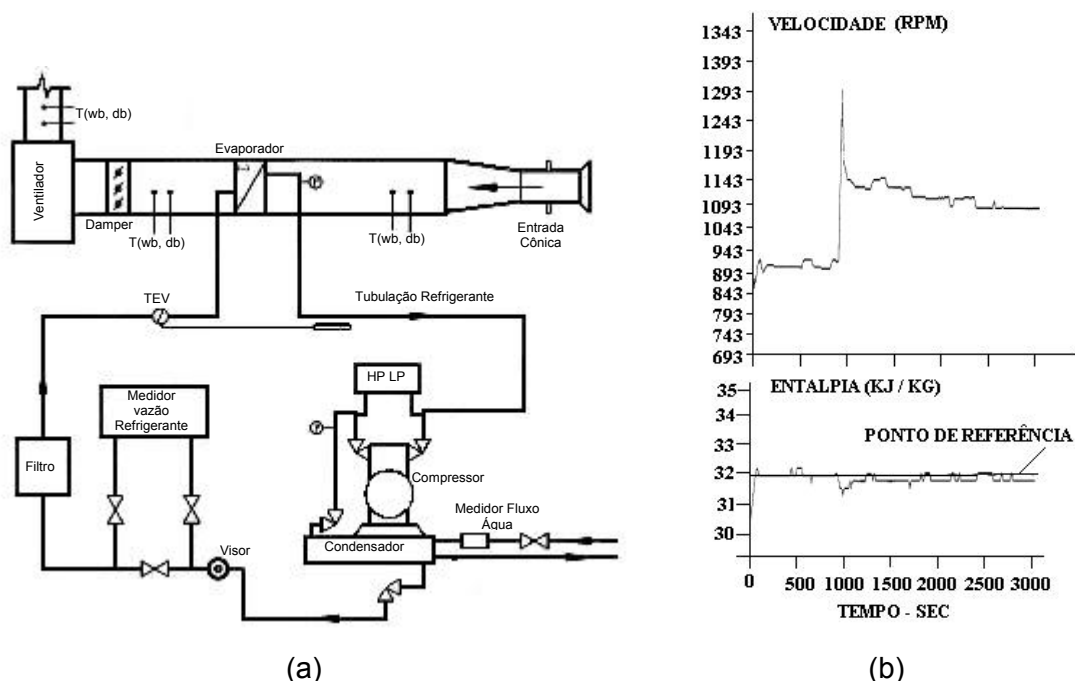


Figura 6. (a) Bancada experimental de um sistema de ar condicionado. (b) Ação do controlador na velocidade do compressor em função a mudanças na vazão mássica de ar, Deng (2000).

Os resultados obtidos por Deng (2000), apresentaram uma elevada eficiência energética no sistema, mesmo considerando limitações na resposta, em parte fornecidas pela capacidade térmica, em virtude da dinâmica da planta e do sensor. Nos seus experimentos para o novo controlador tipo feedforward, mostrado na figura 6b, o autor apresentou a ação do controlador na velocidade do compressor mediante alterações no fluxo de massa de ar no evaporador. O ponto ajustado inicialmente para este teste foi a entalpia de 31,9 kJ/kg. A taxa de fluxo de massa do ar foi medida inicialmente em 0,23 kg/s. Após 900 segundos, a vazão mássica do ar foi alterada manualmente para 0,28 kg/s, com outros parâmetros operando em condições normais. Para responder a esta mudança, o controlador calculou a velocidade requerida do compressor, para a vazão mássica de ar requerida e acionou o compressor fazendo com que o mesmo alcançasse a nova velocidade de rotação.

É interessante observar que a contínua evolução das estratégias de controle tem proporcionado grandes avanços que podem ser aplicados a sistemas de refrigeração. É o

caso no uso do controle *fuzzy* nos processos industriais nas últimas décadas, devido à sua capacidade de atuar no sistema baseando-se apenas no conhecimento especialista e na capacidade de inter-relacionar todas as variáveis do processo. Da Silva e Junior (2001) desenvolveram simulações com a finalidade de trabalhar um controle *fuzzy* da temperatura de condensação em um sistema de resfriamento de líquido, sob condições pré-definidas e perturbações na temperatura da água do condensador. O controle *fuzzy* desenvolvido mostrou-se satisfatório e de fácil implementação, apresentando um *off-set* na temperatura de condensação de 2,4°C e -1,5°C para perturbações na temperatura de entrada da água no condensador, sendo reduzido para 0,3°C e -0,7°C após a sintonia do controlador e submetido às mesmas perturbações. Abordando a aplicação de controladores baseados em lógica nebulosa (ou *Fuzzy*) em sistemas de aquecimento, Da Costa *et al.* (2001) propuseram uma sistemática para a especificação de funções de pertinência do controlador a fim de que, mantendo a temperatura dentro de limites toleráveis (conforto térmico), a variância do sinal de controle, o número de picos e o valor total do consumo de energia, fossem reduzidos. Seus resultados, a partir da modelagem do sistema de aquecimento conformado por um ambiente fechado com aquecedor elétrico, foram comparados com outras estratégias de controle como o tipo liga/desliga, *On-Off*. O desempenho apresentado pelo controlador *fuzzy* clássico apresentou um pequeno aumento no consumo de energia quando comparado com o controlador tipo liga/desliga. Eles consideram aceitável devido à sua regulação precisa da temperatura em torno do valor de referência fortemente desejável, entretanto observaram, de maneira positiva, o menor desgaste no mecanismo de acionamento de potência do compressor com o controlador *fuzzy* desenvolvido.

É muito importante destacar que as utilidades dos controladores *fuzzy* dispensam a modelagem matemática clássica dos sistemas físicos, dependem do conhecimento prévio que um especialista possui sobre o processo que se deseja controlar. Estas observações suscitaram nos últimos tempos o aparecimento dos controladores nebulosos (ou *fuzzy*) adaptáveis, Cardenas (2002), desenvolveu o controlador *fuzzy* adaptativo implementado no microcontrolador como *hardware* de baixo custo e versátil, onde revelaram a capacidade de modificar seu comportamento em resposta às mudanças nas dinâmicas do processo e/ou perturbações que são muito comum nos sistemas mecânicos.

Apréa *et al.* (2005), avaliaram experimentalmente o desempenho de um sistema de compressão de vapor capaz de operar como um sistema de refrigeração do tipo resfriamento de líquido, “*chiller*”, e uma bomba de calor, como pode ser observado na figura 7. É comparado um algoritmo de controle básico baseado na lógica *fuzzy* com o rendimento do controle termostático clássico de ciclos tipo liga/desliga, *On-Off*, no compressor operando na frequência nominal de 50 Hz. Os resultados levantados para o compressor rotativo tipo

scroll apresentou um ótimo rendimento devido à facilidade de operar com frequências mínimas da ordem de 15 Hz em comparação com o compressor recíprocante semi-hermético, que possui o limite inferior de frequência da ordem de 30 Hz. Nesta faixa de frequências reduzidas, abaixo de 30 Hz, o compressor recíprocante apresenta consideráveis vibrações e incremento de ruídos, além de não lubrificar adequadamente os cilindros. Especificamente, no que se refere ao sistema de resfriamento de líquido, operando com diferentes temperaturas de *set point* (7, 11 e 15°C) da água resfriada do evaporador e para diferentes vazões da bomba de água, uma significativa economia de energia da ordem de 20% foi alcançada com o uso do compressor rotativo tipo *scroll*. Resultados similares foram obtidos quando o sistema operou como bomba de calor. O melhor desempenho energético foi obtido quando a velocidade do compressor *scroll* variou. Isso se deve, basicamente, à eficiência global do sistema e também pela menor relação de compressão à medida que a velocidade do compressor diminui.

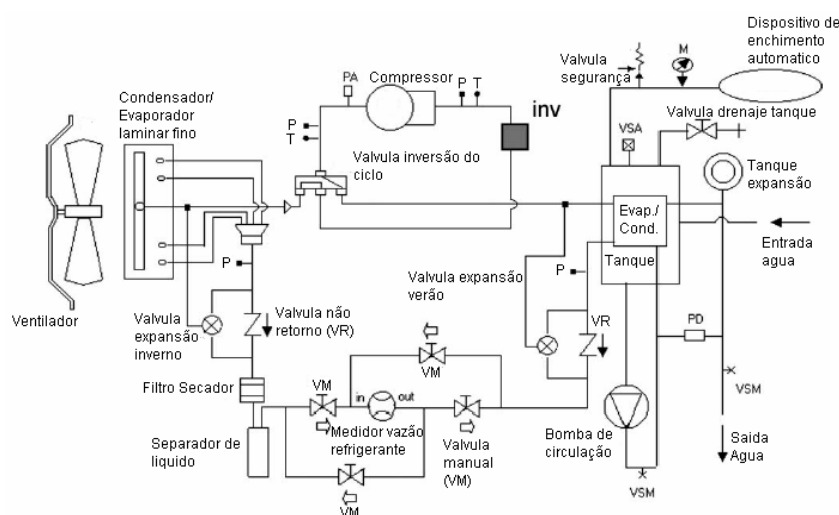


Figura 7. Diagrama esquemático e bancada experimental de Aprea *et al.* (2005).

Aproveitando a mesma bancada, os referidos autores, realizaram novos ensaios substituindo o fluido de trabalho utilizado, R-22 pelo R-417A, conhecido comercialmente como Isceon 59. Esse fluido é bastante utilizado em operação de “*drop-in*” (substituição do fluido refrigerante, mantendo os mesmos equipamentos). Verificou-se, experimentalmente, que o COP e a eficiência energética da planta, quando o R-22 é utilizado como fluido principal, são mais elevadas do que o COP e a eficiência energética obtidos considerando como fluido de trabalho o R-417a, em ambas operações como bomba de calor ou como resfriador de líquido. Como pode ser observado, a figura 8 ilustra a menor eficiência do R-417a em comparação como os resultados obtidos com o R-22.

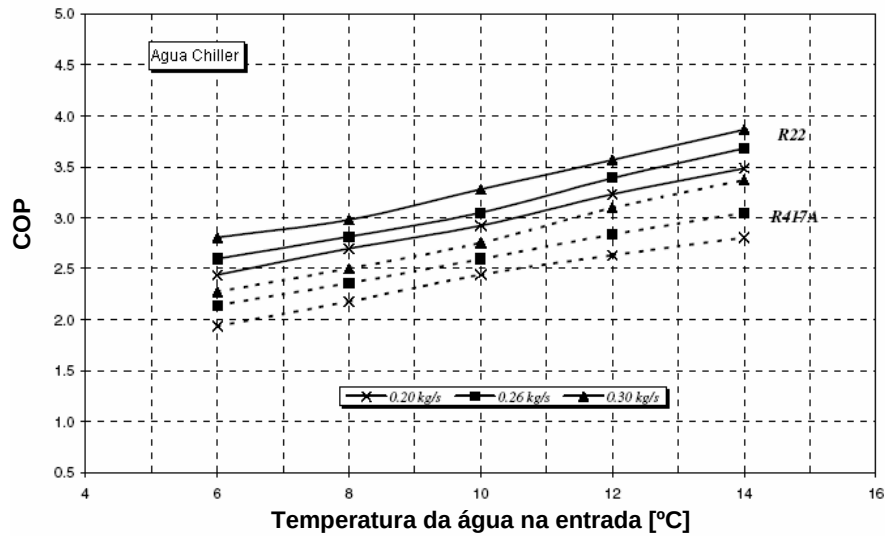


Figura 8. Coeficiente de eficácia em função da temperatura da água de entrada, variando o fluido refrigerante e a vazão mássica, Aprea *et al.* (2005).

Finalmente, um dos trabalhos mais recentes aplicando estratégias de controle inteligente encontrados foi realizado por Borja (2006) que desenvolveu o controle de dois parâmetros distintos no circuito, a válvula de expansão eletrônica e da velocidade de rotação do compressor. Tais controles foram baseados em Redes Neurais Artificiais, neste caso, o controlador preditivo é projetado para trabalhar simultaneamente nos dois atuadores, controlando a diferença de temperatura da água que circula no evaporador ($DT_{w, ev}$) e o princípio de conservação da massa no sistema, como pode ser observado na figura 10, além de controlar a temperatura do refrigerante R134a na entrada no compressor, de forma a manter um $T_{sq} > 10^{\circ}\text{C}$ e $T_{sb} > 0^{\circ}\text{C}$.

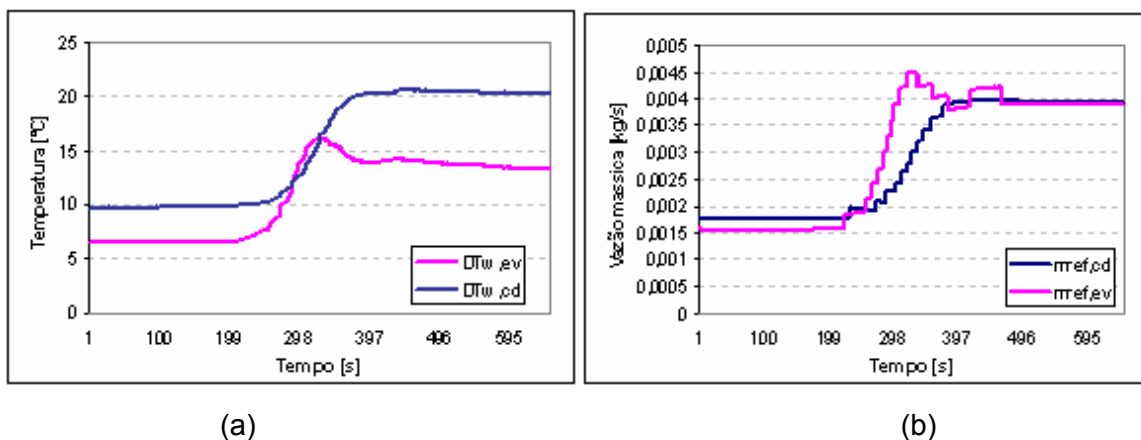


Figura 10. Ação do controlador com Redes Neurais Artificiais: (a) Evolução das diferenças de temperatura ($DT_{w, ev}$; $DT_{w, cd}$). (b) Evolução da vazão de refrigerante nos trocadores. Borja (2006).

