

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais - PPGEM

CONCEITOS DE INSTRUMENTAÇÃO APLICADOS NA MODERNIZAÇÃO DE UM  
ATUADOR ELETROMECAÂNICO

*Flávio Kieckow*

Dissertação para a obtenção do título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre  
1997

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de**  
**Materiais - PPGEM**

**CONCEITOS DE INSTRUMENTAÇÃO APLICADOS NA MODERNIZAÇÃO DE UM**  
**ATUADOR ELETROMECHANICO**

*Flávio Kieckow*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para obtenção do título de *Mestre em Engenharia*.

Área de Concentração: Ciência dos Materiais

Porto Alegre

1997

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de *Mestre em Engenharia* e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador:

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Ildon Guilherme Borchardt, UFRGS

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Renato Machado de Brito, UFRGS

Prof. Dr. Milton Antônio Zaro, UFRGS

Prof. Dr. Carlos Roberto Cauduro, UCS

Prof. Dr. Ildon Guilherme Borchardt, UFRGS

Coordenador do PPGEMM: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Luís Frederico Pinheiro Dick

Porto Alegre, abril de 1997.

Dedico aos meus pais, esposa e filhos.

## AGRADECIMENTOS

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

A Deus, pelo dom da vida, capacidades físicas e intelectuais.

Ao Prof. Ildon Guilherme Borchardt, pela oportunidade, ensino, orientação, exemplo de dedicação, estímulo e amizade.

Ao Dr. Eng. Carlos Roberto Cauduro, pela coorientação e amizade.

Aos colegas de Laboratório Jorge Alberto Wagner, Cícero Renato Lorenzi, Fernando Martins Bauer e Luis Cássio Modernel Sarate, pelo auxílio no projeto do Hardware e no desenvolvimento do Software, pelas sugestões, interesse e companheirismo.

Aos colegas de trabalho, Sandi Itamar Schäffer de Souza, Irionson Antonio Bassani e Ivan Gomes Jardim pela amizade e motivação para a conclusão deste trabalho.

A FAPERGS, que através do Programa de Estímulo a Interação de Grupos de Pesquisa com o Setor Empresarial financiou o Projeto de Pesquisa "Automação de uma Atuador Eletromecânico de Válvula de Fluxo", que deu origem a esta publicação.

A CAPES, pelo financiamento da bolsa de estudos.

Ao PPGEM e ao DEMET, que proporcionaram o ambiente de trabalho.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>viii</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>x</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Histórico.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Apresentação do Problema.....</b>	<b>1</b>
<b>1.3 Proposta de Resolução .....</b>	<b>3</b>
<b>1.4 Objetivos.....</b>	<b>3</b>
1.4.1 Geral .....	3
1.4.2 Específicos.....	4
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 Considerações Gerais .....</b>	<b>5</b>
<b>2.2 Sistema Termodinâmico.....</b>	<b>6</b>
<b>2.3 Canal de Medição .....</b>	<b>7</b>
2.3.1 Transdutores Sensores.....	8
2.3.2 Condicionadores de Sinais .....	11
<b>2.4 Canal de Atuação .....</b>	<b>12</b>
<b>2.5 Sistema de Medição e/ou Controle.....</b>	<b>14</b>
<b>2.6 Conceituação de instrumentação.....</b>	<b>17</b>
<b>3. DESCRIÇÃO E FUNCIONAMENTO DO ANTIGO SISTEMA.....</b>	<b>18</b>
<b>4. DESCRIÇÃO E FUNCIONAMENTO DO NOVO SISTEMA .....</b>	<b>21</b>
<b>5. PROJETO DO NOVO SISTEMA.....</b>	<b>24</b>
<b>5.1 Transdutor de Torque.....</b>	<b>24</b>
5.1.1 Considerações para o Projeto.....	24
5.1.2 Projeto Mecânico do Transdutor .....	33

5.1.3 Projeto Elétrico do Transdutor .....	36
<b>5.2 Hardware .....</b>	<b>38</b>
<b>5.3 Dispositivo Mecânico de Segurança .....</b>	<b>42</b>
<b>6. MONTAGEM DO NOVO SISTEMA.....</b>	<b>43</b>
6.1 Construção do Transdutor de Torque.....	43
6.2 Construção do Hardware.....	44
6.3 Construção do Dispositivo de Segurança .....	45
6.4 Desenvolvimento do Software .....	46
<b>7. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>50</b>
7.1 Calibração do Transdutor de Torque .....	50
7.2 Testes de Conjunto e Comunicação Externa .....	51
<b>8. CONCLUSÕES .....</b>	<b>54</b>
<b>9. SUGESTÕES PARA OS PRÓXIMOS TRABALHOS.....</b>	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>56</b>
<b>APÊNDICE .....</b>	<b>59</b>

## LISTA DE FIGURAS

1.1	Válvula de Fluxo com Atuador Eletromecânico MITTO-AEP16.....	2
1.2	Fases do Projeto “Instrumentação e Automação de um Atuador Eletromecânico de Válvula para Controle de Fluxo”.....	3
2.1	Diagrama em Blocos de uma Instrumentação Genérica.....	5
2.2	Canal de Medição Generalizado.....	8
2.3	Canal de Atuação Generalizado.....	12
2.4	Sistema Integrado de Instrumentação.....	15
3.1	Diagrama em Blocos da Instrumentação Antiga.....	18
4.1	Instrumentação Proposta para o Conjunto Válvula-Atuador.....	21
4.2	Transdutor de Torque Extensométrico.....	22
5.1	Geometrias Básicas do Elemento Elástico para Transdutores Torque. Para torque elevado: a) seção circular maciça e b) seção quadrada. Para torque médio: c) seção circular vazada e d) seção circular vazada com chanfro. Para baixo torque e) seção cruciforme e f) seção cruciforme vazada... ..	25
5.2	Ponte de Wheatstone. Os extensômetros $R_1$ , $R_2$ , $R_3$ e $R_4$ são denominados de braços da ponte. A ponte é excitada por uma tensão “ $V_i$ ” através dos terminais de alimentação “a” e “d”. Os terminais “b” e “c” fornecem a tensão de saída “ $V_0$ ” da ponte. Os conjuntos ( $R_1$ , $R_2$ ) e ( $R_3$ , $R_4$ ) constituem os dois ramos da ponte.....	28
5.3	Elemento Elástico do Transdutor de Torque.....	34
5.4	Tensões de Cisalhamento em Seção Maciça Sujeita a Torção Pura.....	34
5.5	Extensômetro de Resistência Elétrica Selecionado para o Transdutor de Torque.....	36
5.6	Diagrama em Blocos Simplificado do Hardware Construído.....	39
5.7	Diagrama em Blocos do Condicionador de Sinais Construído.....	40
6.1	Foto do Transdutor de Torque Construído.....	43
6.2	Foto do Eixo de Transmissão do Redutor Usinado.....	44
6.3	Foto do Hardware Construído.....	45
6.4	Foto do Anel Atuador.....	45
6.5	Foto do Dispositivo de Segurança Eletromecânico Montado.....	46
7.1	Curva de Calibração do Transdutor de Torque.....	50
7.2	Atuador-Válvula em um Sistema Integrado de Instrumentação.....	52
7.3	Foto do Atuador Comandado por Microcomputadores em Rede.....	53
A.1	Mecanismo do Relógio Despertador Utilizado como Simulador de Posição.....	59



## LISTA DE SÍMBOLOS

B	Razão entre os extensômetros de um mesmo ramo da ponte de Wheatstone
D	Diâmetro externo (m)
d	Diâmetro interno (m)
E	Módulo de Elasticidade ( $N/m^2$ )
K	Sensibilidade do extensômetro de resistência elétrica (“gage-factor”)
$M_t$	Momento torsor (Nm)
$M_{tn}$	Momento torsor nominal (Nm)
R	Resistência elétrica do extensômetro ( $\Omega$ )
$S_p$	Sensibilidade inicial da ponte de Wheatstone
$V_0$	Tensão elétrica de saída (V)
$V_i$	Tensão elétrica de entrada (V)
$W_p$	Momento resistente polar da seção
$\Delta R$	Variação de resistência elétrica do extensômetro ( $\Omega$ )
$\Delta V$	Variação de tensão elétrica (V)
$\varepsilon$	Deformação específica (m/m)
$\varepsilon_l$	Deformação específica longitudinal (m/m)
$\varepsilon_m$	Deformação específica no elemento elástico maciço
$\varepsilon_t$	Deformação específica transversal (m/m)
$\varepsilon_v$	Deformação específica no elemento elástico vazado
$\eta$	Erro de linearidade da ponte de Wheatstone em relação a $S_p$
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\pi$	Número pi
$\sigma_c$	Tensão normal de compressão ( $N/m^2$ )
$\sigma_t$	Tensão normal de tração ( $N/m^2$ )
$\tau_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima de cisalhamento ( $N/m^2$ )
$\xi$	Termo da ponte para o cálculo do desvio de linearidade

## RESUMO

Baseado na necessidade de se ter uma linguagem comum entre os profissionais da área de engenharia, conceitos de Instrumentação são propostos, discutidos e generalizados. São definidos: Sistema Termodinâmico, Canal de Medição, Canal de Atuação, Sistema de Medição e/ou Controle. Estes conceitos foram desenvolvidos partindo-se da modernização de uma válvula de fluxo com atuador eletromecânico. No protótipo foram adaptados dois transdutores: um de posição (potenciômetro) e outro de torque (a base de "strain gauges"). O sistema passou a possuir dois Canais de Medição (posição e torque) e um de Atuação (motor elétrico). Um dispositivo eletromecânico (com micro chaves) foi usado para operação manual e segurança. Para o Sistema de Medição e Controle foi construído um hardware (com microcontrolador) e desenvolvido um software. A instrumentação implementada monitora o torque e o movimento do eixo da válvula, as micro-chaves, e gera comandos de acordo com os parâmetros recebidos de uma estação remota. Este trabalho mostra que a adaptação de sistemas industriais de monitoração e controle convencionais em sistemas modernos de instrumentação é tecnicamente vantajosa e de baixo custo. Com as definições e conceitos propostos pretende-se contribuir para a normalização da Instrumentação e a conseqüente compatibilidade de diferentes equipamentos, bem como fazer com que a Instrumentação seja entendida, utilizada e ensinada como uma área do conhecimento aplicada a qualquer ramo da ciência e da tecnologia que a utilize para medir e controlar grandezas físicas.

## ABSTRACT

This study proposes, discusses and generalizes concepts of Thermodynamic System, Measurement Channel, Actuation Channel, Measurement and/or Control System and Instrumentation, based on the need of having a common language among the professionals of the engineering area. These concepts were developed from the up-to-dating of a flow valve with an electromechanical actuator. Two transducers were adapted in the prototype, one of position (potentiometer) and one of torque (with strain gauges), which caused the system to have two measurement channels (position and torque), and one of actuation (electric motor). An electromechanical device (with micro-switches) was used for security and manual operation. It was necessary to develop a hardware (with micro-controller) and a software for the measurement and control system. The implemented instrumentation monitors the torque and valve position control and the micro-switches, as well as generates commands according to the received parameter from a remote station. This study shows that the adaptation of conventional monitor and control industrial systems to modern instrumentation systems is technically advantageous and has a low cost. The proposed definitions and concepts represent my contribution to the normalization of instrumentation and to the consequent compatibility among different kinds of equipment. Besides, we want instrumentation to be understood, used and taught as a knowledge area applied to any branch of science and technology where there is the need to measure and control physics greatness.

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1 Histórico**

Nos experimentos científicos a instrumentação começou a ser utilizada com o propósito de compreender e modelar fenômenos físicos observados na natureza. A medição de determinadas grandezas físicas como corrente elétrica, temperatura, força, deslocamento, tempo e outras, permitiu ao homem propor modelos físicos e matemáticos que traduzissem as observações experimentais.

A partir da Revolução Industrial, além da medição de variáveis mecânicas, as máquinas e processos passaram a exigir a monitoração e o controle. Nesta ocasião, o homem era o elemento de monitoração e controle.

Com o surgimento dos mecanismos e reguladores, juntamente com a eletropneumática e eletromecânica, foi possível realizar o controle automático das máquinas [15,37,39,40].