CAPITULO III

BANCADA EXPERIMENTAL

3.1. Considerações Iniciais

A refrigeração por compressão é muito utilizada atualmente em diversas aplicações como em residências, comércios, transportes, etc. O seu princípio de funcionamento, como qualquer sistema de refrigeração, tem por objetivo a retirada de calor de um determinado processo e o transporte desta carga térmica para o exterior, produzindo assim o efeito desejado tal como resfriamento ou congelamento. O ciclo básico de refrigeração por compressão é apresentado na figura 3.1 e pode ser analisado sob diversos aspectos, como por exemplo, evaporador, condensador, dispositivo de expansão, compressor, além de outros componentes. Por intermédio dele, é possível acompanhar o desempenho de um equipamento de refrigeração, podendo alterar algumas variáveis, objetivando a melhora da eficiência.

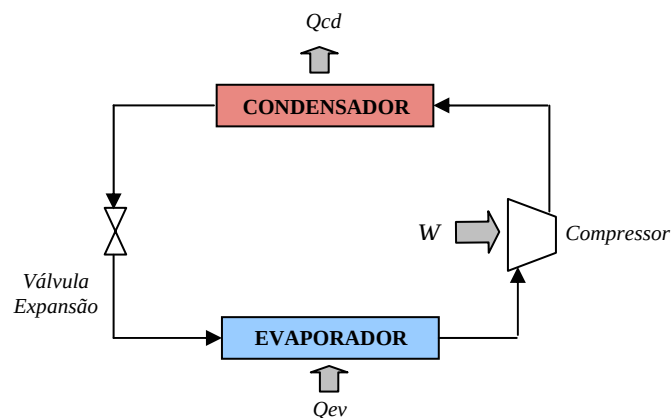


Figura 3.1 - Ciclo básico de refrigeração por compressão a vapor.

A título de ilustração e conhecimento, o ciclo básico, apresentado pela figura anterior, pode ser acompanhado, iniciando com o refrigerante que é comprimido no compressor no estado de vapor superaquecido, tendo sua pressão e temperatura aumentadas e seguindo diretamente para o condensador. O calor ganho no processo de compressão é rejeitado para o exterior, causando assim o resfriamento e conseqüentemente a mudança da fase vapor para líquido. Deixando o condensador o refrigerante se encontra como líquido subresfriado e segue para o dispositivo de expansão (tubo capilar ou válvula de expansão). Esse dispositivo provoca uma queda de pressão e diminui também a temperatura, que correspondente à de evaporação do refrigerante no sistema. Em seguida, o refrigerante, segue para o evaporador, já com um título determinado, geralmente, na faixa dos 20% e é evaporado completamente. Por segurança, o fluido deixa o evaporador como vapor superaquecido. Nesse processo, o fluido refrigerante retira calor do ambiente desejado e segue para o compressor, onde, novamente, reinicia o ciclo.

3.2. Construção da Bancada Experimental

Inicialmente foi doado ao Laboratório de Energia e Sistemas Térmicos (LEST) um aparelho comercial de ar condicionado tipo self-contained com capacidade de 5TR com mais de 20 anos de uso da marca Hitachi, com parte de seus equipamentos danificados, conforme ilustra a figura 3.2.



Figura 3.2 - Fotografia do aparelho de ar condicionado tipo *Self Contained* da marca Hitachi, utilizado na presente pesquisa.

A partir daí, foi sugerido a construção de uma bancada experimental para avaliar o desempenho do referido equipamento, porém alterando sua configuração, já que o condensador e evaporador realizavam a troca de calor com o ar. Nessas condições, foi conseguido junto a uma empresa de trocadores de calor, ACP Termotécnica, um evaporador e condensador de tubos concêntricos com troca de calor com água. Com essas alterações, foi possível controlar e medir as variáveis utilizando água, já que no caso de se operar com o ar seria necessário o controle de parâmetros como a umidade, temperatura, entre outros.

Para o resfriamento da água de condensação, foi utilizado um circuito secundário composto por uma torre de resfriamento, que foi instalada no lado externo ao laboratório. A água de alimentação do evaporador, que era responsável pela variação da carga térmica, foi circulada por intermédio de uma bomba e era proveniente do tanque armazenamento térmico, que continha um resistor elétrico, com potencia de 15 kW comandada por um controle PID programado no controlador lógico programável (CLP). O fluido refrigerante utilizado do circuito principal foi HCFC-22, ou R-22. Em relação à instrumentação, para as medidas de temperatura foram utilizados sensores do tipo PT100 e para pressão, sensores do tipo piezo-resistivos. Foi adquirido, um variador de frequência para controlar a velocidade de rotação do compressor. Um medidor de vazão do tipo coriolis foi adicionado ao circuito principal, complementando a instrumentação.

A aquisição de dados foi realizada por intermédio de uma placa eletrônica com sinal de saída analógica que foi projetada no LEST para essa finalidade. Os sinais analógicos eram convertidos em digitais por intermédio do CLP e os dados eram monitorados e gerenciados através de um programa elaborado no LABVIEW.

A seguir é apresentado o esquema da montagem da bancada experimental, bem como o detalhamento de cada componente.

A figura 3.3 ilustra a bancada experimental que foi construída no início dos ensaios. Como pode ser observado nessa figura, o compressor utilizado era um modelo hermético da Hitachi e pelo tempo de utilização (mais de 20 anos) apresentou diversos problemas, operando de forma irregular, o que acarretou na sua substituição.



Figura 3.3 - Bancada experimental com isolamento no início dos ensaios.

Nessas condições, foi solicitado a uma empresa nacional de compressores, Bitzer compressores, a doação de um modelo de mesmas características, que pudesse substituir o modelo antigo da bancada. Conforme pode ser observado na figura 3.4 o equipamento experimental apresenta inclusive isolamento térmico no condensador e incorpora o novo compressor para os ensaios, (Bitzer, octagon semi-hermético).



Figura 3.4 - Bancada experimental final com isolamento utilizada para os ensaios.

Uma observação interessante deve ser feita a respeito de ciclos reais e ideais, os ciclos reais desviam-se dos ciclos idealizados, devido às perdas de pressão, nos trocadores, processo de compressão não isentrópico, entre outras. Porém, o ciclo ideal serve como uma referência para a análise do ciclo real. Já que um dos objetivos é atingir a melhoria de cada processo que o constitui. Na figura 3.5 é apresentado, num diagrama de pressão em função da entalpia, os principais processos e características de um ciclo ideal (1 - 2 - 3 - 4 - 1) e de um ciclo real (1' - 2' - 3' - 4' - 1').

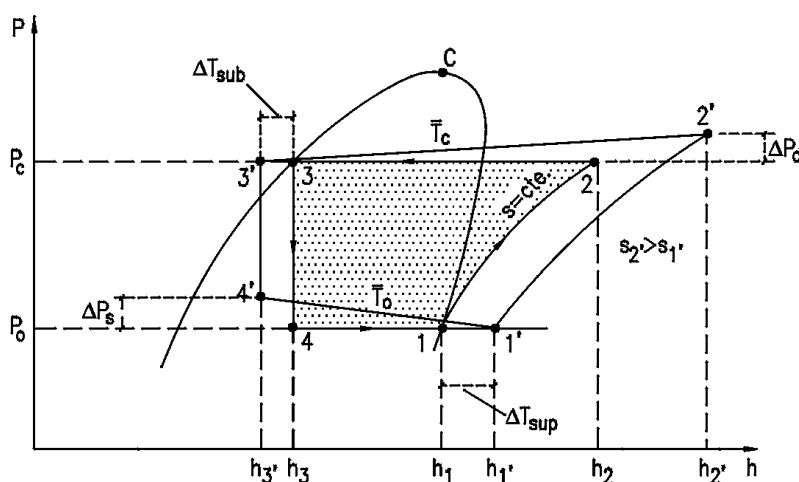


Figura 3.5 - Diferenças entre os ciclos ideal e real de refrigeração por compressão de vapor no diagrama P versus h .

Com o conceito bem fundamentado, é possível prever, por exemplo, um grau de superaquecimento ótimo do fluido refrigerante para evitar qualquer presença de líquido na entrada do compressor, comprometendo o sistema. Por outro lado, um adequado sub-resfriamento do refrigerante permite a garantia da fase líquida na entrada da válvula de expansão, que além de permitir uma boa expansão, melhora o efeito frigorífico.

A seguir será apresentada uma descrição dos principais componentes do sistema que compõe a bancada experimental de ensaios.

3.3. Componentes da Bancada Experimental

3.3.1. Compressor

Na grande maioria de aplicações em sistemas de refrigeração e ar condicionado, o compressor alternativo é o mais utilizado para o processo de compressão dos gases

refrigerantes; trabalhando de acordo com a capacidade de refrigeração requerida, na faixa de operação (temperatura de evaporação e condensação), além de outras especificações básicas. A seguir um detalhamento do compressor utilizado na presente pesquisa é apresentado.

No início dos ensaios, o compressor utilizado foi tipo hermético modelo 502Fh2 de 3,75 kW, alimentação trifásica, 5 Hp da marca Hitachi. Após os problemas mencionados anteriormente, o compressor antigo foi substituído por um modelo semi-hermético que possui no seu interior um motor elétrico trifásico acoplado a um mecanismo tipo biela-manivela, contendo válvulas e câmaras para a descarga do fluido refrigerante. O modelo do compressor *Bitzer* alternativo, semi-hermetico é o Octagon 2DC-3.2, conforme ilustra a figura 3.6 e suas características técnicas são apresentadas na tabela 3.1.



Figura 3.6 - Compressor Alternativo Semi-Hermético 2DC-3.2, Bitzer International (2004).

Tabela 3.1 - Características técnicas do compressor utilizado na bancada

Refrigerante	R-22
Marca	Bitzer
Modelo	2DC-3.2
Temperaturas de operação	$T_{ev}=5^{\circ}\text{C}$ e $T_{cd}=35^{\circ}\text{C}$
Capacidade de Refrigeração	15,14 kW (4,3 TR)
Consumo de Potencia	3,17 kW
Alimentação	Trifásica 220 V / 60 Hz
Corrente de Operação	11,94 A

A figura 3.7, a seguir, mostra a faixa de operação em que trabalha o compressor octagon modelo 2DC-3.2 utilizado na bancada experimental, ilustrando, ainda, a faixa de utilização na presente pesquisa.

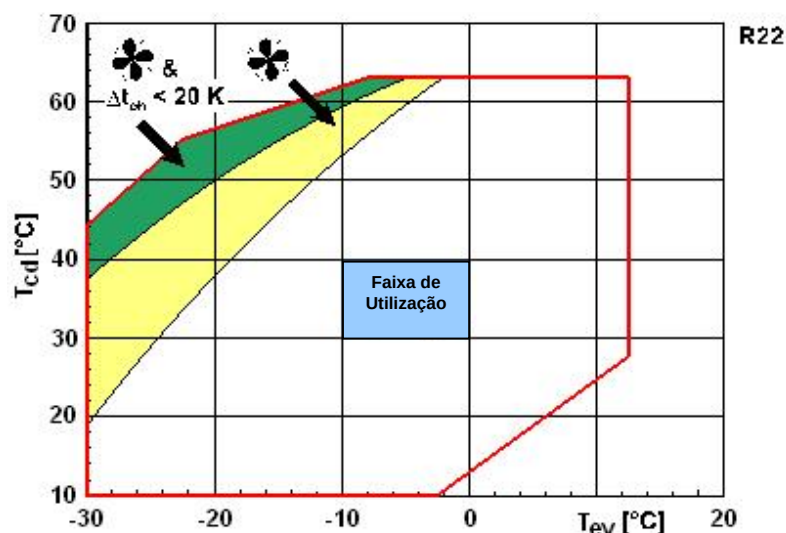


Figura 3.7 - Faixa de operação do compressor utilizado na bancada experimental. Bitzer International (2004).

3.3.2. Condensador e evaporador

Os trocadores de calor utilizados na bancada experimental são de tipo “tubos concêntricos”, conhecidos comercialmente como *Tube in Tube*. Os trocadores de calor (evaporador e condensador) utilizados nos ensaios são compostos por tubo interno de cobre com diâmetro de 15,6 mm. O tubo externo é confeccionado em ferro, com diâmetro externo de 22,2 mm e pintura epóxi. Para o processo de troca de calor, a água escoa através do tubo interior e o refrigerante no tubo externo, onde o escoamento é em contra corrente com o refrigerante entrando na parte superior e água na parte inferior do trocador. Para o condensador e evaporador utilizados no presente trabalho, apresentam suas capacidades nominais de 5 TR e 7,5 TR, respectivamente. É interessante notar que a capacidade do evaporador é superior devido ao circuito frigorífico não possuir um acumulador de sucção, que tem por objetivo proteger o compressor com a entrada de líquido. O único inconveniente na utilização de um evaporador de maior capacidade é que o grau de superaquecimento é incrementado.

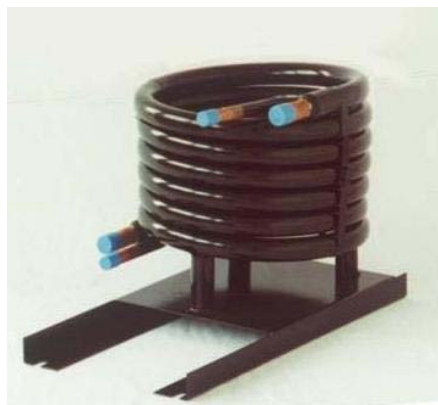


Figura 3.8 - Trocador de calor tipo *Tube in Tube* de 5 TR fabricado pela empresa ACP Termotécnica e utilizado na bancada experimental.

3.3.3. Válvula de expansão

A válvula de expansão termostática, como se observa na figura 3.9, é provavelmente o componente que mais requer conhecimento e habilidade para um perfeito manuseio e operação de um sistema de refrigeração. O superaquecimento é a garantia de que o sistema está operando em segurança. Ela deve estar bem regulada para garantir o perfeito funcionamento do sistema sem, entretanto, comprometer a sua eficiência. Se o superaquecimento for dimensionado para um valor muito maior que o necessário, isso pode ocasionar uma perda da capacidade frigorífica no sistema. Em contrapartida, se for dimensionado para um valor pequeno, pode fazer com que o refrigerante retorne na fase líquida para a sucção do compressor e, desta forma, provocar a quebra do mesmo pelo denominado golpe de líquido.



Figura 3.9 - Válvula Expansão tipo TIXA 5R, fabricada pela Emerson.

A válvula utilizada no presente trabalho é do tipo TIXA 5R foi doada pela Emerson e suas características técnicas são: Entrada: 1/2", Saída: 5/8", Equalização: Externa e Capacidade mostrada na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Capacidade da Válvula de Expansão Termostática Tipo TIXA 5R, em TR.

	$T_{ev} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{ev} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{ev} = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$
$T_{cd} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$	4,8	4,6	4,4
$T_{cd} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$	5	4,8	4,6
$T_{cd} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	5,2	5	4,8
$T_{cd} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$	5,5	5,3	5,1

3.3.4. Filtro secador

Os filtros secadores são componentes de grande importância em um sistema de refrigeração e muito utilizados. Como o próprio nome sugere, o "filtro secador" possui as funções que se resumem, basicamente, em filtrar o fluido refrigerante e retirar a umidade presente no sistema, impedindo que impurezas possam restringir a operação da válvula de expansão, tubos capilares e até mesmo dos compressores. Estas impurezas podem ser sólidas tais como rebarbas metálicas, resíduos de solda ou ainda cobre. Outros tipos de impureza igualmente prejudiciais são as solúveis tais como os ácidos, água, resinas e ceras. O modelo, doado pela Emerson, utilizado na presente pesquisa foi o modelo tipo – ST 120 x 1/2" como ilustra a figura 3.10. Suas características técnicas são: entrada: 1/2", saída: 1/2" e capacidade de absorção de água a 24°C de 8,6.



Figura 3.10 - Filtro Secador ST – EMERSON para R-22, utilizado na bancada experimental.

3.3.5. Controlador Lógico Programável (CLP)

Por definição, o Controlador Lógico Programável, (CLP), é um aparelho eletrônico, de controle independente do processo, que se adapta aos processos mediante um programa específico (software) que contém uma seqüência de operações para executar. Essa seqüência de operações define-se sobre sinais de entrada e saída ao processo, ligados diretamente aos bornes dos módulos de expansão do CLP. A figura 3.11 ilustra o CLP e seus módulos.



Figura 3.11 - Controlador Lógico Programável modelo SCL5/03 da *Allan Bradley*, utilizado na bancada experimental.

O CLP comanda os sinais de saída conforme o programa previamente armazenado em sua memória, a partir dos sinais de entrada. O programa é armazenado no CLP através de um microcomputador (PC), permitindo funções como: depurações de programas, simulação, monitoramento e controle do CLP. Os controladores caracterizam-se pelo sistema tecnicamente avançado, tendo flexibilidade inerente e vantajosas sobre outros sistemas. Seu ciclo de operação desenvolve uma série de varreduras em tempos necessários, onde o controlador varre os dados de entrada, executando instruções do programa, escrevendo suas saídas e mantendo trabalhos de comunicação no padrão de gerenciamento.

Um CLP é empregado comumente em processos industriais que tenham uma ou varias das seguintes necessidades:

- Espaço reduzido.
- Processos de produção que tem mudança periódica.
- Processos seqüenciais e centralizados.
- Maquinaria de processos variáveis e complexos.

Os elementos importantes que todo CLP possui tem em sua arquitetura podem ser visualizados na figura 3.12. São a unidade de E/S (Entradas e Saídas), onde os sinais que chegam dos sensores do processo são codificados e, paralelamente, os decodifica desde a CPU, para posteriormente, encaminhar aos dispositivos atuadores. Nesta unidade existem interfaces de adaptação para as saídas e entradas como proteção dos circuitos internos.

Outros elementos que o CLP possui em sua arquitetura podem ser resumidos como: introdução, alteração e supervisionamento de toda a seqüência e estado interno do CLP. A unidade, também possui dispositivos periféricos que são unidades de E/S, mais memória, unidades de comunicação de rede, etc. Finalmente, a unidade de Interfaces, que é aquela que facilita a comunicação do autômato com outros dispositivos exteriores, como por exemplo, PC, HMI, etc.

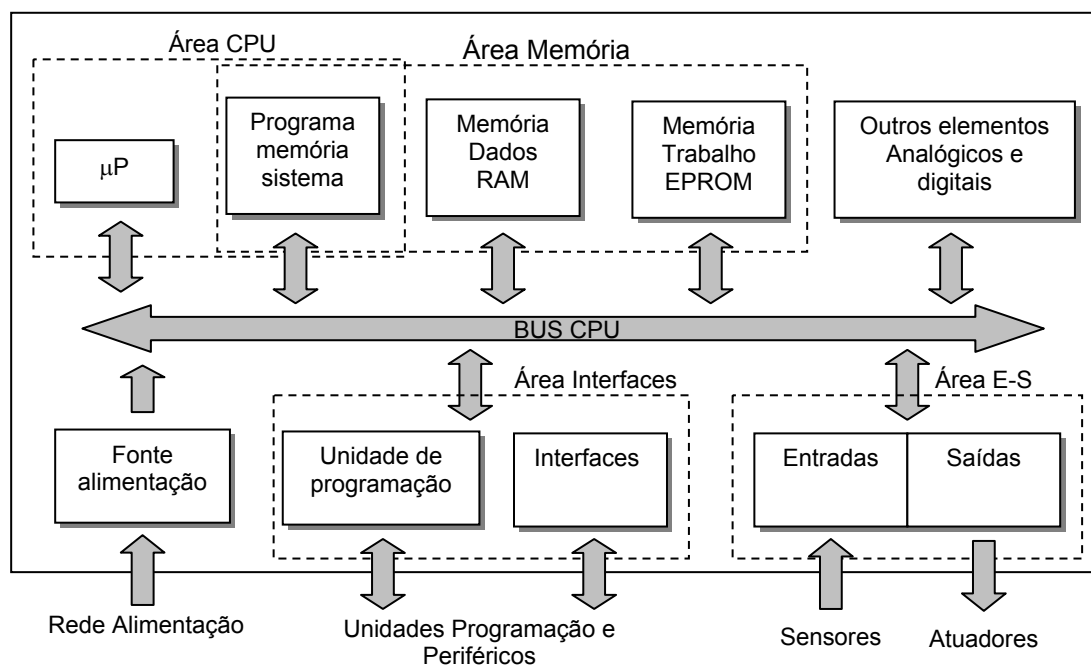


Figura 3.12 - Arquitetura Interna do CLP.

Para o CLP utilizado no presente trabalho, que foi do tipo modular, tem-se como processador principal o modelo SLC5/03, caracterizado por possuir memória de 8 kb, controle de até 4096 pontos expansíveis mediante módulos de entrada e saída, canal DH485 incorporado, canal RS232 incorporado suportando (DF1 *Full – Duplex* para comunicações ponto a ponto, DF1 *Half – Duplex* Mestre /Escravo para comunicação tipo SCADA, ou seja, ponto a multiponto, ASCII para a conexão a outros dispositivos ASCII tais como leitores , etc..) Relógio/Calendário em tempo real incorporado, chave seletora de

modo *RUN*, *REMOte*, *PROGram*, capacidade matemáticas expandidas – trigonometria, PID, exponencial e instruções computacionais.

Na Unidade E/S, o módulo de saída discreto 1746-OW8 pode ser visualizado na figura 3.13, contendo 8 saídas tipo AC/DC, reles, 4 pontos de saídas pelo comum, voltagem de operação nas faixas 5 a 265 Vac / 5 a 125 Vdc a frequências de 47 ate 63 Hz.

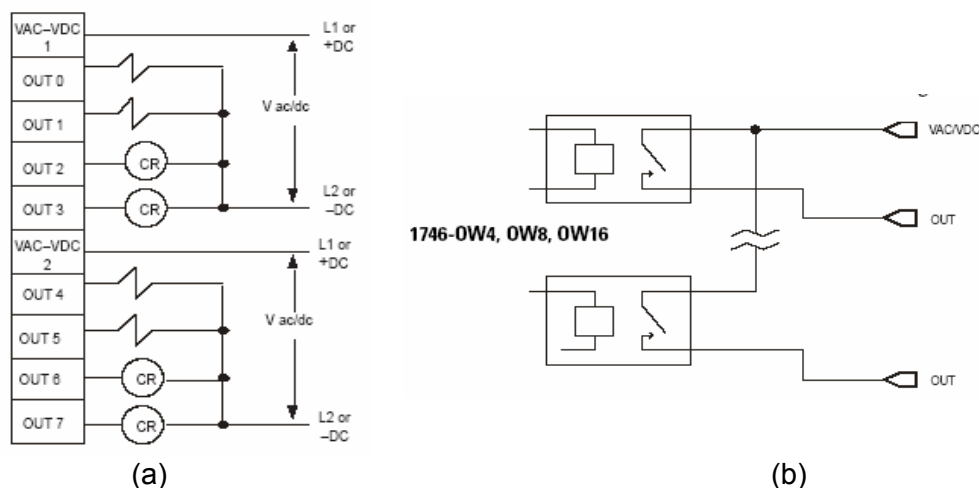


Figura 3.13 - (a). Módulo Expansão 1746-OW8. (b) Circuito elétrico interno de uma saída do Módulo Expansão 1746-OW8. Allan Bradley Company Inc, (2003).

Adicionalmente na unidade E-S foi possível incorporar o módulo de entrada AC 1746-IA8, como pode ser observado na figura 3.14. Este módulo possui 8 entradas para voltagem e operação de 85 to 132 Vac na faixa de frequência 47 a 63 Hz.

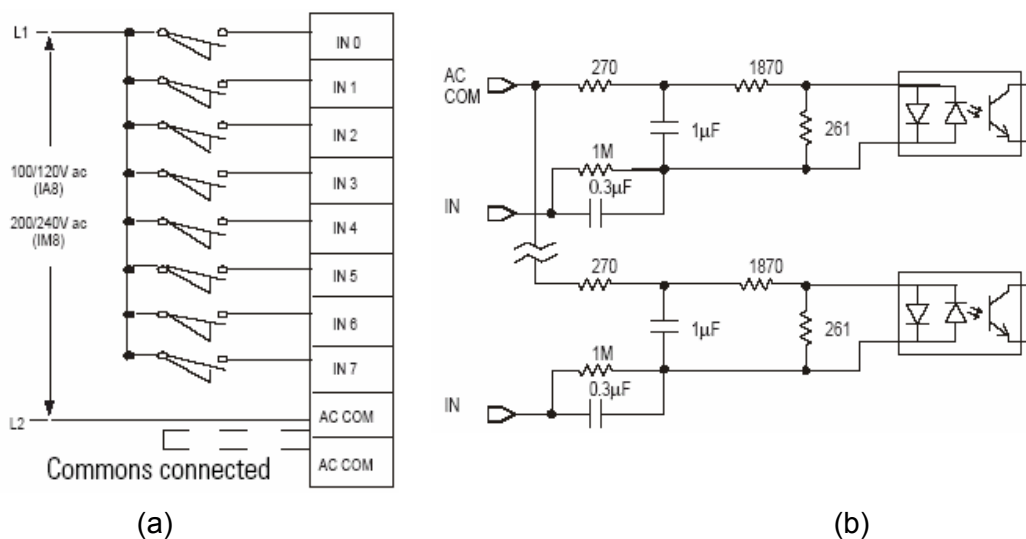


Figura 3.14 - (a). Módulo Expansão 1746-IA8. (b) Circuito elétrico interno de uma saída do Módulo Expansão 1746-IA8. Allan Bradley Company Inc, (2003).

Paralelamente, dentro da unidade E-S, foi incorporado o módulo de entrada para voltagem 1746-NI16V de 16 bits de resolução com 16 canais de entrada analógica, como mostrado na figura 3.15, na qual as faixas de voltagem de entrada analógica são: 0 a 10 Vdc, ± 10 Vdc, 1 a 5 Vdc. Neste caso, é programado o CLP para operar com entradas analógicas em modo referenciado de ± 10 Vdc para os sinais de temperatura e as de modo de 1 a 5 [Vdc] para os sinais de pressão.

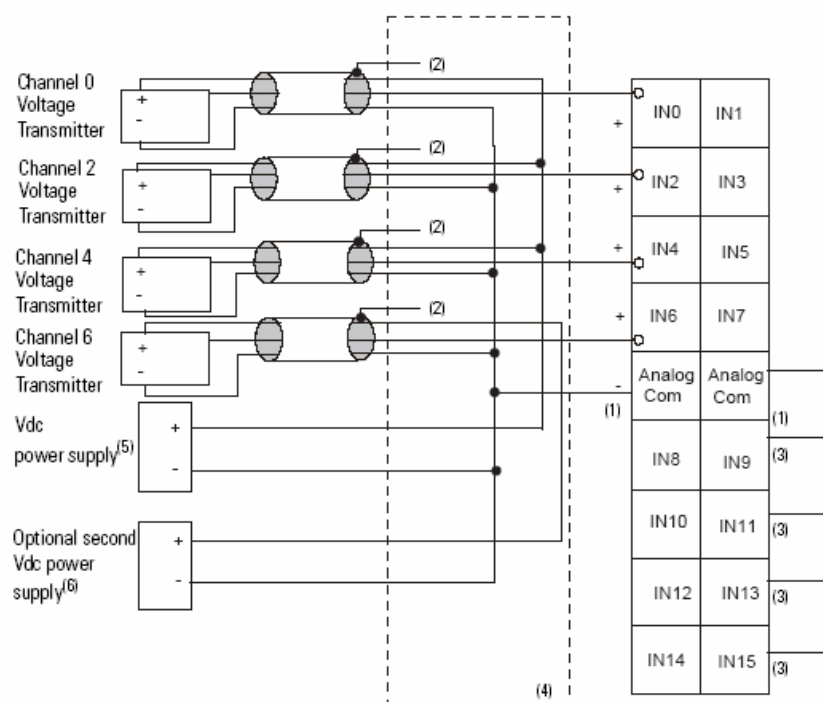


Figura 3.15 - Módulo Expansão 1746-NI16V. Allan Bradley Company Inc, (1999).