O advento da micromecânica, microeletrônica e informática possibilitaram o controle centralizado de plantas industriais [44].

Atualmente, com a tecnologia dos microprocessadores [4,25,38], já é possível transferir parte do sistema de controle central para os próprios sensores e atuadores distribuídos no chão-de-fábrica.

No entanto, como consequência ao rápido desenvolvimento tecnológico, muitas máquinas, processos e produtos, em diferentes setores industriais, ficaram ultrapassados e/ou obsoletos. Associadas a este avanço tecnológico estão as tendências mundiais de globalização de mercado, competitividade e qualidade em produtos e serviços.

### **1.2 Apresentação do Problema**

A válvula de fluxo com atuador eletromecânico MITTO-AEP16 (Fig. 1.1), fabricada pelas Indústrias Micheletto S.A., é um caso real de um produto que estava perdendo mercado para produtos similares devido a sua tecnologia antiquada.

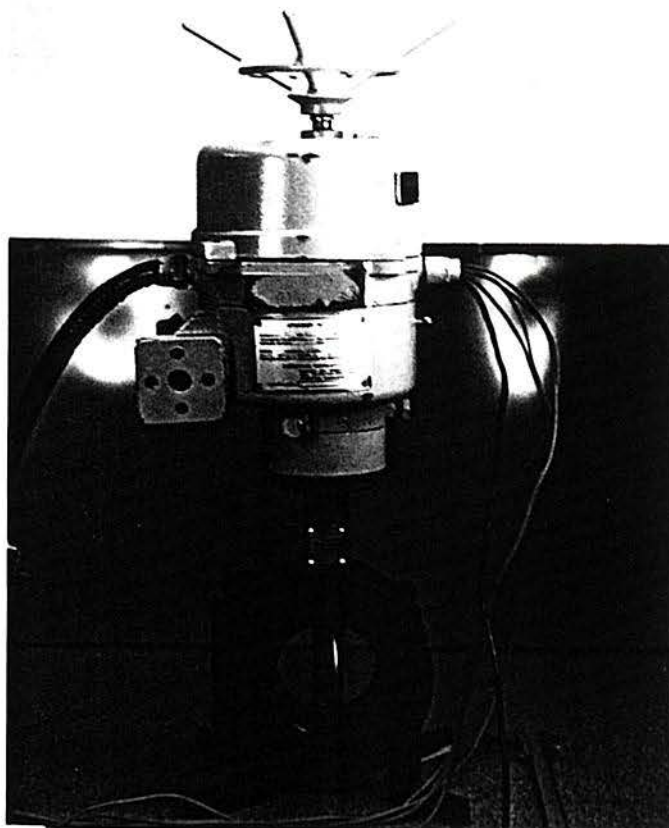


Figura 1.1 - Válvula de Fluxo com Atuador Eletromecânico MITTO-AEP16.

As principais limitações do conjunto válvula-atuador mencionado são:

- o controle on-off;
- o comando centralizado na Caixa de Comando;
- a não medição da variável torque;
- a impossibilidade de comunicação externa (interligação em rede);
- a impossibilidade de variar os parâmetros de comando de posição e torque.

Tendo em vista o desenvolvimento de um produto com tecnologia superior (moderna, atual), um convênio de cooperação técnica foi firmado entre as Indústrias Micheletto S.A. e o Laboratório de Instrumentação do DEMET/UFRGS. A partir desse convênio surgiu o Projeto intitulado "Instrumentação e Automação de um Atuador Eletromecânico de Válvula para Controle de Fluxo" que foi aprovado e financiado pela FAPERGS no período de 1992/93. Para execução do projeto a

Empresa cedeu para o Laboratório um exemplar do conjunto válvula-atuador e caixa de comando.

### 1.3 Proposta de Resolução

Para melhor operacionalização e desenvolvimento, o referido projeto foi subdividido em três fases (Fig. 1.2).



Figura 1.2 - Fases do Projeto “Instrumentação e Automação de um Atuador Eletromecânico de Válvula para Controle de Fluxo”.

Na *Simulação* foi utilizado um simulador e um Kit de Desenvolvimento SDE-98. O objetivo era testar o microcontrolador 8098 da INTEL. A descrição do simulador, como foi construído, programado e testado, encontra-se no **Apêndice A**. A simulação apresentou resultados satisfatórios do microcontrolador quanto ao uso como elemento de controle e quanto a sua comunicação externa.

A segunda fase, a que deu origem a este trabalho, consistiu em *Instrumentar* a válvula-atuador. A instrumentação deveria possibilitar a medição e o controle das variáveis posição e torque, e ainda, a comunicação externa do sistema.

A terceira fase do projeto será o desenvolvimento do *Protocolo de Comunicação*. Nesta fase a válvula-atuador será vista como um elemento pertencente a um barramento de chão-de-fábrica [41] como uma estação escrava.

### 1.4 Objetivos

#### 1.4.1 Geral

Tem-se como objetivo geral desta dissertação a introdução, a discussão e a generalização de conceitos de Instrumentação. Este, fundamenta-se na

necessidade de se ter um entendimento mais amplo (não fragmentado) da instrumentação e uma linguagem padronizada entre os profissionais da área.

#### 1.4.2 Específicos

Centrado na segunda fase do projeto maior, a instrumentação da válvula de fluxo com atuador eletromecânico MITTO-AEP16, os objetivos específicos são:

- Aplicar a tecnologia de microcontroladores ao sistema de medição e controle;
- Controlar a posição da válvula;
- Medir e controlar o torque na válvula;
- Possibilitar o comando remoto do conjunto válvula-atuador por um operador através de um computador remoto.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Considerações Gerais

O histórico apresentado na introdução deste trabalho mostra que a instrumentação evoluiu na *constituição* e no *funcionamento* de seus componentes. No entanto, as *funções* de cada elemento continuam sendo as mesmas.

Indutivamente, pode-se apresentar um diagrama em blocos genérico (Fig. 2.1) para qualquer sistema que se queira medir e/ou controlar, independente da época, da constituição ou da sua aplicação, ou seja, não importa se é uma instrumentação antiga ou moderna, se é aplicada a engenharia, medicina, física ou qualquer outra área do conhecimento.

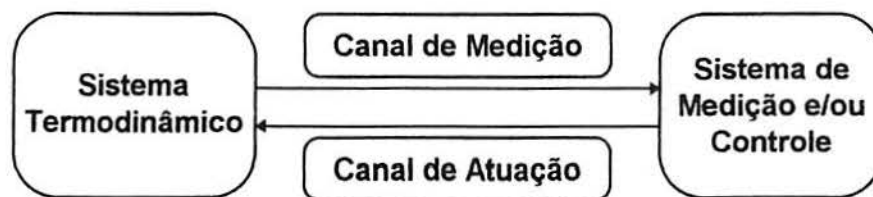


FIGURA 2.1 - Diagrama em Blocos de uma Instrumentação Genérica.

O bloco sistema termodinâmico é o volume de controle que precisa ser medido e controlado.

O bloco sistema de medição e/ou controle é onde as informações advindas do canal de medição são sistematizadas para serem apresentadas ou armazenadas, ou são processadas para gerar sinais de controle ou comando sobre o sistema termodinâmico.

Os canais de medição e atuação são as duas vias por onde fluem as informações. Eles são os elementos de interligação e interação entre o sistema termodinâmico e o sistema de medição e controle. Tanto os transdutores sensores das variáveis termodinâmicas que compõe o canal de medição, quanto os transdutores atuadores que compõe o canal de atuação realizam a ligação física entre os sistemas e trocam energia através desta ligação.



## 2.2 Sistema Termodinâmico

Pela termodinâmica clássica [43,45] um *Sistema Termodinâmico* é definido como uma quantidade de matéria de massa contida em um volume de controle. O volume de controle é o volume no espaço que nos interessa para um estudo ou análise particular. A superfície que delimita este volume, chamada de superfície de controle, é por nós definida em função do "objeto" que se deseja estudar, podendo ser física ou imaginária. Através desta superfície o sistema interage com outros sistemas que compõem o universo trocando informações e energia (p. ex. massa, calor e trabalho). Cientificamente o procedimento consiste em descrever o sistema, delimitá-lo de seus vizinhos no universo através de contornos bem conhecidos e descritos pela superfície de controle. Ou seja, não existe sistema isolado do Universo, mas "isolado hipoteticamente" por uma superfície termodinâmica definida.

Os seguintes exemplos enfatizam a importância da escolha da superfície termodinâmica: a) o corpo humano com todos os seus membros e órgãos; b) simplesmente um órgão do corpo humano; c) uma "planta industrial" completa; d) apenas "uma máquina" de uma planta industrial; e) uma peça ou componente de uma máquina.

O *Estado* do sistema termodinâmico é caracterizado, pelas propriedades termodinâmicas. Estas são determinadas de acordo com os fenômenos de interesse e são quantificadas pelas *grandezas físicas*, entre outras temperatura, pressão, transformações ou reações químicas, deslocamento de massas, correntes ou tensões elétricas, efeitos fotoelétricos, efeitos termoelétricos, ondas eletromagnéticas.

Como o sistema interage com o universo, as grandezas físicas podem mudar ou variar no tempo. Quando isto ocorre, diz-se que houve uma *mudança de estado*. As sucessivas mudanças de estado pelo qual passa um sistema caracteriza o *Processo*.

Para o estudo de um sistema termodinâmico deve-se observar:

- a) *o modelo físico ou matemático* - os sistemas físicos reais podem ser descritos aproximadamente através de um modelo físico ou matemático teórico que é denominado de *Função de Transferência* [9]. O modelo pode estar fundamentado em hipóteses simples que levam a escolha de alguns parâmetros que possibilitam descrever o sistema em função das variáveis observadas. Estas hipóteses geralmente são testadas e/ou simuladas. Deste modo os modelos são aperfeiçoados até descreverem de modo adequado o sistema físico real.
- b) *a escolha das grandezas físicas* - a escolha de grandezas físicas adequadas é essencial para uma boa descrição do comportamento do sistema. Em função do modelo adotado são escolhidas as grandezas que exerçam maior influência sobre o fenômeno de interesse.
- c) *o sistema de medição* - para a sua escolha deve-se conhecer o processo, as variáveis a serem medidas e os sensores a serem utilizados [9]. O sucesso da medição depende principalmente das características estáticas e dinâmicas dos sensores.
- d) *as incertezas na medição* - para avaliarmos a precisão dos resultados medidos e as relativas influências deste erros no estudo do processo, é necessário analisar qualitativa e quantitativamente todos os possíveis erros que poderão ocorrer na medição. Entre outros outro pode-se citar fator de carregamento, perturbações externas de outras variáveis, erro e imprecisão do sistema de medição e leitura.

### **2.3 Canal de Medição**

Sua finalidade é "sentir" a grandeza física desejada no sistema termodinâmico e transmiti-la de maneira adequada ao sistema de medição para a indicação, o registro e a aquisição da informação ou ao sistema de controle para o processamento e geração de comandos de atuação sobre o sistema termodinâmico [3,5,9], Fig. 2.2.

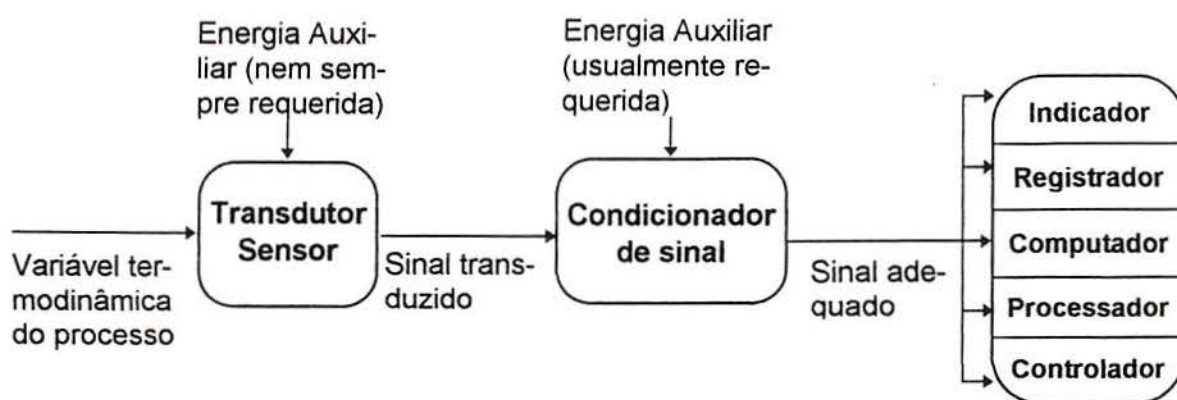


FIGURA 2.2 - Canal de Medição Generalizado.