3.3.6 Variador de frequência

O Variador de frequência utilizado nos experimentos; tem capacidade para controlar a velocidade dos motores AC até 5 HP, da marca YASKAWA e seu modelo é V7AM23P7, conforme ilustra a figura 3.16. O variador é controlado por intermédio de um microprocessador que incorpora uma tecnologia tipo transistor bipolar com porta isolada (IGBT), o que lhe confere confiabilidade e flexibilidade. Um processamento especial de modulação de duração de impulsos com frequência de repetição de impulso ultra-sônico selecionável que permite o funcionamento do motor em modo silencioso. O variador e o motor têm uma proteção proporcionada por um amplo sistema de funções protetoras programáveis no variador.



Figura 3.16 - Variador de frequência modelo Yaskawa V7AM23P7, utilizado na bancada experimental.

O diagrama elétrico de potência do variador com o motor do compressor é mostrado na figura 3.17.

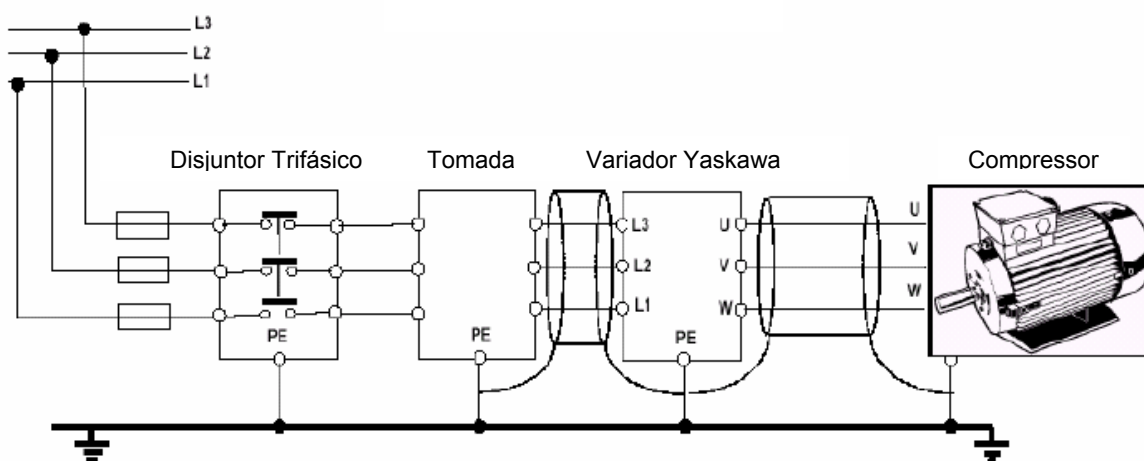


Figura 3.17 - Circuito de instalação trifásico, utilizado no presente trabalho.

O variador de frequência possui um borne de controle, pelo qual os sinais são enviados no modo discreto de controle tais como, arranque, parado e sentido rotação, além de possuir entradas analógicas de 0 – 10 Vdc, conforme pode ser observado na figura 3.18.

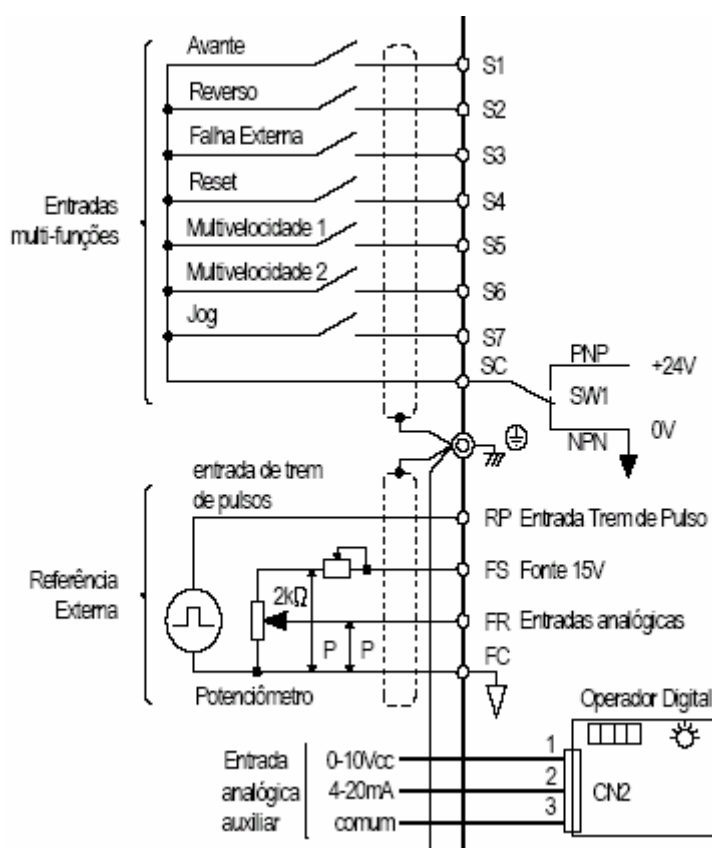


Figura 3.18 - Borne de controle do variador de frequência V7AM23P7. Yaskawa Company Inc (2001).

A programação do variador de frequência foi realizada para seu ótimo funcionamento e o mesmo possui um conjunto de 95 parâmetros, das quais determinam a forma como deve funcionar o variador de frequência, o que proporciona uma programação para funcionamento adequado, entre os quais podem ser destacados os mais importantes:

- Tempo de aceleração
- Tempo de Desaceleração
- Modo de variação da velocidade
- Controle de arranque e parada
- Velocidade máxima (Hz)
- Velocidade mínima (Hz)
- Número de par de pólos do motor, etc..

O variador de frequência comanda o motor do compressor, levando-se em consideração um aspecto muito importante que se refere ao valor da potência do motor, o

qual não deve exceder o valor máximo permitido pelo variador, que no caso da presente pesquisa foi de 3,70 kW.

O variador obtém alimentação através do acionamento de um disjuntor trifásico. A saída de potência permanece desativada até a presença de um sinal discreto ON no borne S1 do variador produzido pelo CLP.

A variação de velocidade proporcional conecta-se aos bornes S6 e S7 para incremento e diminuição da rotação, respectivamente, e referenciadas no borne SC (+Vdc) do variador, onde os sinais discretos são gerados pelo modulo de saídas 1746-OW8 do CLP, como pode ser observado na figura 3.19.

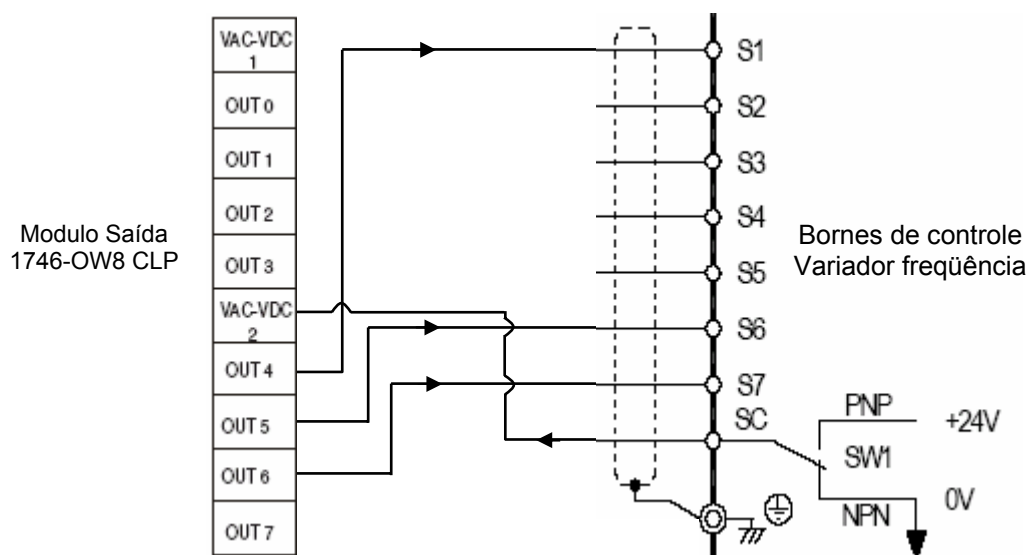


Figura 3.19 - Ligação entre o CLP e variador de frequência.

3.3.7 Medidor de vazão tipo Coriolis

Ferramenta de instrumentação, por o qual, é possível medir a vazão mássica da maioria dos fluidos, quais sejam, multifásicos, líquidos com alta viscosidade, líquidos com uma certa quantidade de vapor, além de gases. Os limites de operação do medidor, necessariamente, deve estar dentro da faixa de temperatura sugerida no catálogo, no caso entre -50 e 200°C. A figura 3.20 ilustra o referido medidor.

O princípio de funcionamento físico desse medidor se dá por intermédio do efeito, ou força tipo *Coriolis*. O fluido quando passa através do medidor possui uma determinada velocidade angular gerada pela excitação dos tubos de medição através de uma bobina de excitação. Essa velocidade angular acelera o fluido aumentando sua velocidade periférica e

a força gerada por esse aumento de velocidade periférica é chamada “Força *Coriolis*”. Os tubos de medição são deformados por essa força e essa deformação é captada por sensores. Dessa forma, a diferença dos ângulos de fase gerada nos tubos quando o fluido escoar é proporcional à quantidade de massa que passa pelos tubos.



Figura 3.20 - Medidor de vazão mássica tipo *Coriolis*, modelo 10MM2104A, utilizado na presente pesquisa.

3.4. Sistema de Aquisição de Dados e Comando

3.4.1. Conceito da Automação como Ferramenta Básica

Ao automatizar um sistema de ar-condicionado ou de refrigeração o usuário passa a ter condições de operar e controlar, a partir de uma central, os parâmetros de um sistema integrado, cuja finalidade é controlar todo o funcionamento e as condições da instalação, usando para isso um software apropriado, além de ferramentas elétricas e eletrônicas. Pode-se, por exemplo, programar, ligar, desligar, mudar “*set points*” de temperatura, capacidade do sistema, ser alertado quanto ao momento de executar tal função, entre muitas outras funcionalidades.

Nesse sentido, é especialmente importante a necessidade da automação, onde o controle e a monitoração de parâmetros sejam primordiais. A integração com sistemas comuns, através de certos níveis que se respeitam na automação, facilita a utilização cada vez maior de equipamentos que utilizam protocolos de comunicação que possuam uma infra-estrutura organizada e a conseqüente diminuição do erro. Na figura 3.21 se observa a arquitetura geral do sistema supervisionado com seus níveis correspondentes que foi desenvolvido neste trabalho.

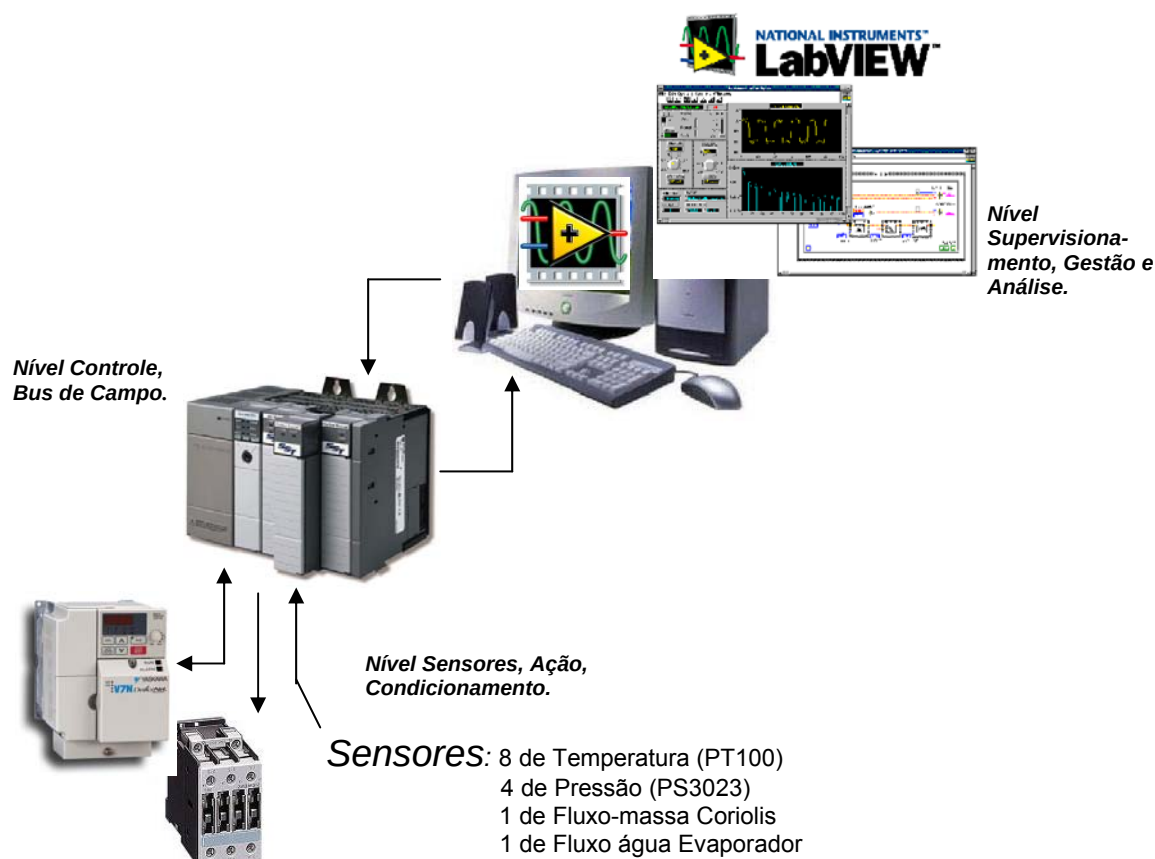


Figura 3.21 - Arquitetura geral do sistema supervisionado.

3.4.2. Nível Sensores / Ação / Condicionamento

Este nível se baseia no relacionamento físico dos elementos básicos de sensores e atuadores com as variáveis do sistema. Para a leitura das diferentes grandezas físicas como a temperatura, pressão, entre outros, são transformados os sinais elétricos de forma analógica pelos sensores, usualmente em forma de tensão (ordem de mV). O sinal vai a ser adaptado ao nível de entrada do conversor analógico-digital (A/D) no módulo de expansão de entrada para voltagem 1746-NI16V do CLP. A figura 3.22 apresenta as etapas para a medição e condicionamento dos sinais.

Os amplificadores utilizados foram do tipo amplificador de instrumentação, devido à sua alta impedância de entrada, poucas mudanças da tensão deslocamento (*offset*), baixas correntes de polarização de entrada, fácil ajuste do ganho mediante uma resistência externa e alta relação de rejeito de modo comum (CMRR). Usualmente, após o amplificador, um filtro ativo ao ruído (componentes alta frequência e ruído por interferência) é utilizado com o objetivo de se manter limpo e adequado o sinal.

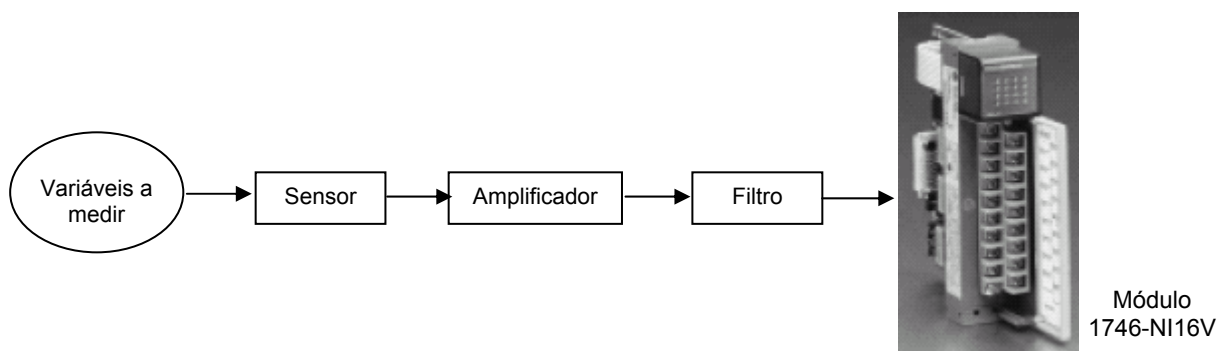


Figura 3.22 - Esquema das etapas para medição e condicionamento das variáveis

A temperatura é um parâmetro físico bastante utilizado em sistemas de refrigeração, permitindo aplicação da eletrônica. A diversidade de suas aplicações vem condicionando igualmente uma grande proliferação de sensores, desde a simples união bimetálica até os dispositivos semi-condutores mais complexos.

Os sensores de temperatura aplicados na bancada de ensaios foram os dispositivos RTD de 3 fios, modelo PT100, construídos com uma resistência de platina (PT). A platina é o metal que oferece uma margem linear mais ampla, possuindo boa sensibilidade, precisão e exatidão. Normalmente, possuem uma resistência entre 20 Ω e 20 k Ω . A vantagem mais importante é que apresenta um comportamento linear de +10 mV/°C e opera com alimentação que varia de 4 a 30 Vdc, além de apresentar comportamento linear dentro do faixa de temperaturas entre -200°C e 850°C. O método empregado para medir as pequenas mudanças da resistência do sensor tipo PT100, consiste em dois divisores de tensão em paralelo, um dos quais refere-se ao transdutor de temperatura. Projeta-se de forma que em repouso ambos divisores possuam a mesma tensão ($E_o=0$ V) tendo como referência a resistência interna (RT) do PT100 a 0°C vale 100 Ω , para assim só medir a diferença de tensão entre as saídas, obtendo o sinal que dependerá da variável a ser medida. Esta estrutura é conhecida como ponte de *Wheatstone*, como se mostra na figura 3.23, a qual permite aumentar a sensibilidade do sistema, com objetivo de se situar diversos transdutores nos braços pertinentes da ponte.

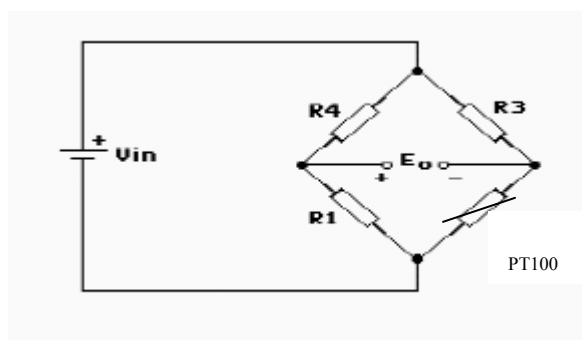


Figura 3.23 - Ponte de *Wheatstone*.

Sua calibração é apresentada em forma gráfica, onde no eixo da abscissa tem-se a temperatura e na ordenada à resistência interna (R_T) do PT100, como é mostrado na figura 3.24.

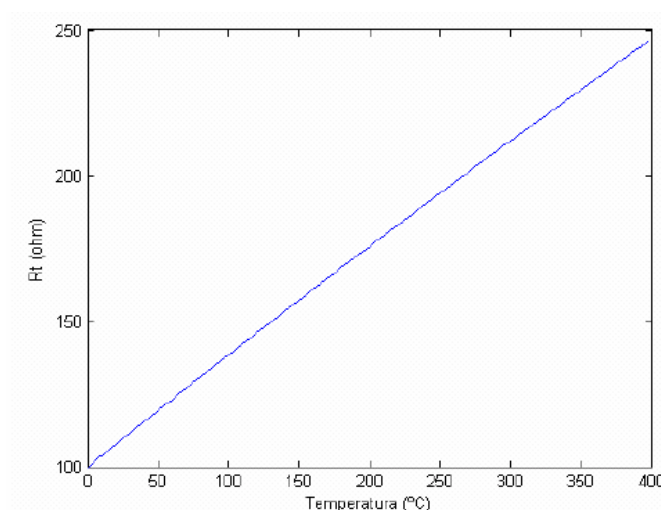


Figura 3.24 - Curva temperatura em função do R_T do PT100.

Para o condicionamento dos sinais de temperaturas medidos pelos sensores PT100, foi utilizado o circuito integrado INA125AP (doado pela *Texas Instruments*), caracterizando-se por ser um amplificador de instrumentação de alta qualidade, que utiliza uma ponte de excitação *Wheatstone*. Para entradas diferenciais de precisão, a voltagem de referência é ajustada externamente com +10 Vdc, baixa voltagem, *offset* < 250 μ V, alto CMRR > 100 dB, proteção de até 40 Vdc em suas entradas analógicas e voltagem de alimentação dupla ± 10 Vdc facilitando o acoplamento de grande variedade dos referidos sensores. Na figura 3.25 se ilustra o circuito elétrico de condicionamento para um sensor PT100.

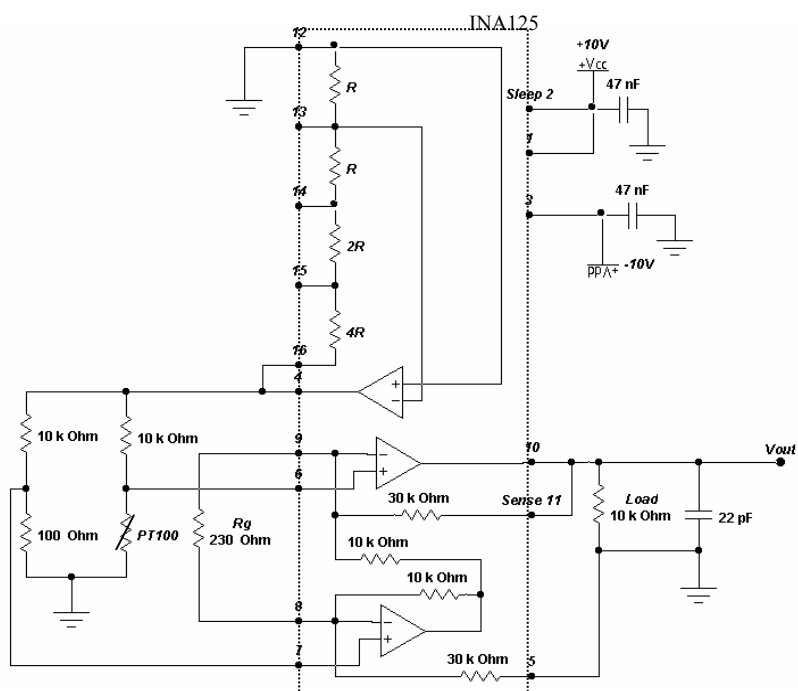


Figura 3.25 - Circuito para condicionamento os sinais dos sensores de temperatura tipo PT100. Texas Instruments Incorporated (2000).

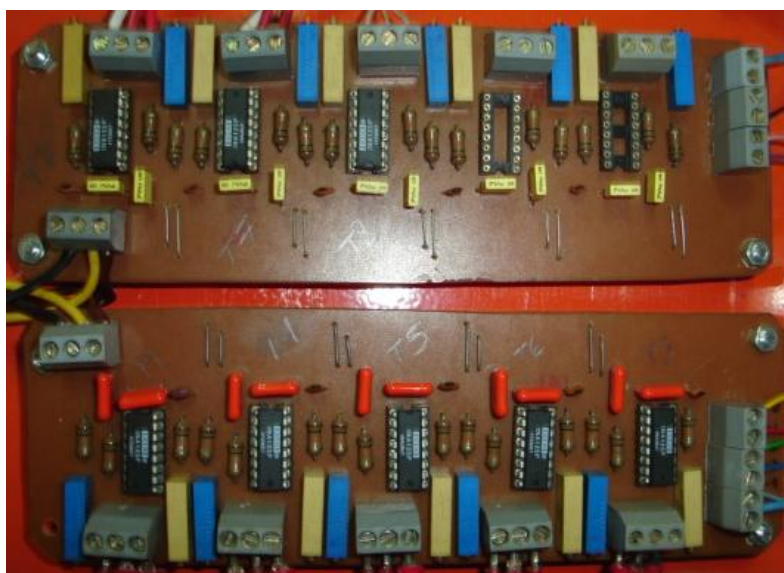


Figura 3.26 - Fotografia ilustrando o circuito para condicionamento dos sinais de temperatura dos sensores tipo PT100, utilizado no presente trabalho.

Para a medição das pressões foram utilizados transdutores pressão tipo piezo-resistivos PA3023, marca *IFM* com faixa de operação de 0 a 25 bares relativos. Neste tipo

de sensores a medição é realizada por intermédio de um diafragma interno revestido por um material piezo-resistivo. O material piezo-resistivo possui uma resistência elétrica variável à tensão mecânica a que se encontra submetido. Os materiais piezo-resistivos são feitos de material semiconductor extrínseco, a partir do adicionamento de impurezas de determinado tipo para se obterem materiais do tipo P ou do tipo N. Nesse sentido, o material semiconductor depositado por estampagem sobre o diafragma, gera resistências cujo valor e variações são medidas pela deformação do diafragma e a conseqüente pressão que sobre este se encontra aplicada. Uma ilustração do transdutor de pressão utilizado no presente trabalho pode ser observado na figura 3.27.



Figura 3.27 - Ilustração do transdutor de pressão modelo PA3023, IFM electronics (2003).

Na tabela 3.3 são apresentadas as especificações técnicas dos transdutores de pressão utilizados neste trabalho.

Tabela 3.3 Características técnicas dos sensores de pressão.

Voltagem de operação [Vdc]	10,8 até 30
Faixa de corrente [mA]	4 até 20 (600Ω)
Temperatura média [°C]	-25 até +80
Temperatura máxima [°C]	-40 até +100
Resolução [bar]	0,01

Para o condicionamento dos sinais de pressões, medidos pelos transdutores PA3023 utilizou-se o circuito integrado INA111 (doador pela *Texas Instrument*), com amplificador de instrumentação de entrada tipo FET, de alto e excelente rendimento. Seu ganho pode ser configurado desde 1 até 1.000, a partir de um resistor exterior (R_g). As entradas tipo FET reduzem os ruídos dos sinais de voltagem. Na figura 3.28 se mostra o esquema do condicionamento dos sinais de pressão que foram utilizados neste trabalho.

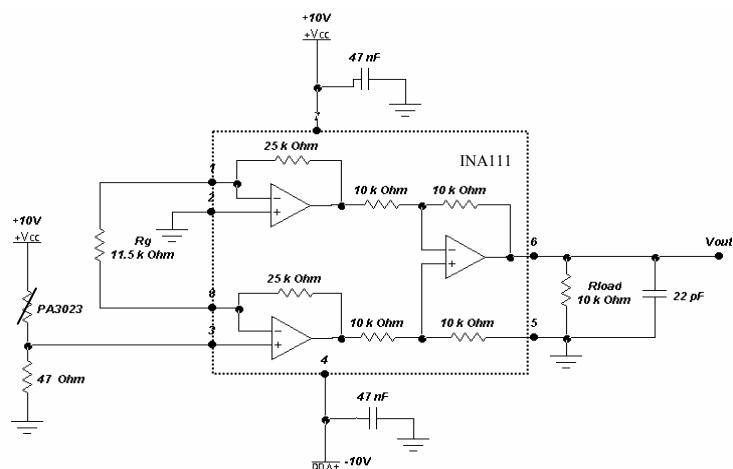


Figura 3.28 - Circuito de condicionamento sinais dos transdutores de pressão modelo PA3023. Texas Instruments Incorporated (1998).

Para o condicionamento dos sinais das grandezas de vazão do refrigerante R-22 do circuito principal e a vazão de água que passa pelo evaporador, que são lidos no medidor de vazão tipo Coriolis e num medidor de vazão tipo turbina, SIGNET 8512 GF, respectivamente, foram realizadas através do mesmo circuito integrado INA111, com um ganho configurado de 5 a partir de um resistor exterior $R_g=10\text{ k}\Omega$ com uma pequena mudança no circuito, devido aqueles transdutores possuírem saída analógica de corrente 4–20 mA. Uma foto do circuito para o condicionamento dos sinais de pressão, vazão de refrigerante e vazão de água é apresentada pela figura 3.29.



Figura 3.29 - Foto do circuito para o condicionamento dos sinais de pressão, vazão de refrigerante e vazão de água do evaporador.