### 2.3.1 Transdutores Sensores

São elementos sensoriais utilizados para medir as grandezas físicas do sistema termodinâmico. São chamados de Transdutores porque além de “sentirem” a grandeza física, geralmente a transformam (modificam, convertem) da natureza medida para outra de interesse. Os transdutores são classificados pelos seguintes aspectos:

- *Resposta em função da excitação* - são divididos em ativos e passivos. Os ativos geram uma resposta espontânea em função do estímulo de entrada da variável a ser medida e não dependem de excitação externa. Nos passivos a resposta é função do estímulo e excitação.
- *Sua constituição* - os transdutores sensores podem ser simples ou compostos. O transdutor simples apresenta a transdução do sinal em uma única etapa (p. ex. o termopar). Os transdutores compostos necessitam de mais de um estágio de transdução desde o estímulo provocado pela grandeza a ser medida até o sinal de saída (p. ex. célula de carga extensométrica). Os transdutores compostos geralmente são passivos.
- *Princípio físico de operação* - cada sensor tem um princípio físico distinto na transdução de uma grandeza física. O uso de um ou de outro na mesma medição vai depender do grau de conhecimento que o instrumentista possui do sistema termodinâmico, da variável de interesse, dos transdutores sensores existentes, das suas características, e do tipo de sistema de medição e controle desejado.

- *Características dos transdutores* - as características são importantes para conhecermos o sensor, para otimizarmos o seu uso e para compará-lo com outros de diferentes princípios físicos ou de mesmo princípio mas de diferentes classes e geometrias.

As Características dos transdutores são obtidas através de calibração [3,17]. O procedimento de *Calibração* consiste em estabelecer experimentalmente uma correta relação entre magnitudes conhecidas e desejadas de quantidades de entrada e magnitudes de saída do transdutor sensor. Se as quantidades de entrada não variam no tempo a calibração é *Estática*, se variam no tempo, a calibração é *Dinâmica*. O que define o tipo de calibração que o sensor deve ser submetido é o tipo de entrada que ele irá detectar quando for usado.

As principais características obtidas a partir da *curva de calibração ou aferição estática* são:

- *Sensibilidade* - é definida como a inclinação da curva de calibração. Alguns autores a definem como a razão entre o sinal de saída e a entrada correspondente.
- *Linearidade* - é a medida do desvio máximo entre os pontos de calibração e a melhor reta desta curva. A melhor reta pode ser obtida pelo método dos Mínimos Quadrados. Alguns fabricantes de transdutores utilizam como melhor reta a que liga a origem (zero) ao valor máximo ou nominal da curva de calibração. Geralmente é expressa como uma percentagem da leitura de fundo de escala ou valor nominal.
- *Histerese* - é a diferença máxima nos valores de saída entre as curvas de carregamento e descarregamento do transdutor para o mesmo valor de entrada. É expressa como percentual do valor nominal.
- *Limiar* - é o valor mínimo de entrada abaixo do qual nenhuma variação na saída pode ser detectada. É a menor entrada mensurável.
- *Resolução* - é o incremento de entrada capaz de gerar uma pequena mas definida variação numérica de saída. É a menor variação de entrada mensurável.

- *Erro* - é a diferença algébrica entre o valor medido e o valor de referência ou padrão.
- *“Offset”* - é definido como sinal de saída diferente de zero para carregamento nulo.
- *Sinal de saída para carga nominal* - é o máximo sinal de saída do transdutor para as condições admissíveis de trabalho consideradas no projeto.
- *“span”* - é o intervalo delimitado para a medição da grandeza física que o transdutor é designado a medir dentro de uma tolerância especificada.

*As características dinâmicas mais importantes são:*

- *Resposta freqüencial* - é a variação com a freqüência da razão amplitude de saída sobre amplitude de entrada. É determinada através de entradas periódicas ou harmônicas. Sua especificação é dada em percentual para um determinado intervalo de freqüência.
- *Constante de tempo* ( $\tau$ ) - em um sistema de primeira ordem, ante um estímulo de impulso ou degrau, é o tempo necessário para completar 63,2% da variação na resposta total. Indica a velocidade de resposta do sistema, quanto menor  $\tau$  mais rápida é a resposta. Para entradas harmônicas, quanto menor a constante de tempo em relação ao período, melhor será a resposta do sistema a freqüência e a fase. Para medidas dinâmicas os erros diminuem na medida em que se diminui a constante de tempo.
- *Tempo de subida (Rise Time)* - é definido como o tempo  $\Delta T$  requerido para o sistema passar de 10% à 90% de sua resposta final. Mede a habilidade do sistema manusear transientes.
- *Tempo de ajuste (Settling Time)* - é o tempo necessário para o instrumento alcançar e permanecer, dentro de uma determinada faixa de tolerância, ao redor de seu valor final de saída depois da aplicação de uma entrada transiente. Também é utilizado na caracterização da velocidade de resposta dos instrumentos de medida.

- *Frequência natural não amortecida ( $\omega_n$ ) e Taxa de amortecimento ( $\xi$ )* - para sistemas de segunda ordem a frequência natural não amortecida  $\omega_n$  é uma indicação direta da velocidade de resposta. O aumento da frequência natural não amortecida  $\omega_n$  e a otimização da taxa de amortecimento  $\xi$  permitem ampliar o intervalo de uso da frequência de excitação além de melhorar a resposta a frequência do sistema. A taxa de amortecimento também está relacionada com o tempo de ajuste (settling time) do sistema a entradas transientes. Os melhores valores de  $\xi$  para instrumentos de segunda ordem ficam ao redor de 0,6 e 0,7.

### 2.3.2 Condicionadores de Sinais

As entradas não desejadas, tais como ruídos elétricos e vibrações (muitas vezes inerentes ao sistema e que tendem a adulterar o sinal de saída), a baixa amplitude do sinal de saída e o sinal de saída incompatível a medição e/ou controle desejado tornam necessário o uso de condicionadores de sinais.

Condicionadores de Sinais são dispositivos mecânicos ou eletroeletrônicos, que adequam o sinal de saída dos transdutores aos elementos de indicação, registro, aquisição de dados, processamento e controle, em função da finalidade do canal de medição [3,5,8,27].

As principais funções que um condicionador de sinal genérico deve desempenhar são:

- amplificação do sinal proveniente do transdutor;
- separação do sinal de interesse do ruído inerente ao transdutor ou ao ambiente onde ele é utilizado;
- geração de um sinal de referência para comparação, correção e excitação de transdutores passivos;
- ajuste de ganho para correção de "offset", calibração do sistema de medição e outros;
- formatação do sinal analógico através de integradores, diferenciadores e filtros;

- operações matemáticas como linearização, cálculo do valor médio, cálculo do valor eficaz (rms), soma, subtração, atenuação e outras, e
- isolamento elétrica entre o transdutor e o sistema de medição e controle.

Atualmente, o módulo de condicionamento de sinal e processamento estão sendo incorporados aos transdutores sensores com saída elétrica, formando um único bloco. Transdutores com estas características são chamados de *Transdutores Inteligentes* [25,38,44].

A *Qualidade* de um canal de medição está associada ao conhecimento do sistema termodinâmico, a escolha adequada dos diversos elementos que irão compor o canal de medição e a correta avaliação e controle das interferências, perturbações e entradas indesejadas por ocasião da medição. Os principais *Indicativos* da qualidade de um canal de medição são a classe de precisão e a repetibilidade.

## 2.4 Canal de Atuação

O canal de atuação (Fig. 2.3) somente existe se é propósito da Instrumentação o controle do processo. Para controlar é necessário interferir externamente no sistema, fornecendo ou retirando energia, de modo a conduzi-lo a um ponto de operação desejado. Esta ação modificativa é realizada através de elementos que são denominados de *Atuadores*.

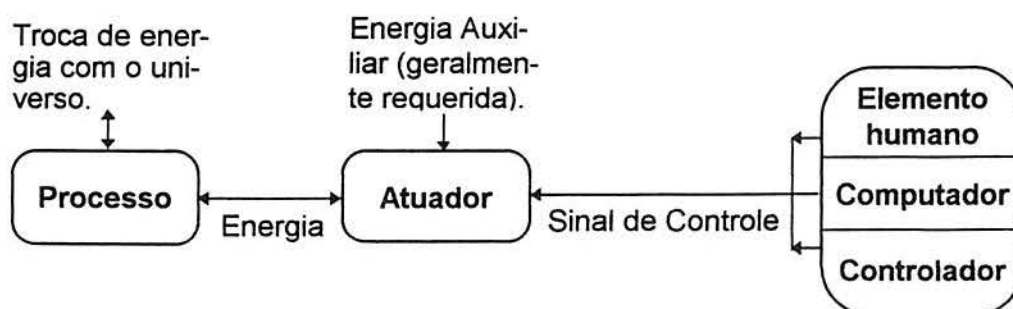


FIGURA 2.3 - Canal de Atuação Generalizado.

O canal de atuação pode estar interligado com o canal de medição ou não [5,16,26,33,40]. No caso de estarem interligados pelo sistema de medição e controle diz-se que o *sistema de controle é de malha fechada ou realimentado*, isto é, o controle é em função do sinal medido (on-line). Se não há interligação, o *sistema de controle é denominado de malha aberta*, ou seja, é realizado em função de parâmetros preestabelecidos. Resultados razoáveis são obtidos com este tipo de controle se o processo é relativamente estável (a troca de energia é mais ou menos constante com o universo). No entanto, usando o erro da variável medida como parâmetro de controle, o sistema torna-se muito mais flexível e preciso diante das perturbações provocadas pela troca de energia através da fronteira do processo.

Independente do tipo de sistema adotado os atuadores sempre receberão um sinal de controle de um *Algoritmo de Controle*. Este sinal pode ser proveniente diretamente do cérebro de um ser humano, de um microcomputador ou de um controlador. Os responsáveis ou detentores do algoritmo de controle pode-se defini-los como *Elementos de Controle*.

Estes conceitos podem ser melhor compreendidos através de um exemplo. Os veículos populares possuem alguns canais de medição que apenas indicam os valores das grandezas medidas (p. ex. velocidade, rpm, nível do óleo e combustível). O controle, a partir da indicação, é realizado totalmente pelo motorista, tanto a parte correspondente ao elemento de controle como a de atuação. Nos veículos de luxo o motorista encontra-se numa situação bem mais cômoda. Um ou mais computador de bordo recebe as informações de diversos canais de medição simultaneamente, processa-as, toma certas decisões e dá algumas instruções aos atuadores dos diversos canais de atuação.

O exemplo mostra duas situações diferentes de comando dos canais de atuação. Na primeira, o homem é o único elemento de controle e atuação. O homem é o elemento responsável pelo elo de realimentação. Na segunda, ele aparece dividindo o controle com outro elemento - o computador de bordo. Neste caso houve uma descentralização do controle (mais de um elemento de controle com responsabilidades diferenciadas) e uma subdivisão do controle em diversos canais de atuação (p. ex. emissão de gases, air bag e microcâmeras).



Percebe-se que para a mesma aplicação pode-se ter diferentes tipos de sistemas de instrumentação com menor ou maior grau de complexidade. Geralmente, estes sistemas são função das variáveis medidas e controladas, dos atuadores e do tipo de controle desejado ou possível.

## 2.5 Sistema de Medição e/ou Controle

A instrumentação pode ser aplicada para medir, controlar ou medir e controlar grandezas físicas.

Geralmente, a instrumentação para medição é utilizada nos experimentos científicos e em ensaios de laboratório. Esta, tem por objetivo a compreensão de fenômenos físicos, o estudo de processos e a determinação de propriedades nos materiais. É denominada de *sistema de medição ou monitoração*.

Nos processos industriais o interesse maior é o controle. No entanto, para controlar é necessário primeira ou instantaneamente medir (controle aberto ou controle fechado, respectivamente). A *Medição e o Controle* andam juntos porque é a forma mais eficiente de otimizar os processos, diminuir os custos de produção e melhorar o nível de qualidade dos produtos [35].

*Sistema de Medição e Controle* é o sistema (componente ou conjunto de componentes) que fecha o ciclo de medição e controle. É o elo de ligação entre o canal de medição e atuação. É o bloco (Fig. 2.1) onde as informações advindas do canal de medição são sistematizadas, processadas e operacionalizadas, ou seja, são transformadas em decisões de controle para o canal de atuação. A sua constituição depende do tipo de medição e controle desejado, conforme os canais de medição e atuação indicavam nas Fig. 2.2 e 2.3.

Os sistemas de medição e controle atuais são caracterizados pela descentralização e hierarquização do controle [25] e pelo suporte da comunicação de dados [10].

Entende-se por *Descentralização do Controle* o ato de dar autonomia para um elemento de controle realizar determinadas operações independentes do controle central.

*Hierarquização do Controle* é o ato de ordenar e subordinar em ordem crescente ou decrescente as operações de controle de um sistema complexo através dos elementos de controle.

O *Suporte da Comunicação de Dados* permite construir e pôr em operação um modelo alimentado em tempo real pelos canais de medição com valores atualizados das grandezas escolhidas.

Sistemas com estas características tem-se chamado de *Sistema Integrado de Instrumentação ou Instrumentação Moderna* (Fig. 2.4).

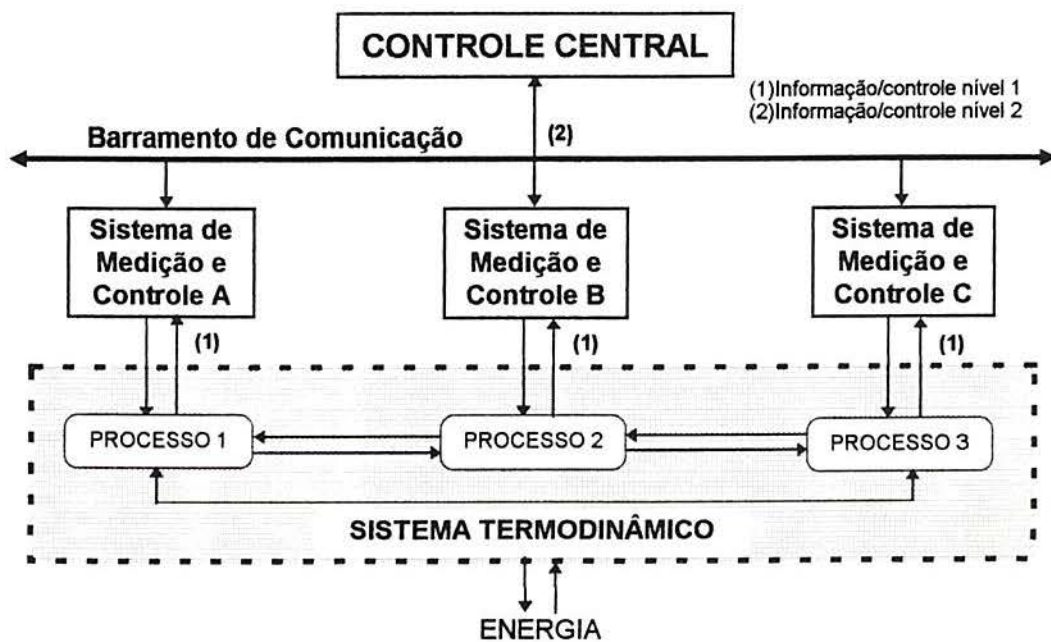


FIGURA 2.4 - Sistema Integrado de Instrumentação.

Os sistemas de medição e controle A, B e C são análogos ao da Fig. 2.1. Nos sistemas integrados eles aparecem como subsistemas, interagindo entre si através do sistema de comunicação e com o universo através de suas interfaces. Cada subsistema obedece a parâmetros locais de controle (nível 1 de controle) e estão hierarquicamente submetidos ao controle central ou *Elemento de supervisão* [44] (nível 2 de controle).

Também é mostrado que pode-se simplificar um sistema relativamente complexo separando-o em diagramas de blocos que permitam uma visão sistêmica do conjunto. Esta ação permite-nos administrar a complexidade de praticamente qualquer sistema.

Alguns autores identificam os sistemas de instrumentação modernos/integrados/inteligentes como *Automação* [12,40]. São sistemas capazes de escolher, manipular e corrigir algoritmos de controle, baseados em informações armazenadas e/ou adquiridas, e ainda, alimentar e supervisionar os elementos de controle.

Um exemplo ou um modelo de instrumentação idealizado são os seres humanos. O corpo humano é um dos sistemas mais complexos do universo. Para simplificar a medicina dividiu o corpo humano em seis sistemas: sistema nervoso, sistema ósteo-muscular, sistema respiratório, sistema cardiovascular, sistema digestivo e sistema gênito-urinário. Estes sistemas são constituídos de diversos membros e órgãos que funcionam em perfeita ordem, coordenação e harmonia, e cada um tem um propósito específico bem definido no sistema. O sistema nervoso central comanda e/ou supervisiona todos os demais sistemas. O sistema ósteo-muscular é um exemplo de um sistema comandado, isto é, todas as ações dependem da vontade processada pelo sistema nervoso central. Por outro lado, o sistema cardiovascular exemplifica o caso da supervisão. As fibras cardíacas podem contrair-se de maneira independente do sistema nervoso central, porém, está sujeita a uma modulação pelo mesmo (uma emoção, por exemplo, pode aumentar a frequência e a força do batimento cardíaco). Por isso, poderíamos identificar o coração como um subsistema do sistema nervoso central. Outra consideração importante é que nenhum sistema funciona independente dos outros sistemas, ou seja, estão intimamente interligados e interagem entre si. Por exemplo, para a realização de um exercício físico é necessário que os músculos recebam mais oxigênio e glicose provenientes dos sistemas respiratório e digestivo, respectivamente, transportados pela corrente sanguínea - todas essas ações são coordenadas pelo sistema nervoso central.

## 2.6 Conceituação de instrumentação

De acordo com o considerado, *define-se Instrumentação como a área do conhecimento que estuda os métodos e dispositivos para medir e/ou controlar grandezas físicas de um sistema termodinâmico.*

Assim, todo o conjunto de técnicas e dispositivos que estão associados e interligados a um sistema termodinâmico com o objetivo de medir, monitorar ou controlar as variáveis deste sistema, como transdutores, condicionadores, indicadores, registradores, processadores, conversores A/D e D/A, simuladores, multiplexadores, e outros, entende-se como instrumentação.

### 3. DESCRIÇÃO E FUNCIONAMENTO DO ANTIGO SISTEMA

O sistema concedido pelas Indústrias Micheletto para desenvolvimento do protótipo era composto por uma válvula de fluxo com atuador eletromecânico modelo MITTO-AEP16 e uma caixa de comando de potência.

A antiga instrumentação do conjunto válvula-atuador pode ser esquematizada em forma de diagrama de blocos como mostra a Fig. 3.1.

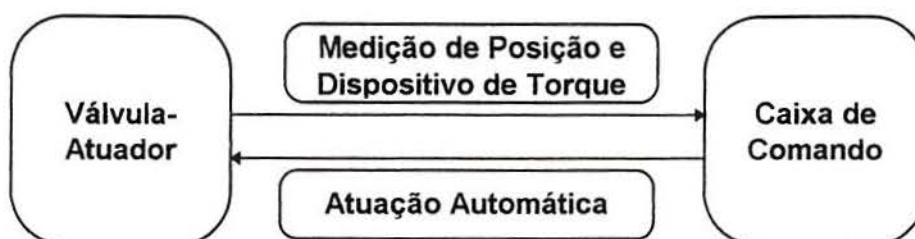


FIGURA 3.1 - Diagrama em Blocos da Instrumentação Antiga.

O bloco válvula-atuador tinha a seguinte constituição e funcionamento:

- Um motor elétrico de indução monofásico Eberle modelo BK56B4, 220 v, 0.1 A, 1/12 CV, 1710 rpm.

O modelo Mitto AEP-16 utilizava um motor com bobinado auxiliar para partida alimentado com uma corrente defasada do bobinado principal. Isto propiciava a formação de um campo girante e a não necessidade de uma fonte externa. Esta defasagem, obtida mediante a utilização de um capacitor de arranque, era colocada em série com o bobinado de campo auxiliar. Para se conseguir a reversão do sentido de rotação do rotor era necessário comutar a polaridade do bobinado auxiliar mantendo o capacitor em série. Isto exigia a utilização de duas contactoras situadas dentro da caixa de comando de potência. Estas contactoras tinham um intertravamento mecânico de segurança.

- Uma caixa de redução (7.500:1).

A caixa de redução era composta por um parafuso sem fim acoplado ao motor, uma coroa e pares de engrenagens cilíndricas de dentes retos que transmitiam torque ao eixo da válvula. O parafuso sem fim era posicionado axialmente entre

duas molas helicoidais para permitir pequenos deslocamentos longitudinais no caso de resistência ao giro do eixo da válvula. Esta montagem mecânica permitia o desligamento do sistema através da controladora de torque nos casos de abertura, fechamento e obstrução da válvula). As molas eram dimensionadas para o torque escolhido.

- Uma válvula do tipo borboleta de 84 mm de diâmetro e 90 ° de “span”.
- Um manípulo.

No caso de falta de energia a válvula poderia ser acionada manualmente através deste manípulo.

Para a medição da posição da válvula era utilizado um potenciômetro de carbono de 2.2 k $\Omega$  com excursão de 270 °.

O potenciômetro estava conectado ao eixo da válvula através de engrenagens cilíndricas de dentes retos numa relação de transmissão de 3x1 (um giro de 90 ° na válvula corresponde a 270 ° no potenciômetro). O sinal de saída era enviado para uma placa analógica e depois para um indicador de posição analógico situado na parte frontal da caixa de comando.

Como segurança para o sistema era utilizado um dispositivo de torque eletromecânico.

O dispositivo de torque era composto de uma haste e duas micro-chaves eletromecânicas, uma para fechamento e outra para a abertura da válvula. A haste estava acoplada ao parafuso sem fim. Quando ocorria algum sobre torque a haste acionava as micro-chaves e desligava o sistema.

Em ambas as situações a atuação sobre o sistema dava-se de forma automática.

A caixa de comando tinha a seguinte constituição e funcionamento:

- Um indicador analógico de ponteiro para a posição da válvula ao operador local.
- Botões de acionamento para a abertura e fechamento da válvula.

- Uma lâmpada verde para indicar a posição da válvula totalmente aberta.
- Uma lâmpada vermelha para indicar a posição da válvula totalmente fechada.
- Um botão de emergência para desligar o atuador.
- Um seletor de função com três posições: local, inoperante e remoto.

Local - possibilitava a operação local do atuador através das botoeiras de abertura e fechamento.

Inoperante - desligava o atuador no caso de ajuste manual.

Remoto - possibilitava a operação remota da posição da válvula.

#### 4. DESCRIÇÃO E FUNCIONAMENTO DO NOVO SISTEMA

O desenvolvimento do novo sistema baseou-se em três necessidades: o controle da posição da válvula, a medição e controle do torque da válvula (abertura, fechamento e obstrução) e o comando remoto do atuador por um operador remoto através de um microcomputador remoto.

Portanto, a instrumentação proposta consistiu em medir e controlar as variáveis de posição e torque através de um sistema de medição e controle com atuação flexível e com comunicação externa (Fig. 4.1).