Finalmente, neste nível, o condicionamento para o sinal de comando desde o CLP, para acionar e desligar a bomba de água do evaporador e a saída do controle PID para ligar ou desligar a resistência elétrica no reservatório de armazenamento térmico foram realizadas por intermédio de atuadores trifásicos, como mostra as figuras 3.30 e 3.31.

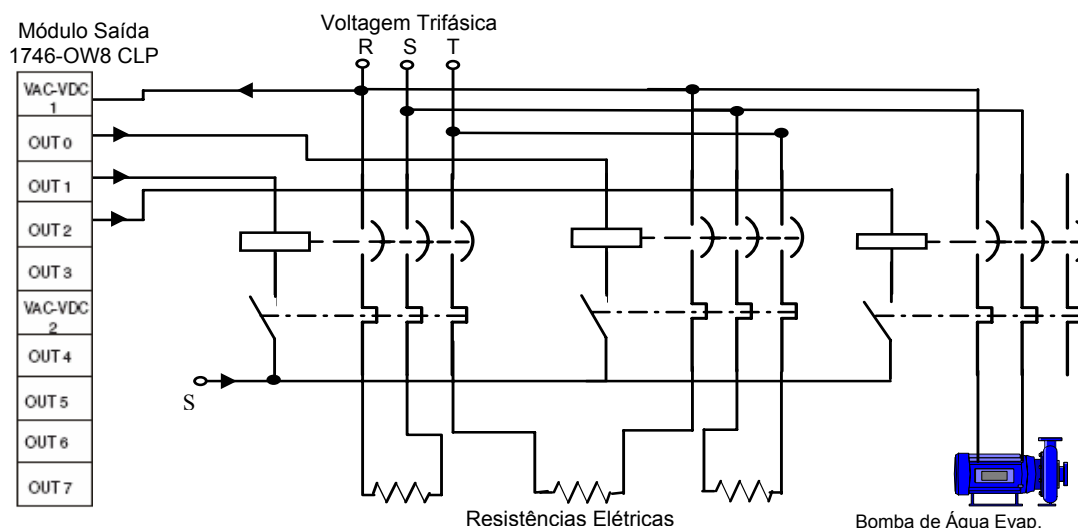


Figura 3.30 - Circuito elétrico para resistência elétrica e bomba de água do evaporador.



Figura 3.31 - Resistência elétrica imersa no reservatório de armazenamento térmico para o evaporador, ilustrando, ainda, o isolamento térmico utilizado.

3.4.3. Nível de Controle (Nível de campo)

Neste nível, baseado na configuração, programação e ferramentas do CLP como ponto central de comando para os atuadores e sensores, de maneira que operem de forma conjunta no sistema de refrigeração. Isso permite o ajuste e personalização das necessidades para cada caso específico, seja em lógicas de segurança, controle, conversão analógica/digital e os sinais dos diferentes sensores. Para o CLP utilizado na presente

pesquisa, modelo SLC5/30 através do software *Rslinx* de *Allan Bradley*, utilizando o utilitário *OPServer*, foi permitido desenvolver uma comunicação dos dados dinâmicos entre softwares de uma mesma plataforma.

A ferramenta *Rslinx* permite diferentes tipos de comunicação serial ou multi-protocolo com o CLP. Como se pode observar na figura 3.32 a tela de visualização e configuração na comunicação programada entre o CLP e o computador.



Figura 3.32 - Comunicação programada entre CLP e o computador.

A troca de informação entre o CLP e o PC, que se dá por intermédio do *Driver OPServer Rslinx*, está definida através de pacotes denominados de TAG (registros dinâmicos). Estes estão pré-estabelecidos como registros internos definidos pelo CLP em comum acordo com uma conexão hierárquica, como pode ser visualizado na figura 3.33.

RSI - OPC Test Client - [~RSLinx OPC Server]			
File Server Group Item Log View Window Help			
IN ANALOGAS (Actual Rate: 1000)	ItemID	Sub Value	Sub Quality
SALIDAS (Actual Rate: 1000)	[CONEXION1]N7:50	16	Good
ENTRADAS (Actual Rate: 1000)	[CONEXION1]N7:58	16385	Good
OUT ANALOGAS (Actual Rate: 1000)	[CONEXION1]N7:51	16	Good
REGISTROS IN ANALOGAS (Actual Rate: 1000)	[CONEXION1]N7:52	16	Good
	[CONEXION1]N7:53	16	Good
	[CONEXION1]N7:54	16	Good
	[CONEXION1]N7:55	16	Good
	[CONEXION1]N7:56	16	Good
	[CONEXION1]N7:57	16	Good
	[CONEXION1]N7:59	16385	Good
	[CONEXION1]N7:60	16385	Good
	[CONEXION1]N7:61	16385	Good
	[CONEXION1]N7:62	16385	Good
	[CONEXION1]N7:63	16385	Good
	[CONEXION1]N7:64	16385	Good
	[CONEXION1]N7:65	16385	Good

Figura 3.33 - Grupos de TAG (Registros dinâmicos).

A filosofia de programação por parte do CLP é realizada através da Linguagem *LADDER*. Essa linguagem é usada para programar CLP's. Diferentes de linguagens de programação comuns, a *LADDER* é uma linguagem gráfica. Essencialmente, a mesma representa redes de conexões de relés, temporizadores, contadores, comutadores, sinais de relógio, linhas de comunicação, operações de comparação, cálculos de valores para variáveis e operações de conversão. A configuração de trabalho do CLP possui algumas características especiais, como por exemplo, a configuração do CLP para se estabelecer os canais de trabalho. Um exemplo da configuração de trabalho do CLP se observa na figura 3.34.

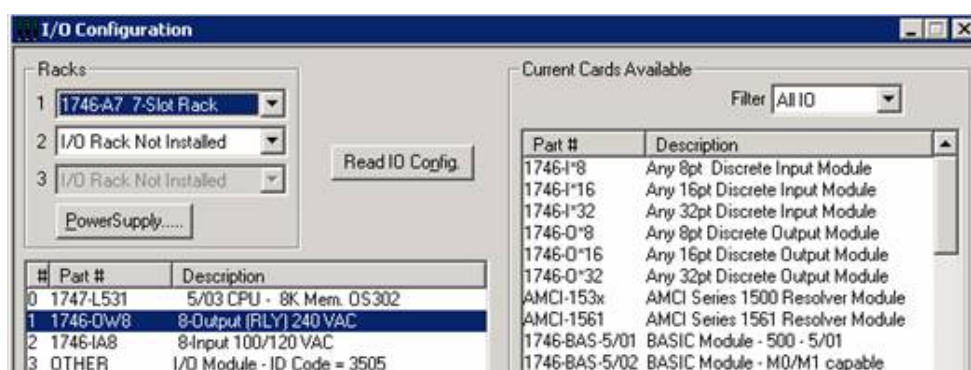


Figura 3.34 - Configuração de trabalho do CLP.

3.4.4. Nível Supervisionamento, Gestão e Análise

Por último, nasce da possibilidade de monitorar todos os dispositivos existentes no equipamento experimental através de um sistema de comunicação adequado, previamente estabelecido, com o objetivo de se analisar a planta com ajuda de softwares supervisores programados no computador. Tem-se uma visualização do sistema de maneira detalhada desde alarmes, falhas ou alterações em tempo real. Com isso, é possível estabelecer bases em gestão e análise que proporcionem ferramentas em relação ao rendimento e operação da bancada experimental.

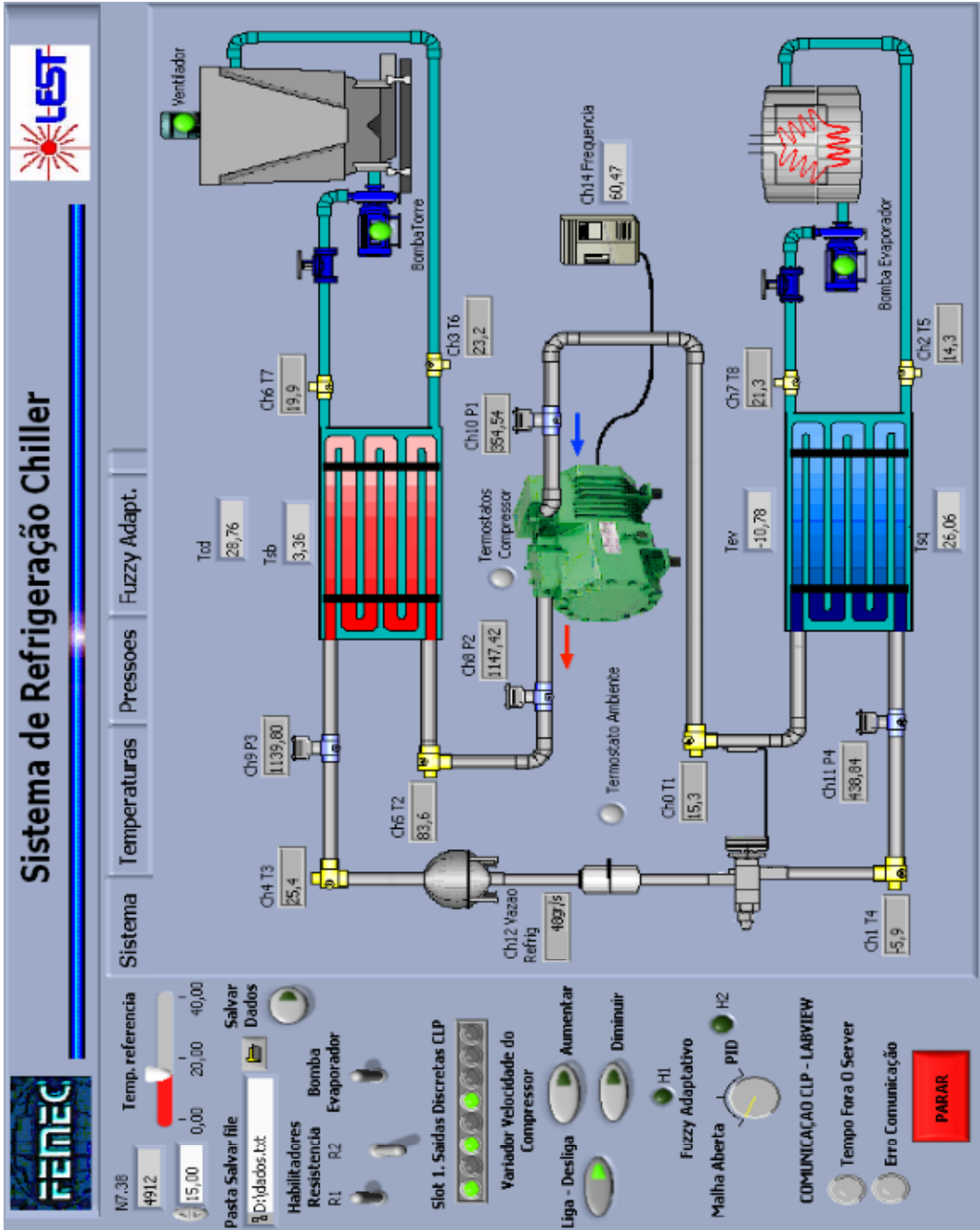
Foi construída uma interface de monitoramento implementada em LABVIEW facilitando ao usuário a observação da evolução do comportamento das temperaturas e pressões. Os sinais adquiridos pelos sensores são convertidos de Analógico para Digital pelo CLP, para logo ser calibrados por equações implementadas dentro do programa.

As telas são apresentadas nas figuras 3.36 e 3.37. A primeira consiste num painel frontal de supervisão de diferentes variáveis do ciclo de refrigeração mostrados (aquisição se dá a cada 1 segundo), dentro da janela, a facilidade de ativar e desativar as 8 saídas do

módulo de saída discreto 1746-OW8 desde o computador e monitorar as 8 entradas do módulo de entrada discreto 1746-IA8 que fazem parte do CLP. A figura 3.35 apresenta a foto do painel elétrico da bancada experimental, contendo o CLP e os circuitos de condicionamento de sinais. A figura 3.36 apresenta a janela principal de supervisão do sistema.



Figura 3.35 - Foto do painel elétrico principal da bancada experimental.



CAPITULO IV

CONTROLE ADAPTATIVO

4.1. Introdução

Por muitos anos, os desenvolvimentos dos atuais algoritmos para o controle dos processos simples e complexos foram baseados em teorias de sistemas lineares, teorias de controle ótimo, teorias de controle adaptativo e controle robusto, com ampla base teórica. Com aqueles algoritmos, procurou-se buscar soluções que apresentem simultaneamente boas características de robustez e excelência no desempenho dos sistemas, os mais comumente utilizados nestas soluções é o controle tipo Difuso (Lógica fuzzy ou *Fuzzy Control* - FC). A estratégia do controle atualmente apresenta boa aplicação e permite utilizar o conhecimento de natureza heurística com o objetivo de controlar o sistema. Algumas modificações neste tipo de controle suscitaram nos últimos tempos o aparecimento dos controladores *Fuzzy* adaptativo. Este capítulo tem por objetivo apresentar os conceitos dos controladores *Fuzzy* adaptativos, partindo do conceito fundamental básico da lógica *Fuzzy* que será apresentada em mais detalhes a seguir.

4.2. Fundamentos da Lógica *Fuzzy*

A grande potencialidade desta estratégia de controle é a possibilidade de expressar operações e controlar o sistema mediante conceitos básicos, eliminando os altos conteúdos matemáticos e físicos que seriam necessários para o controle de um processo (controle clássico), permitindo aproximar intuitivamente um operador mediante a construção de

regras. Cada regra, por sua vez, consiste num conjunto de expressões condicionais (se - então), onde a primeira parte é denominada de antecedente e a segunda, conseqüente.

A lógica *fuzzy* baseia-se em uma série de conceitos básicos:

- Entrada *Crisp*: são as entradas do sistema, como por exemplo, o valor de temperatura de um ponto específico do sistema de refrigeração.
- Grau de Pertinência: Representa o grau de associação que uma entrada *Crisp* pertence a uma função de pertinência e é representada pela letra grega $\mu(x)$ que vincula um número (entre 0 e 1) a cada elemento (x) do universo de discurso (figura 4.1). Todo elemento no universo de discurso é membro de um conjunto difuso com um determinado grau.