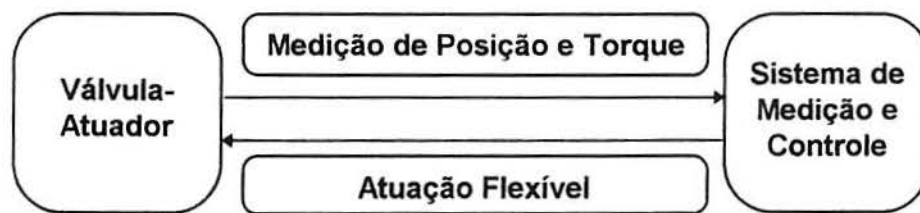


FIGURA 4.1 - Instrumentação Proposta para o Conjunto Válvula-Atuador.

O conjunto válvula-atuador continuou o mesmo.

O sensor de posição utilizado foi o potenciômetro do sistema antigo. O aproveitamento justifica-se pelas seguintes razões:

- a geração de um sinal elétrico na saída do sensor proporcional a posição da válvula;
- a confiabilidade e a repetibilidade dos resultados obtidos experimentalmente;
- a faixa de erro admitida no posicionamento ser de cerca de 1%, superior a fornecida pelo sensor;
- a simplicidade e a economia que representa manter o projeto de um produto e sua linha de produção.

A partir do eixo da válvula tipo borboleta foi projetado um transdutor de torque a base de "strain gauges" - extensômetros de resistência elétrica (ERE's) [1,2,17,29,34].



Os Transdutores a base de ERE's são do tipo eletromecânicos (Fig. 4.2). Sobre a superfície de um elemento elástico (EE) metálico são colados os ERE's. Solicitações mecânicas como torque, força, pressão ou deslocamento provocam deformações específicas ( $\varepsilon$ ) neste EE. Estas deformações geram variações relativas de resistência elétrica ( $\Delta R/R$ ) nos ERE's. Estes, quando ligados em ponte de Wheatstone e excitados por tensão elétrica  $V_i$ , provocam uma variação  $\Delta V_o$  de tensão nos terminais de saída da ponte. A saída adimensional  $\Delta V_o/V_i$  relaciona-se com  $\Delta R/R$  através da função de transferência deste circuito a ser apresentada adiante.

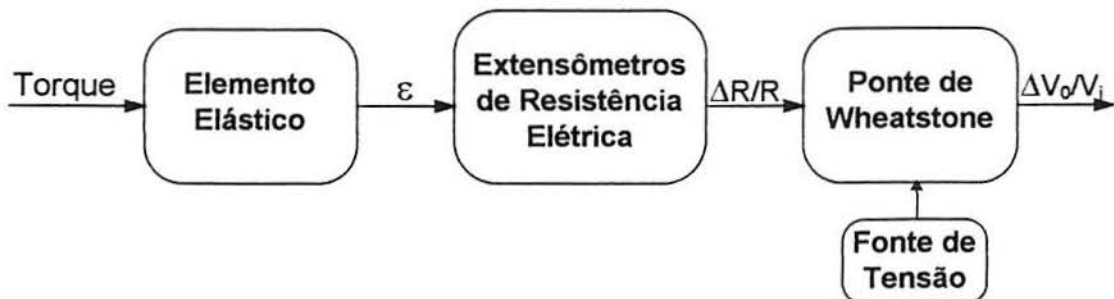


FIGURA 4.2 - Transdutor de Torque Extensométrico.

Para o sistema de medição e controle foi construído um hardware que recebe e condiciona as informações provenientes dos sensores, processa-as de acordo com um algoritmo de controle (software) e comanda o atuador através de um sinal de controle. O elemento principal deste sistema é o microcontrolador 8098 da INTEL, que além do exposto, permite a comunicação externa do conjunto válvula-atuador com o meio através da porta serial.

A atuação sobre a válvula continua sendo através do motor elétrico e caixa de comando. A diferença é que agora os comandos são flexíveis, ou seja, as variáveis podem ser atualizadas.

O microcontrolador 8098 controla a interface de acionamento elétrico de baixa potência. Esta interface é responsável pela ativação das contactoras por meio dos relés. A cada par relé-contactora está associado um sentido de rotação do motor (abertura e fechamento da válvula). A ativação é através do modo Remoto. O acionamento elétrico para o sistema de posicionamento é do tipo on-off. Ambos os

sinais de acionamento são provenientes do microcontrolador e são comandos de posicionamento. No caso de sobre torque o sistema é desligado.

Também foi desenvolvido um dispositivo mecânico de segurança para desligar o sistema nos casos de falha nos parâmetros de controle e comando local por ocasião de manutenção ou obstrução da válvula. O sistema é desligado quando o limite angular da válvula, determinado por duas micro-chaves (uma para abertura e outra para fechamento), é atingido pelo dispositivo mecânico.

## 5. PROJETO DO NOVO SISTEMA

### 5.1 Transdutor de Torque

Tendo em vista o projeto do transdutor de torque, algumas ponderações precisam ser realizadas sobre os elementos que constituem um transdutor extensométrico, conforme Fig. 4.2 do capítulo anterior.

#### 5.1.1 Considerações para o Projeto

##### Elemento Elástico

O elemento elástico é uma das partes mais importantes do transdutor [13,14,29,36]. Sua função é deformar-se elástica e reversivelmente quando solicitado por algum tipo de esforço. Um elemento elástico de qualidade deve possuir [11]:

- boa linearidade - proporcionalidade entre o esforço aplicado e a deformação.
- baixa histerese mecânica - baixa perda de energia devido as fricções internas depois de retirado o esforço mecânico.
- baixa fluência - estabilidade da deformação no tempo sob solicitações mecânicas e temperatura.
- estabilidade metalúrgica - microestrutura estável e livre de tensões internas.
- boa condutividade térmica - capacidade de dissipação do calor gerado pelos extensômetros excitados pela ponte de Wheatstone.

Estas características são próprias dos materiais metálicos. Eles podem ser subdivididos em duas classes: metais de alto módulo de elasticidade e de baixo módulo de elasticidade.

A sensibilidade do elemento elástico depende basicamente do módulo de elasticidade do material, da geometria utilizada, do tipo de deformação (normal ou cisalhante) e do campo de deformações.

Materiais com módulo de elasticidade elevado são indicados para transdutores de alta capacidade de carga. O inverso também é verdadeiro.

A geometria define o tipo de deformação na superfície do elemento elástico e o seu módulo resistente. Quanto menor o módulo resistente tanto maior a sensibilidade.

O campo de deformações gerado é importantíssimo para definição da posição de colagem dos extensômetros. O ideal é que seja homogêneo e concentrado para garantir maior sensibilidade na colagem.

No caso específico de transdutores de torque, há seis geometrias básicas de elemento elástico (Fig. 5.1).

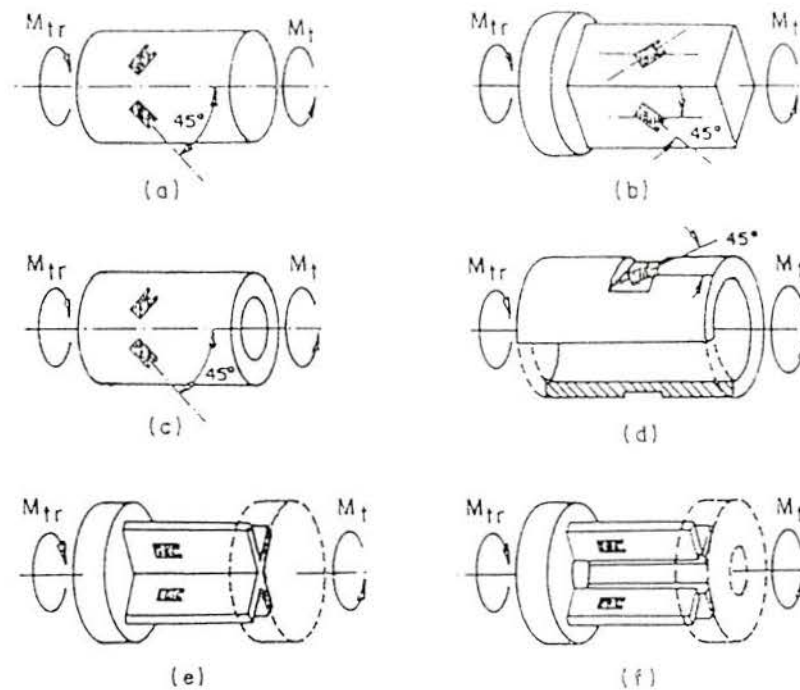


FIGURA 5.1 - Geometrias Básicas do Elemento Elástico para Transdutores Torque.

Para torque elevado: a) seção circular maciça e b) seção quadrada.  
 Para torque médio: c) seção circular vazada e d) seção circular vazada com chanfro.  
 Para baixo torque e) seção cruciforme e f) seção cruciforme vazada.

Fonte: Doebelin, 1990, p.420

A partir de modelos matemáticos desenvolvidos para cada geometria e da Resistência dos Materiais [18,42], pode-se determinar a deformação específica  $\epsilon$  na superfície do elemento elástico.

### Extensômetros de Resistência Elétrica

O "strain gauge" [6,17,20,23] ou extensômetro de resistência elétrica é um sensor de deformações específicas. A sua principal aplicação é em análise de tensões experimental e em projeto de transdutores sensores de força, torque, pressão, fluxo e outros.

Os extensômetros mais usuais para a construção de transdutores são os do tipo folha. Sua construção é baseada em técnicas semelhantes às utilizadas em circuitos impressos. São classificados em função da aplicação e tipo de esforços atuantes no elemento elástico de interesse.

Para a seleção do extensômetro deve-se levar em consideração os seguintes fatores [19,29,31]:

- o tipo de extensômetro - quanto a base (poliamida, epóxi e epóxi reforçado), a grade (constantan, karma, isoelástica) e a aplicação;
- o comprimento e a área da grade ativa - é função do campo de deformações (se é homogêneo ou não homogêneo) e da capacidade de dissipação térmica;
- a resistência elétrica - depende da tensão de excitação da ponte de Wheatstone (5 ou 10 V) e da instrumentação utilizada. Influencia a relação sinal de saída versus ruído. Os mais usuais são de 120  $\Omega$  e 350  $\Omega$ ;
- o material do elemento elástico - está associado a compensação da dilatação térmica e dissipação de energia, e
- o intervalo de temperatura que será usado.

Uma vez escolhido o extensômetro, em função de sua base e faixa de temperatura de trabalho, deve ser escolhido o adesivo compatível. Variações na sensibilidade, histerese mecânica e drift térmico podem ocorrer devido ao adesivo e colagem.

Na união extensômetro - elemento elástico, pressupõem-se que toda a deformação que ocorre na superfície do elemento elástico é transmitida a grade do extensômetro. Para tanto, a espessura do conjunto camada de cola e base do extensômetro devem ser desprezíveis frente à espessura do elemento elástico [22].

As variações relativas de resistência elétrica são proporcionais a média das deformações relativas sentidas na área sobre a qual estão colados os extensômetros [6]. Por isso é importante realizar a colagem sobre o campo de deformações máximas do elemento elástico.

Para o projeto de transdutores, uma das características mais importantes do extensômetro é a sua sensibilidade ("gage-factor"), definida por:

$$K = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon} \quad (1)$$

Esta sensibilidade é definida para a direção ativa do extensômetro, ou seja, a direção longitudinal da grade. Recomenda-se que esta direção esteja orientada segundo a direção principal das deformações [22] para se ter sensibilidade máxima. Para minorar o efeito da sensibilidade transversal é aconselhável utilizar extensômetros cuja relação comprimento/largura da grade seja a maior possível (44).

Na maioria dos extensômetros tipo folha (grade de Ni-Cr ou Ni-Cu), o valor da sensibilidade situa-se em torno de 2 ( $\Omega/\Omega$ )/(m/m).

As características desejadas no extensômetro quanto à sensibilidade K, são:

- ser constante,
- ser independente da temperatura,
- ser independente da deformação atuante.

As ligas metálicas usadas na confecção de extensômetros procuram manter estas características e tornar o extensômetro autocompensado para materiais usuais na construção de elementos elásticos. Para aplicações, é sempre recomendado a consulta

às especificações do fabricante como colas, tensão de excitação e faixas de temperatura [31].