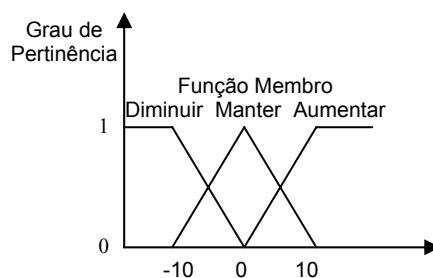


Figura 4.1 - Conceitos básicos dos conjuntos difusos.

- Valores Lingüísticos: nome descritivo para identificar os conjuntos difusos. Tomando palavras ou orações como valores. O conjunto de valores que este pode tomar é chamado de conjunto de termos (*Term set*).
- Função Pertinência: função $\mu(x)$ que define o conjunto difuso ao qual uma variável de entrada *crisp* é associada, sendo que esta pode pertencer a um ou mais conjuntos ao mesmo tempo.
- Universo de discurso – representa o conjunto de todos os possíveis valores que a variável do sistema (entrada/saída) pode assumir.
- Domínio – a faixa de valores no universo de discurso em que é mapeada por uma função de pertinência.

Portanto, a partir dos conceitos mencionado anteriormente, desenvolve-se a metodologia básica de um controlador *fuzzy*, compreendendo a construção de uma base de regras com aqueles operadores lógicos e funções de pertinência. O controlador *fuzzy* essencialmente mapeia, por meio de um processo de inferência, variáveis de entrada em variáveis de saída.

A implementação do controlador, utilizando a lógica *fuzzy*, obedece normalmente as seguintes etapas:

Etapa 1: caracterização do intervalo de valores que as variáveis de entrada e as variáveis de saída podem assumir (definição do universo do discurso);

Etapa 2: definição de um conjunto de funções (as funções de pertinência) que mapeiam as variáveis de entrada e de saída do universo do discurso;

Etapa 3: definição de um conjunto de regras, usando operadores lógicos e descritores lingüísticos, que buscam estabelecer uma relação entre os valores de entrada e os valores de saída;

Etapa 4: uma vez obtidas as regras, passa-se à fase de tradução matemática da linguagem simbólica construída. Isto é realizado através da utilização de operadores lógicos definidos pela teoria dos conjuntos *fuzzy*. Para tanto são necessárias três sub-etapas distintas: a *fuzzificação* das entradas, a aplicação de um mecanismo composicional de inferência e a *defuzzificação* das saídas.

A figura 4.2 apresenta de maneira esquemática os componentes básicos de um controlador *fuzzy*.

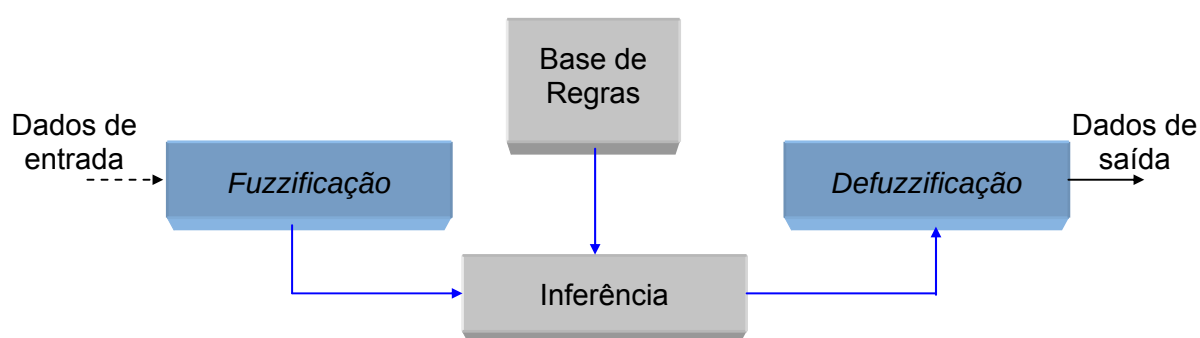


Figura 4.2 - Controlador *Fuzzy* com seus componentes básicos.

4.2.1. Base de regras

A base de regras tem por objetivo representar de forma sistemática a maneira como o controlador gerenciará o sistema sob sua supervisão (Driankov et al, 1996). A forma mais geral de uma regra lingüística é:

SE premissa **ENTÃO** consequência

Para Driankov *et al*, (1996) e Ross (1995), as premissas, também chamadas de antecedentes, são associadas com as entradas do controlador *fuzzy* e formam a parte das regras representada à esquerda, enquanto as consequências, que também são conhecidas como ações, estão associadas às saídas dos controladores.

Relacionadas às variáveis lingüísticas do processo, pode-se estabelecer os antecedentes ou estados do processo. Driankov *et al*, (1996). e associá-los com ações de controle. Para exemplificar a utilização da base de regras, toma-se como exemplo o controle de uma caldeira, onde se estabelece uma relação entre a temperatura interna da unidade, com a vazão necessária de água para o seu resfriamento, o que produz as seguintes regras:

SE temperatura é alta **ENTÃO** vazão de água é alta
SE temperatura é baixa **ENTÃO** vazão de água é baixa
SE temperatura é estável **ENTÃO** vazão de água é normal

O exemplo dado, aparentemente simples, é capaz de manter estável a temperatura em uma caldeira, desde que os conjuntos *fuzzy* envolvidos tenham uma definição condizente com a realidade.

Portanto é este conhecimento – o da experiência – que as regras *fuzzy* representam, sendo perfeitamente inteligível o seu significado. Numa base de regras, há sempre um número finito de regras que pode ser estabelecido, depois que se determina o número de entradas e saídas necessárias ao sistema de controle, os predicados lingüísticos (número, distribuição e forma das funções de pertinência) são escolhidos para cada uma destas variáveis.

4.2.2. Fuzzyficação

A *fuzzyficação* é o processo de associar ou calcular um valor para representar um grau de pertinência da entrada em um ou mais grupos qualitativos, chamados de conjuntos

difusos. O grau de pertinência é determinado por uma função de pertinência que foi definida com base na experiência ou intuição. Funções de pertinência são o meio pelo qual um controlador é sintonizado para alcançar respostas desejadas a determinadas entradas.

O número e a forma das funções de pertinência em conjuntos difusos são escolhidos dependendo da exatidão, resposta, estabilidade, facilidade de implementação, manipulação e manutenção requeridas pelo sistema. As funções de pertinência triangulares e trapezoidais são as mais comuns. Os conjuntos difusos devem abranger o eixo X, cobrindo todo o intervalo, ou o universo de discurso, para uma entrada de um sistema, mapeando para o intervalo de 0 a 1 do eixo Y as pertinências de uma entrada.

4.2.3. Inferência

Depois das variáveis lingüísticas serem interpretadas, por meio da *fuzzyficação*, a próxima etapa é a descrição das situações nas quais há reações, ou seja, a determinação das regras SE-ENTÃO.

O lado SE (*IF*) de uma regra contém uma ou mais condições, chamadas antecedentes que constituem uma premissa; o lado ENTÃO (*THEN*) contém uma ou mais ações chamadas conseqüentes. O antecedente da regra contém uma ou mais condições, o conseqüente contém uma ou mais ações. O antecedente corresponde diretamente aos graus de pertinência calculados durante o processo de *fuzzyficação*. Cada antecedente tem um grau de pertinência indicado para ele como resultado da *fuzzyficação*. Durante a avaliação das regras (a inferência), a intensidade é calculada com base em valores dos antecedentes e estão indicadas para saídas difusas da regra.

4.2.4. Defuzzyficação

A *defuzzyficação* converte um conjunto difuso de saída de um sistema em um valor clássico correspondente. Este processo é importante para decifrar o significado das ações difusas usando funções de pertinência e também para resolver conflitos entre ações de competição. A avaliação das regras associa potências (intensidade) para cada ação específica na atividade de inferência. Contudo, um outro processamento, ou *defuzzyficação*, é necessário que seja executado por duas razões: a primeira é decifrar o significado de ações vagas (difusas), utilizando funções de pertinência; a segunda é resolver os conflitos entre ações divergentes, que podem ter sido acionadas durante certas condições na avaliação das regras. Cabral (1994).

4.3. Controlador *Fuzzy* Adaptativo

São controladores que se reajustam automaticamente para adaptar-se a novas características do processo que se deseja controlar, Cardenas (2002). A necessidade de identificar estas mudanças e de se adaptar a novas condições acrescenta aos controladores *fuzzy* adaptativos dois componentes extras, que não estão presentes nos controladores *fuzzy* convencionais, como pode ser observado na figura 4.3. O primeiro componente é o “Monitor do Processo” cujo trabalho é detectar as mudanças nas características do processo, pode ser uma medida do rendimento de atuação do controlador ou um parâmetro baseado no estado do processo. O segundo componente adicional é o “mecanismo de adaptação”, a partir da informação proporcionada pelo monitor do processo, este atualiza os parâmetros do controlador tais como: fator de escala de cada variável, conjunto difuso de cada nome lingüístico ou as regras da base de conhecimento.

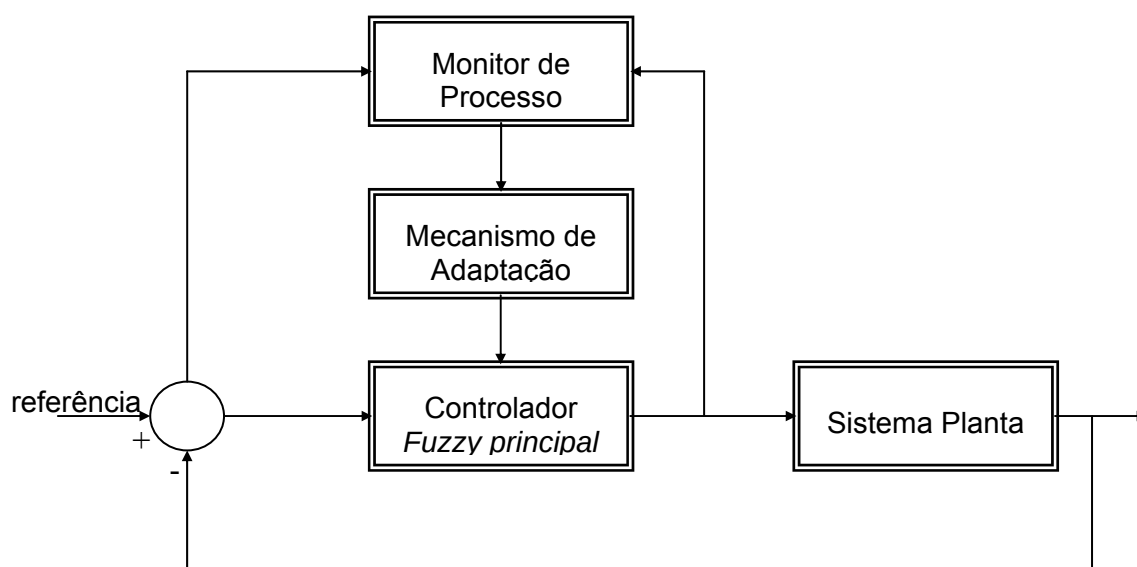


Figura 4.3 - Componentes de um controlador *Fuzzy* Adaptativo.

4.3.1. Monitor do Processo

O monitor de processo procura detectar mudanças importantes no comportamento da planta que apontem para a necessidade de uma reconfiguração nos parâmetros do controlador. Dois tipos de monitoramento se destacam: o primeiro observa alterações em variáveis paramétricas e o segundo monitora o desempenho do sistema controlado. No primeiro tipo de monitoramento (das variáveis paramétricas), as mudanças no processo

podem ser detectadas em tempo real (*online*), observando variações no tempo de parâmetros de um modelo inicialmente “ajustado” e tido como referência para a descrição do comportamento do sistema sob controle. No segundo tipo de monitoramento, procura-se observar o desempenho do processo, monitorando algumas grandezas típicas, tais como: *overshoot*; tempo de subida; tempo de acomodação, entre outras.

4.3.2. Mecanismo de adaptação

Os mecanismos de adaptação para os controladores *fuzzy* são classificados de acordo aos parâmetros ajustados:

Fator de Escala (FE): As entradas e saídas do controlador podem escalar-se mudando os limites de seu universo de discurso e proporcionando as etiquetas. Normalmente as etiquetas definem-se no intervalo normalizado $[-1,1]$ e logo se escala ao intervalo desejado. No caso de variáveis de entrada, o que ocorre é multiplicar o valor de entrada por um valor de escala no intervalo $[0,1]$, para escalar a entrada de seu intervalo real a intervalo $[-1,1]$. Por exemplo: o intervalo real da entrada é $[-200,200]$, deve-se multiplicar o valor de entrada por 0,005 ($1/200$). Então, para este universo, o valor 100 se classifica principalmente como “(M-médio)”, com um valor $100 \cdot 0,005 = 0,5$ normalizado. Para alterar a classificação deste valor, basta multiplicar o valor da entrada por um novo fator escala, por exemplo, 0.0025 ($1/400$), assim, para um novo universo do discurso terá um intervalo de -400 a 400 , e o valor de 100 será classificado como “(P-pequeno)”. Alterar, portanto o fator de escala significa modificar a sensibilidade do controlador mostrado na figura 4.4.