Mesmo usando extensômetros autocompensados para o material do elemento elástico, a colagem em superfícies com pequenos raios de curvatura provoca erros devido a variação da temperatura, tanto maiores quanto menor for o raio de curvatura, seja côncavo ou convexo. Estes erros podem ser compensados pela ponte de Wheatstone.

### Ponte de Wheatstone

Depois de colados, os extensômetros são ligados de modo a formar uma Ponte de Wheatstone [6,7,19,21,24], Fig. 5.2.

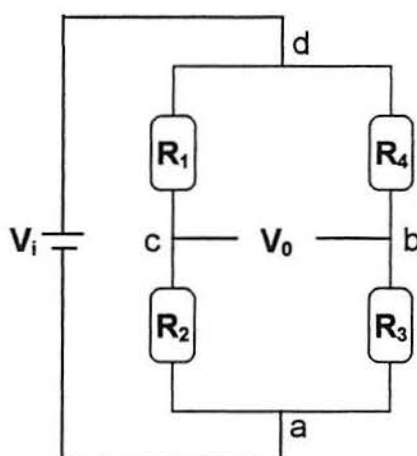


FIGURA 5.2 - Ponte de Wheatstone. Os extensômetros  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$  são denominados de braços da ponte. A ponte é excitada por uma tensão " $V_i$ " através dos terminais de alimentação "a" e "d". Os terminais "b" e "c" fornecem a tensão de saída " $V_0$ " da ponte. Os conjuntos  $(R_1, R_2)$  e  $(R_3, R_4)$  constituem os dois ramos da ponte.

As pontes quando usadas na comparação de impedâncias (resistores, capacitores ou indutores) e na medição de variações de impedâncias são denominadas de *Pontes de Balanço, de Nulo ou de Comparação*. Os circuitos de excitação e medição das pontes de balanço não são exigentes quanto a instrumentação eletrônica a ser usada, não requerem fontes estabilizadas para

alimentá-las e nem necessitam de detetores de corrente ou tensão proporcionais na saída. Necessitam apenas de detetores de nulo (tensão ou corrente zero) com resolução de zero ou sensibilidade suficiente para a medição. A tensão de balanço independe de tensão de excitação (a tensão de saída é zero). Sempre que possível as impedâncias a serem comparadas devem ser dispostas lado a lado num mesmo ramo da ponte.

Nos transdutores extensométricos o interesse está centrado na medição das variações relativas das resistências elétricas quando o elemento elástico for solicitado por algum tipo de esforço. Neste caso, deve-se medir a variação da tensão de saída por unidade de tensão de excitação da ponte, ou seja, a variação relativa de tensão. As pontes usadas com esta finalidade são denominadas de *Pontes de Desbalanço, de Variação ou de Deflexão*. Como a condição de desbalanço é função da tensão de excitação, passa a ser importantíssimo o uso de uma fonte de tensão (ou corrente) estabilizada.

Na prática, se o elemento elástico apresentar extensômetros sob deformação em todos os braços da ponte, variando assim as suas resistências elétricas, tem-se uma configuração de ponte conhecida como ponte inteira ou completa; se apenas um dos ramos apresentar variações de resistência elétrica, a configuração é de meia ponte; e se apenas um braço apresentar variação de resistência elétrica, tem-se a configuração de um quarto de ponte.

A seguir será desenvolvida de maneira simplificada a equação geral da ponte e analisar-se-á os casos mencionados acima.

A tensão de saída da ponte  $V_0$  (Fig. 5.2) pode ser determinada considerando a ponte como dois divisores de tensão:

$$V_{ca} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_i \quad (a)$$

$$V_{ba} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} \cdot V_i \quad (b)$$



A tensão de saída será dada pela diferença de (a) e (b)

$$V_0 = V_{ca} - V_{ba} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} V_i \quad (2)$$

Para a ponte no balanço, ou seja,

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad \text{ou} \quad \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad (c)$$

a tensão de saída da equação (2) será nula ( $V_0 = 0$ ).

Se esta condição (para um estímulo de entrada nulo) não é atingida após a construção do transdutor, deve-se fazer o balanceamento na ponte através de resistores de ajuste ou no condicionador de sinais.

Quando as resistências  $R_i$  ( $i$  de 1 a 4) são variadas por quantidades finitas  $\Delta R_i$  ( $i$  de 1 a 4) em torno do balanço, devido a deformações no elemento elástico, desenvolve-se uma variação relativa de tensão na saída  $\Delta V_0/V_i$ , cujo valor é dado a partir da equação (2):

$$\frac{\Delta V_0}{V_i} = \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)} \quad (d)$$

Expandindo (d) e negligenciando os termos de segunda ordem, obtém-se a equação do sinal de saída da ponte de desbalanço:

$$\frac{\Delta V_0}{V_i} = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (3)$$

Usualmente, esta equação é apresentada sob a forma do parâmetro  $B$  dado pela razão  $R_2/R_1$ :

$$\frac{\Delta V_0}{V_i} = \frac{B}{(1+B)^2} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right). \quad (4)$$

A equação (4) permite a definição da sensibilidade  $S_p$  da ponte de desbalanço:

$$S_p = \frac{B}{(I + B)^2} \quad (5)$$

As variáveis da equação da ponte de desbalanço (4) indicam os pontos críticos que devem ser considerados no projeto quanto ao sinal de saída e linearidade [6,7,14,28]:

- a) as variações relativas das resistências elétricas - estão associadas às deformações e à colagem dos extensômetros,
- b) as ligações dos extensômetros - estão associadas a amplificação do sinal,
- c) a tensão de excitação da ponte - está associada a estabilidade do sinal de saída e sua amplificação. Seu valor é limitado pela potência que pode ser dissipada pelo extensômetro e elemento elástico, geralmente é utilizada 5 V para extensômetros de 120  $\Omega$  ou 10 V para extensômetros de 350  $\Omega$ .

Quanto ao sinal de saída, se as variações relativas de resistência elétrica  $\Delta R_i/R_i$  (i de 1 a 4) em resistores de um mesmo ramo são iguais em módulo e de mesmo sinal, a tensão de desbalanço é zero. Ou seja, o sinal de saída não é afetado por outras variações indesejadas (como temperatura e outras deformações). Se as variações relativas de resistência elétrica  $\Delta R_i/R_i$  (i de 1 a 4) em resistores de um mesmo ramo são iguais em módulo mas de sinal contrário, a tensão de desbalanço é máxima, ou seja, um (1).

Quanto a linearidade, é necessário considerar os termos de segunda ordem que foram desconsiderados na equação (4), que fica [11]:

$$\frac{\Delta V_0}{V_i} = \frac{B}{(I+B)^2} \cdot \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} + \frac{\Delta R_1}{R_1} \cdot \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \cdot \frac{\Delta R_4}{R_4}}{\left(1 + \frac{I}{I+B} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{B}{I+B} \cdot \frac{\Delta R_2}{R_2}\right) \cdot \left(1 + \frac{B}{I+B} \cdot \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{I}{I+B} \cdot \frac{\Delta R_4}{R_4}\right)} \quad (6)$$

O segundo termo da equação (6) mostra que a ponte de desbalanço, para variações elétricas finitas em torno do balanço, é linear somente em duas situações:

- Quando possui dois elementos ativos, inicialmente iguais ( $B=1$ ), ligados em meia ponte, ou seja, num mesmo ramo da ponte, submetidos a deformações relativas iguais em módulo mas de sinal contrário ( $(R_1 + \Delta R_1)$  e  $(R_2 - \Delta R_2)$  no ramo "acd" da Fig. 5.2).
- Quando possui quatro elementos ativos, inicialmente iguais ( $B=1$ ), ligados em ponte inteira submetidos a deformações relativas iguais em módulo em cada braço, mas de sinal contrário aos adjacentes. Para esta condição, a ponte da Fig.5.2 apresentaria as seguintes variações de resistência:  $(R_1 + \Delta R_1)$  e  $(R_2 - \Delta R_2)$  no ramo "acd" e  $(R_3 + \Delta R_3)$  e  $(R_4 - \Delta R_4)$  no ramo "abd".

A equação geral da Ponte de Wheatstone pode ser expressa por:

$$\frac{\Delta V_o}{V_i} = S_p \cdot (1 - \eta) \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{\Delta R_i}{R_i} \cdot (-1)^{j+1} \quad (7)$$

onde

$$\eta = \frac{\xi}{1 + \xi} \quad (e)$$

e  $\xi$  é

$$\xi = \frac{1}{(1+B)} \cdot \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} + B \cdot \frac{\Delta R_2}{R_2} + B \cdot \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (f)$$

O parâmetro  $\eta$  é o "desvio de linearidade" do sinal de saída do circuito ponte. É também denominado de alinearidade elétrica, termo válido para qualquer transdutor que incorpora um circuito ponte para os seus sensores.

### 5.1.2 Projeto Mecânico do Transdutor

O projeto completo de um transdutor extensométrico [13,14,29] envolve outros itens como capacidade nominal, sinal de saída nominal, dimensões, tipo de carregamento, precisão, custo, etc., todos em função da finalidade desejada.

O Projeto Mecânico do Transdutor considera somente a parte referente ao elemento elástico. Pode ser por dimensionamento ou por adaptação (verificação).

No primeiro caso, a partir de alguns parâmetros predeterminados como grandeza física a ser medida, capacidade nominal e dimensões, arbitra-se uma geometria, o material e um coeficiente de segurança e dimensiona-se o elemento elástico para o sinal de saída desejado. Havendo necessidade, altera-se as dimensões, o material ou a geometria até se obter o sinal de saída desejado em função das deformações [14].

No segundo caso, parte-se de uma geometria, dimensões, material e tipo de esforços definidos, e então calcula-se as deformações e o sinal de saída verificando se é satisfatório para a carga nominal estimada. Se o sinal de saída não é satisfatório tenta-se compensá-lo eletronicamente ou altera-se o projeto.

Neste trabalho, o projeto mecânico do elemento elástico do transdutor de torque é do tipo adaptação. Das peças da válvula AEP16, a que mais se adequou para ser o elemento elástico foi o eixo da válvula borboleta do atuador (Fig. 5.3).

As principais razões para esta escolha foram:

- a não modificação do projeto original, pois implicaria em maiores custos;
- o eixo estar diretamente sujeito ao torque gerado pela válvula, apresentando assim boa deformação elástica para a colagem dos extensômetros;
- a disponibilidade de área física para a colagem e ligação dos extensômetros;
- a facilidade para introduzir a fiação de alimentação e saída da ponte de Wheatstone.

O projeto mecânico resumiu-se ao cálculo da deformação  $\varepsilon$  e sua verificação a limites aceitáveis, como será descrito a seguir.



FIGURA 5.3 - Elemento Elástico Indicado para o Transdutor de Torque.

As deformações relativas [1,18,42] que surgem na superfície do elemento elástico sob a ação de esforços de torção puro, são devidas as tensões de cisalhamento que atuam na superfície de corte ou seção do eixo. Estas tensões se distribuem linearmente ao longo do raio da seção sendo mínimas ao centro e máximas na superfície (Fig. 5.4).

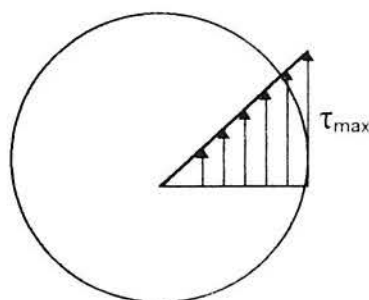


FIGURA 5.4 - Tensões de Cisalhamento em Seção Maciça Sujeita a Torção Pura.

A tensão máxima de cisalhamento em um eixo maciço sob torção é dada por:

$$\tau_{max} = \frac{M_t}{W_p} \quad (8)$$

onde:

$M_t$  = momento torsor

$W_p$  = momento resistente polar da seção.

Pela Resistência dos Materiais, para eixos sob torção pura, sabe-se que a  $45^\circ$  em relação ao eixo longitudinal as tensões normais são máximas e iguais em módulo às tensões de cisalhamento. Como na extensometria está-se interessado nas tensões normais, então, se um extensômetro estiver colado a  $45^\circ$  em relação ao plano longitudinal, os seus lados estarão sujeitos a deformações longitudinais e transversais iguais em módulo devido às tensões normais de tração e de compressão, respectivamente, ou seja:

$$\sigma_t = -\sigma_c = \tau_{max} = \frac{M_t}{W_p} \quad (9)$$

onde:

$\sigma_t$  = tensão normal de tração

$\sigma_c$  = tensão normal de compressão

Pela Lei de Hooke para o estado plano de tensões, pode-se expressar as deformações superficiais produzidas por estas tensões [1,18] como:

$$\varepsilon_l = \frac{1}{E} (\sigma_t - \nu \sigma_c) = \frac{\tau_{max}}{E} \cdot (1 + \nu) \quad (10 a)$$

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E} (\sigma_c - \nu \sigma_t) = - \frac{\tau_{max}}{E} \cdot (1 + \nu) \quad (10 b)$$

onde:

$\varepsilon_l$  = deformação longitudinal

$\varepsilon_t$  = deformação transversal

$\nu$  = coeficiente de Poisson

A não coincidência da orientação da grade do extensômetro com as deformações máximas implica em menor sinal de saída [23].

A expressão para o cálculo da deformação superficial é obtida substituindo a equação (8) em (10) e o momento resistente polar para seção cilíndrica maciça [1, 14]:

$$\varepsilon = \frac{16. M_{tn}}{E. \pi. D^3} \cdot (1 + \nu) \quad (11)$$

onde:

$M_{tn}$  = momento tórsor nominal

E = módulo de elasticidade do material

D = diâmetro externo do eixo

O eixo da válvula foi fabricado com aço ABNT 1045 ( $E = 210 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ ),  $D = 0,0165 \text{ m}$ ,  $\nu = 0,3$  e  $M_{tn} = 40 \text{ Nm}$  (coeficiente de segurança 2). Nestas condições, pela equação (11), a deformação específica resulta em  $287 \text{ } \mu\text{m/m}$ .

### 5.1.3 Projeto Elétrico do Transdutor

Os extensômetros selecionados para o transdutor foram do tipo KFC-2-D<sub>2</sub>-11, marca Kyowa. São do tipo folha, conhecidos como "espinha de peixe" (Fig. 5.5).



FIGURA 5.5 - Extensômetro de Resistência Elétrica Selecionado para o Transdutor de Torque.

As suas principais características são:

- resistência elétrica:  $(120 \pm 0,4) \Omega$
- sensibilidade (K):  $2,03 \pm 1\% (\Omega/\Omega)/(m/m)$
- coeficiente de dilatação térmica:  $10,8 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$
- comprimento da grade: 2 mm.

A sua forma construtiva característica (dois em um e grades à  $45^\circ$ ) possibilita a prática de apenas duas colagens para ponte completa e diminui a margem de erros

na colagem por desalinhamentos com as deformações máximas (maior sinal de saída provável).

O sinal de saída do extensômetro  $\Delta R/R$  é obtido através da equação (1):

$$\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon \quad (12)$$

Substituindo a equação (12) na equação (7), pode-se escrever a solução particular para o cálculo do sinal de saída em mV/V do transdutor de torque extensométrico projetado (para ponte completa otimizada):

$$\frac{\Delta V_o}{V_i} = K \cdot \varepsilon \quad (13)$$

sendo  $\varepsilon$  dado pela equação (11).

Para o transdutor construído, viu-se que cada um dos quatro extensômetros está submetido a uma deformação específica máxima (nominal) de  $\varepsilon = 287 \mu\text{m/m}$ . Portanto, o circuito ponte formado por estes extensômetros apresentará um sinal de saída nominal de 0,57 mV/V.

O sinal de saída dos transdutores comerciais, para carga nominal, geralmente é de 2 mV/V. Portanto, para melhorar o sinal encontrado surgiram duas alternativas:

- a) diminuir o momento resistente polar da seção para melhorar a sensibilidade do elemento elástico;
- b) amplificar o sinal de saída eletronicamente através do condicionador de sinais.

A forma mais simples de diminuir o momento de inércia do elemento elástico (o eixo da válvula), sem comprometer o projeto (físico e funcional), é torná-lo vazado. Considerando esta possibilidade, substituindo o momento resistente polar do eixo maciço pelo eixo vazado na equação (9), obtém-se a nova equação para a deformação máxima [1,14]:



$$\varepsilon = \frac{16.D.M_m}{E.\pi.(D^4 - d^4)}.(1 + \nu) \quad (14)$$

Dividindo a equação (9) pela equação (14) tem-se:

$$\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_v} = 1 - \frac{d^4}{D^4} \quad (15)$$

onde:

$\varepsilon_m$  = deformação para elemento elástico cilíndrico maciço

$\varepsilon_v$  = deformação para elemento elástico cilíndrico vazado

$d$  = diâmetro interno

$D$  = diâmetro externo

A equação (15) fornece a razão da deformação do eixo maciço em relação ao vazado. O limite da otimização do sinal de saída será a resistência mecânica necessária no eixo previsto em projeto. Neste limite, obter-se-ia um sinal de saída 60% superior ao calculado.

Os cálculos mostram que a melhor situação nesta primeira alternativa ainda fornece um sinal de saída pequeno, por isso, optou-se por amplificá-lo eletronicamente.

## 5.2 Hardware

O projeto do circuito eletrônico foi realizado baseado nos seguintes pontos:

- a) Compactação: o hardware (Fig. 5.6) deveria ocupar o menor espaço possível de forma a ser viável sua inclusão no interior do atuador. Sua utilização não deveria implicar em mudança no projeto mecânico do atuador.
- b) Confiabilidade: as condições de operação do circuito dentro do atuador, localizado em algum ponto de uma planta industrial, exigiam um projeto simples e confiável de forma a minimizar a necessidade de manutenção.

- c) Custo/Benefício: o custo não deveria ser representativo frente ao valor total do conjunto atuador/válvula. O benefício é que a inclusão desta nova tecnologia possibilitasse uma série de novos recursos não disponíveis anteriormente.

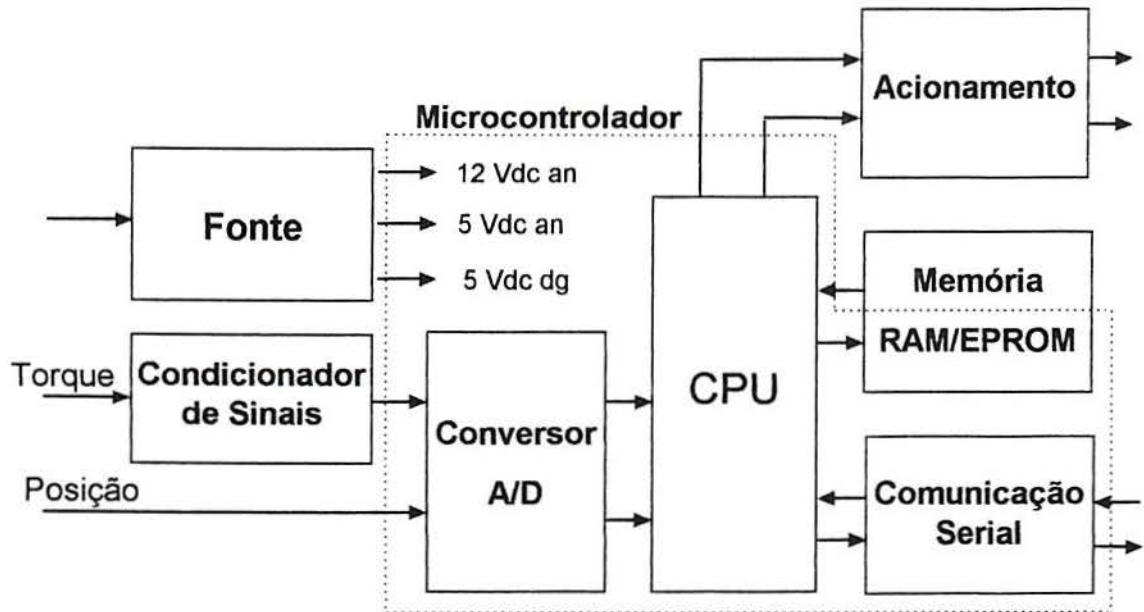


FIGURA 5.6 - Diagrama em Blocos Simplificado do Hardware Construído.

### Fonte

Este bloco é responsável pela alimentação do circuito. A tensão da rede 220 V passa por um transformador abaixador (12+12) e é retificada através de um retificador de onda completa. A tensão retificada é então filtrada, de modo a obter o mínimo de ondulação (ripple) possível, gerando 12 V para alimentar o circuito de acionamento e os integrados do circuito analógico. Esta tensão é também regulada de modo a dar origem a tensões estáveis de 5 V para o circuito analógico e 5 V para o circuito digital.

### Condicionador de sinais

Para o desenvolvimento do condicionador de sinais (Fig. 5.7), procurou-se satisfazer as condições relacionadas abaixo:

- proporcionar uma tensão de alimentação estável para a ponte de Wheatstone. Optou-se pela tensão de alimentação contínua (dc) pela possibilidade de um circuito mais simples [27,32].

- amplificar o sinal de saída da ponte de Wheatstone. O amplificador deve ter elevada impedância de entrada para não influir na impedância da ponte e alta razão de rejeição de modo comum (CMRR), pois deve amplificar apenas a tensão diferencial  $\Delta V_0$ . Como o conversor A/D opera com tensões na faixa de zero a 5 V dc, enquanto o torquímetro e o amplificador tem como saída tensões simétricas  $\pm 5$  dc, portanto, este bloco também deve compatibilizar esses níveis de tensão. Quando não existir torque o sinal de saída do bloco de condicionamento deve ser 2,5 V dc, de modo a 5 Vdc corresponder ao torque máximo num sentido e zero V dc em outro.
- corrigir possível "offset" do torquímetro.

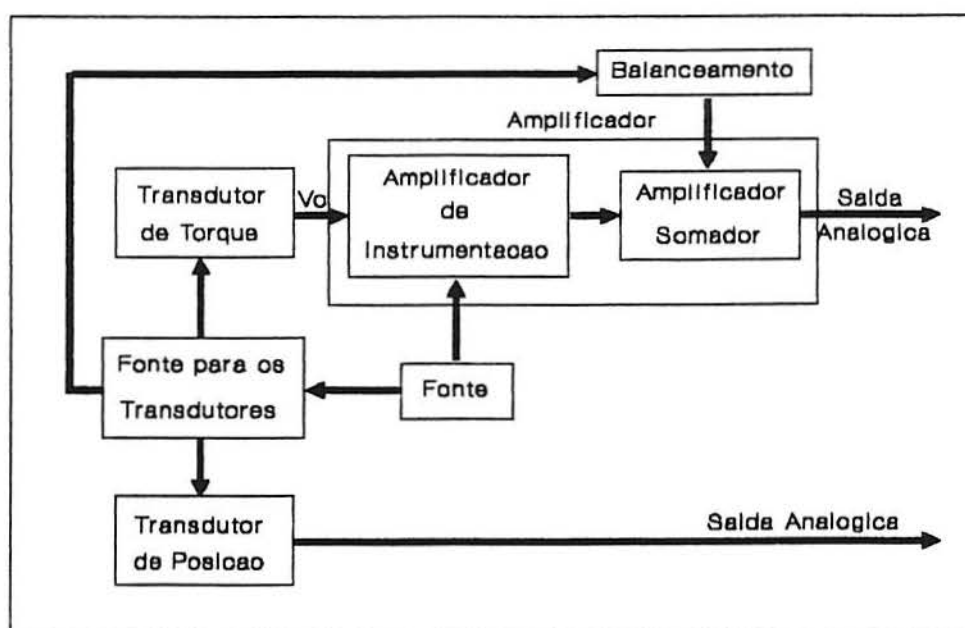


FIGURA 5.7 - Diagrama em Blocos do Condicionador de Sinais Construído.

*Fonte para os Transdutores* - nos transdutores é utilizada a tensão de 5 V. Tendo em vista a necessidade de um hardware compacto, a possibilidade de contornar-se a razão de rejeição de modo comum referenciando-se todo o circuito em 2,5 V e o não interesse no valor de torque medido e sim de um sinal de saída predeterminado de referência para a lógica de controle, decidiu-se não utilizar uma tensão simétrica para alimentar a ponte de Wheatstone.