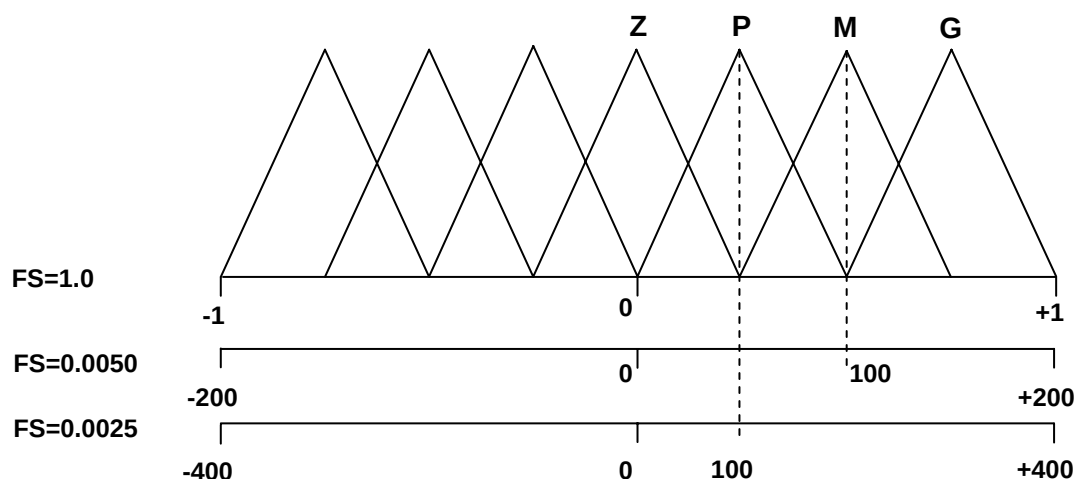


Figura 4.4 - Efeito de alterar o fator de escala

Modificação dos Conjuntos Difusos: Trata-se de modificar a definição das etiquetas lingüísticas. Enquanto que com a mudança no fator de escala se consegue uma alteração uniforme no universo todo, com este tipo de mudança é possível aumentar a sensibilidade (ganho) do controlador para certos valores de zonas do universo. Um exemplo é incrementar a sensibilidade do controlador nos valores próximos a zero (valores centrais do universo) como apresentado na figura 4.5.

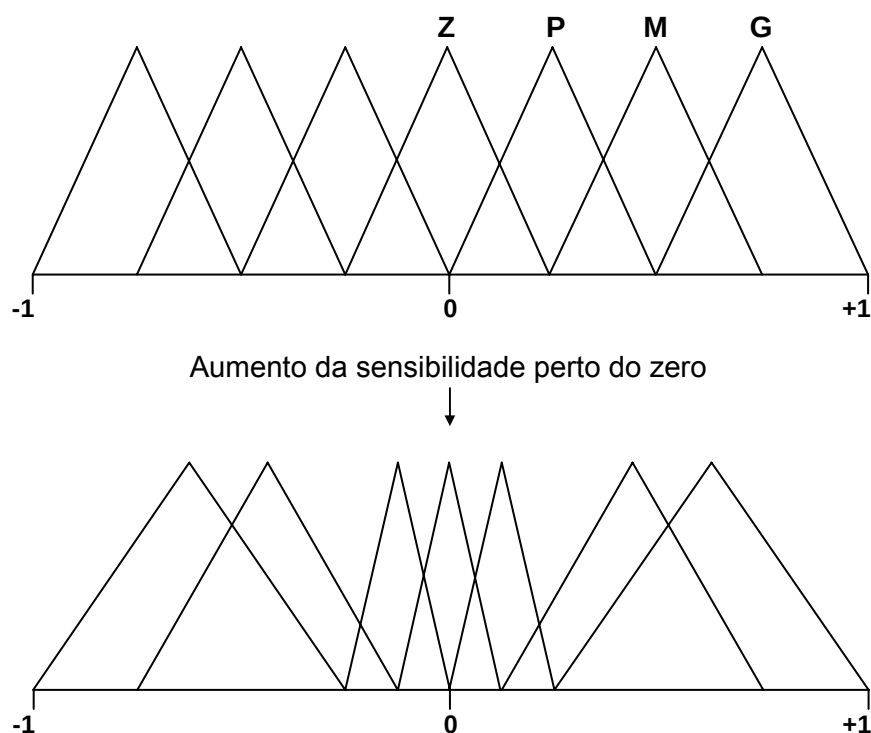


Figura 4.5 - Adaptação dos conjuntos *fuzzy* definidos.

Modificação das Regras da Base de Conhecimento: é realizada no caso quando uma regra não pode ser sempre aplicável da mesma maneira. Portanto é preciso modificá-la para adaptar-se a situação variante do sistema. Nestas ocasiões, uma solução para este problema consiste em acrescentar uma nova variável de entrada ao controlador e novas condições no antecedente de algumas regras, baseadas na nova variável. Por exemplo, a etiqueta lingüística de alguma variável (do antecedente ou do conseqüente da regra).

Para realizar o controle do sistema com base na informação anteriormente apresentada, foi realizado, inicialmente, um controlador *fuzzy* principal (convencional) e em seguida foi implementado um mecanismo *fuzzy* de adaptação dos ganhos. O diagrama de blocos do controlador *fuzzy* principal (convencional) são apresentados na figura 4.6.

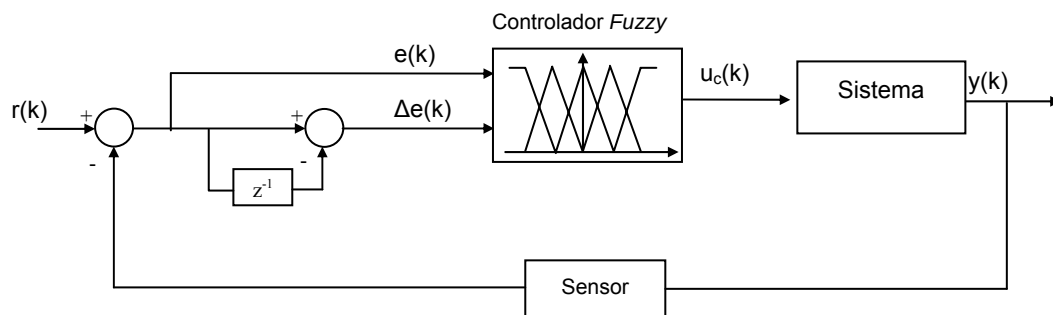


Figura 4.6 - Sistema de controle *fuzzy*.

A definição das variáveis de entrada do controlador *fuzzy* são avaliadas a partir do sinal do erro e da variação do erro, assim definidas:

$$e(k) = r(k) - y(k) \quad (4.1)$$

$$\Delta e(k) = \frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta t} \quad (4.2)$$

onde k e Δt referem-se ao instante e ao intervalo de tempo utilizados e $y(k)$ é a leitura do sensor de temperatura.

Foram definidas para cada uma destas entradas três funções de pertinência [(N)negativo, (Z)zero e (P)positivo] do tipo triangular e igualmente espaçadas e definidas dentro de um universo do discurso sintonizado de forma heurística, conforme mostrado na figura 4.7. A saída do controlador *fuzzy* é do tipo *Sugeno* de ordem zero, com valores “*crisp*” ($N=-1.0$, $Z=0$ e $P=1.0$) constantes. A base de regras é mostrada na Tabela 4.1 e o mecanismo de inferência utilizado foi o max-prod.

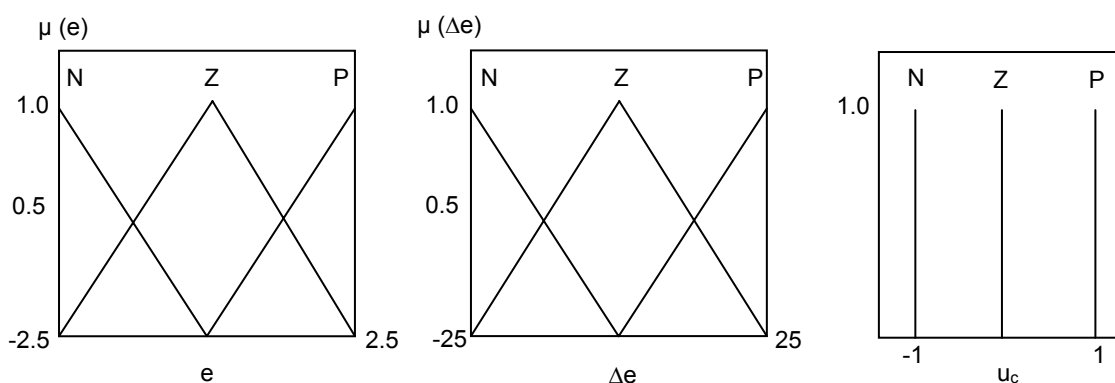


Figura 4.7 - Funções de pertinência *fuzzy* das variáveis de entrada e saída do controlador.

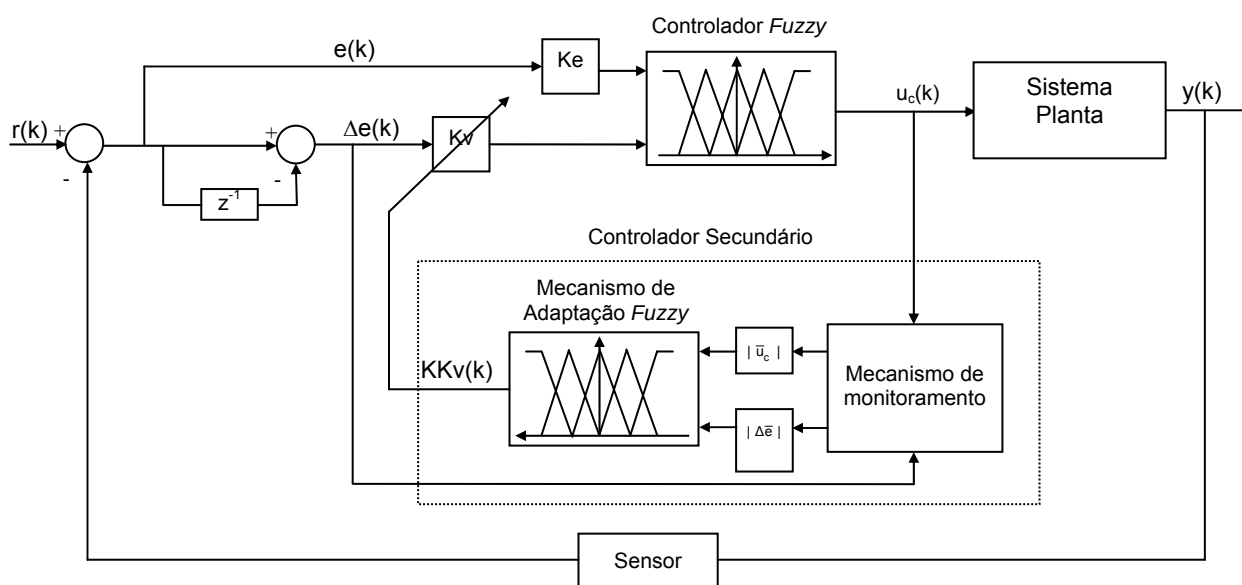
Tabela 4.1 - Base de regras do controlador *fuzzy*.

		Δe		
		N	Z	P
e	N	P *	P	Z
	Z	P	Z	N
	P	Z	N	N

* Cada célula da tabela 4.1 representa uma regra construída da seguinte forma:

R1: Se “e = N” e “ $\Delta e = N$ ” então a saída do controlador u_c é “P = 1”

Uma vez projetado o controlador principal, o segundo passo é a adição ao mesmo do mecanismo de adaptação. Para isso, o universo do discurso do controlador principal foi normalizado num intervalo de -1 a 1 e, acoplado ao controlador *fuzzy* principal, o mecanismo *fuzzy* de adaptação dos ganhos conforme se observa na figura 4.8, cujas regras são dadas pela tabela 4.2.

Figura 4.8 - Controlador *fuzzy* adaptativo.Tabela 4.2 - Base de regras do mecanismo de adaptação *fuzzy*.

		$ \Delta \bar{e} $		
		P	M	G
$ \bar{u}_c $	P	M	D	A
	M	M	M	D
	G	A	A	D

Cabe destacar que o sistema é monitorado a partir da média absoluta da derivada do erro $|\Delta \bar{e}|$ e da média absoluta da saída do controle $|\bar{u}_c|$ observando os três últimos tempos de amostragem. Estes valores são calculados da seguinte forma:

$$|\Delta \bar{e}| = \frac{|\Delta e(k)| + |\Delta e(k-2)| + |\Delta e(k-3)|}{3} \quad (4.3)$$

$$|\bar{u}_c| = \frac{|u_c(k)| + |u_c(k-2)| + |u_c(k-3)|}{3} \quad (4.4)$$

De forma similar ao controlador *fuzzy*, foram definidas para cada uma das entradas do mecanismo *fuzzy* de adaptação, três funções de pertinência [(P-pequeno, (M-médio e (G-grande)] do tipo triangular, igualmente espaçadas definidas dentro do universo de discurso das variáveis de entrada e sintonizadas de forma heurística, como ilustra a figura 4.9. O mecanismo de inferência escolhido foi o max-prod e a saída do tipo *Sugeno* de ordem zero, assumindo os valores D=0.8; M=1 e A=1.2.

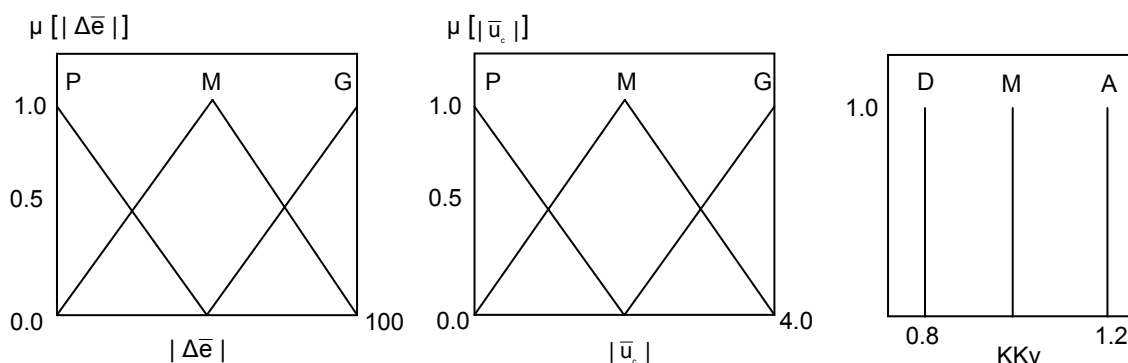


Figura 4.9 - Funções de pertinência e intervalos *fuzzy* das variáveis de entrada do mecanismo de adaptação.

Finalmente, conforme ilustra a figura 4.10, a tela de supervisão do controlador lógico difuso adaptativo é apresentada. Vale ressaltar que é possível realizar qualquer modificação no controle imediatamente, mesmo que o sistema esteja ligado.