*Amplificador* - o amplificador é formado por dois módulos diferentes: um amplificador de instrumentação e um amplificador somador. O amplificador de instrumentação é um amplificador diferencial, ou seja, amplifica a diferença de duas

entradas. Possui elevada impedância de entrada e grande razão de rejeição de modo comum (CMRR) para atender as exigências da ponte de extensômetros. O amplificador somador amplifica o valor obtido no primeiro módulo e permite o balanceamento da ponte de Wheatstone. A amplificação total é aproximadamente 500 vezes, sendo 500 no primeiro módulo e 1 no segundo. A saída do amplificador somador é uma tensão de zero a 5 V.

*Balanceamento* - este módulo tem por objetivo contrabalançar uma eventual tensão de desbalanço na saída da ponte que não seja proveniente de uma carga aplicada ao elemento elástico. Este desbalanço pode ser devido a diferenças nos extensômetros da ponte ou tensões provenientes da colagem dos mesmos. O balanceamento é realizado através de uma tensão de correção de mesmo módulo e sinal contrário.

#### Conversor A/D (analógico-digital)

É responsável pela transformação dos sinais de torque e posição analógicos em palavras digitais correspondentes, de forma que possam ser lidos pela CPU. Na verdade o conversor A/D utilizado é um recurso interno do microcontrolador 8098, usado como CPU do sistema.

#### CPU (Unidade Central de Processamento)

É o elemento responsável pela "inteligência" do sistema, pois executa uma seqüência de instruções que formam um programa (software) que está guardado na memória.

#### Memória

Pode ser dividida em duas partes: a memória RAM, a memória interna onde são armazenados os dados; e a memória EPROM, a memória externa onde está armazenado o programa.

#### Acionamento

Faz a interface entre o circuito digital (baixa potência) e o circuito de alta potência do quadro de comandos, que realmente aciona o motor do atuador. Na entrada

do bloco de acionamento existem dois sinais provenientes do microcontrolador, um abre a válvula e outro fecha-a. Cada um desses sinais aciona um relé que está conectado a uma das contactoras do quadro de comando, que, por sua vez, estão ligadas ao motor. Deste modo um sinal do microcontrolador pode ligar o motor, movimentando a válvula num ou noutro sentido.

### Comunicação Serial

A idéia do atuador inteligente só é possível com a comunicação com o mundo exterior, de forma que possa ser comandado remotamente através de um microcomputador. Utilizou-se o padrão RS-485 de comunicação serial voltado a aplicações em ambientes industriais, por ter elevada rejeição de ruído, pois é diferencial.

Além dos recursos disponíveis citados da arquitetura interna do 8098, encontram-se ainda: timers, várias fontes de interrupção (hardware e software), portas de I/O e "Watch-dog timer".

### **5.3 Dispositivo Mecânico de Segurança**

Levando-se em consideração a possibilidade de ocorrência de alguma falha nos parâmetros de controle e o comando local por parte de um operador em ocasiões de manutenção ou obstrução da válvula, fez-se necessário sensores de fim de curso para desligar o sistema após um limite angular predeterminado na abertura e fechamento da válvula.

A melhor opção em termos de precisão, repetibilidade e segurança, foi de um dispositivo eletromecânico constituído pelas duas micro-chaves da "controladora de torque" anterior e um elemento mecânico atuador. As micro-chaves estariam fixas no disco original (solidário à carcaça). O elemento atuador estaria acoplado ao eixo da válvula através de chaveta, entre a engrenagem que atua diretamente sobre o potenciômetro e o disco referenciado, numa folga de 1,5 mm.

O dispositivo eletromecânico, além de não prejudicar o projeto original, proporciona um funcionamento em concordância com o transdutor de posição.

## 6. MONTAGEM DO NOVO SISTEMA

### 6.1 Construção do Transdutor de Torque

A construção do transdutor de torque (Fig.6.1) consistiu basicamente na usinagem do elemento elástico, colagem dos extensômetros e ligação em ponte de Wheatstone.

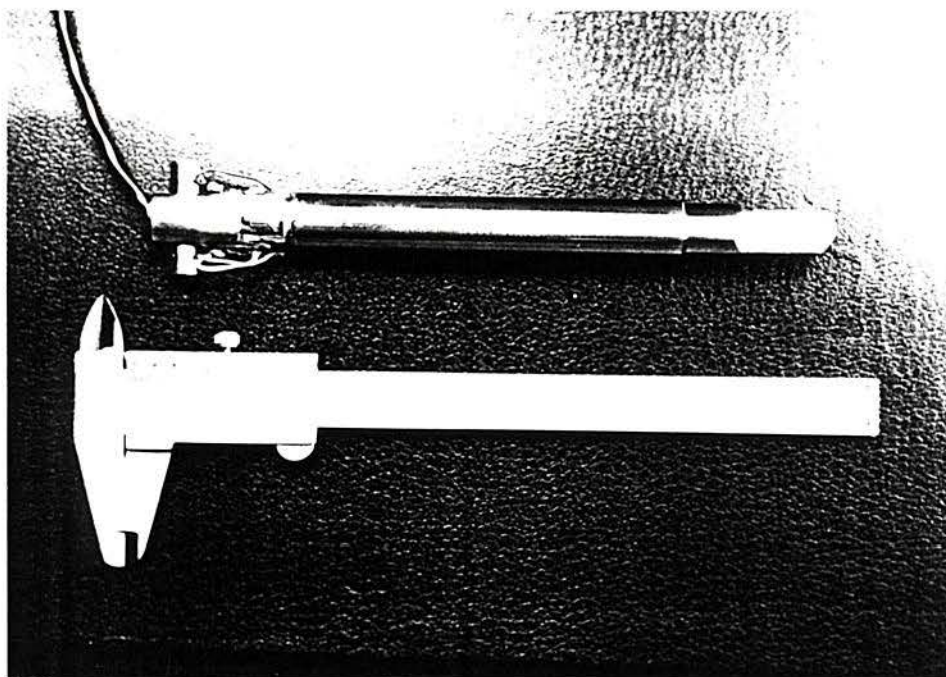


FIGURA 6.1 - Foto do Transdutor de Torque Construído.

A usinagem realizada na extremidade superior do eixo da válvula foi parcial no sentido longitudinal e total no sentido transversal, o suficiente para permitir a passagem do cabo de alimentação e saída da ponte.

O procedimento adotado na preparação superficial do elemento elástico para a colagem dos extensômetros foi o recomendado pelo fabricante Micro Measurements [30]. Consiste basicamente no lixamento da superfície (lixa de granulometria 320), na limpeza de graxas e gorduras e no uso de produto antioxidante.

Para a colagem foi utilizada a cola Epóxi EP310 da Hottinger Baldwin Messtchnick (HBM), pois proporciona maior durabilidade, menor ocorrência de fissuras e melhor adesão. O processo de cura da cola foi realizada em estufa com temperatura controlada em 180 °C por duas horas, seguido de resfriamento lento.

Os terminais foram do tipo CTF-75D e na proteção e isolamento dos extensômetros utilizou-se M-COAT-A, ambos da Micro Measurements.

Para a saída externa do cabo (para fora do atuador), foi necessário realizar um furo no eixo de transmissão do redutor para a válvula (Fig.6.2).

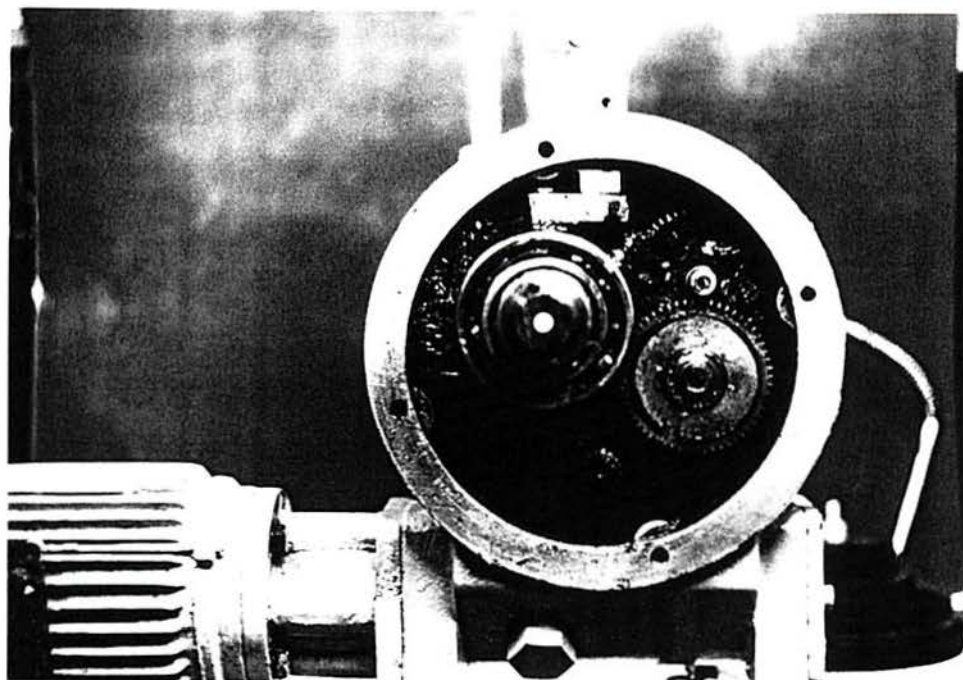


FIGURA 6.2 - Foto do Eixo de Transmissão do Redutor Usinado.

## 6.2 Construção do Hardware

Devido as restrições de projeto (compactação, confiabilidade e custo-benefício) , o hardware foi construído seccionado em duas partes: circuito analógico e digital (Fig.6.3).

Na montagem, as placas analógicas e digital ficam sobrepostas e são fixadas sobre um disco solidário a carcaça no interior do atuador.

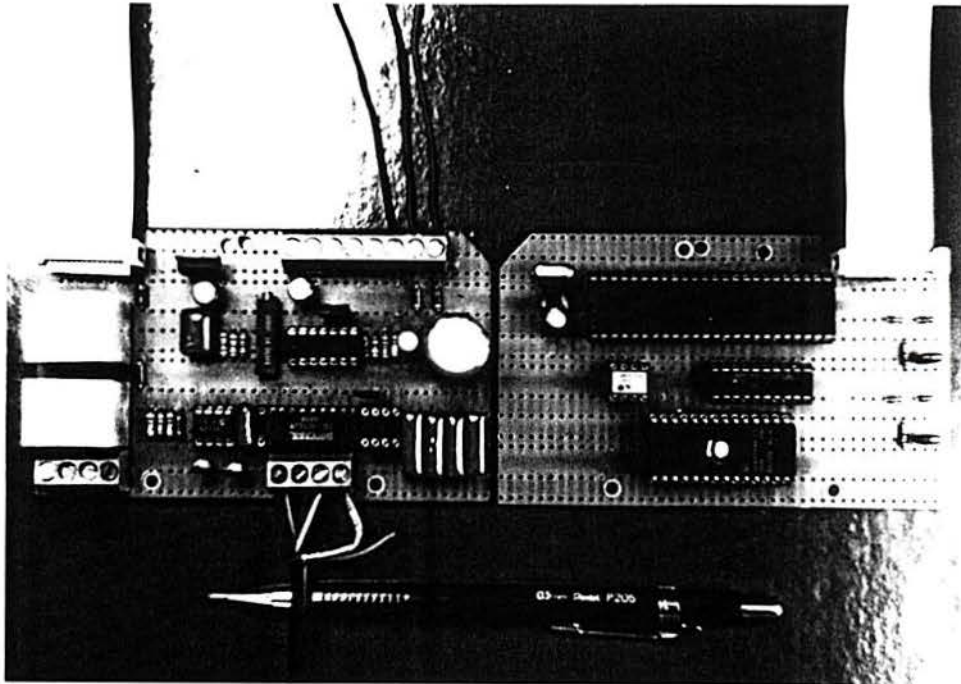


FIGURA 6.3 - Foto do Hardware Construído.

### 6.3 Construção do Dispositivo de Segurança

Consistiu em posicionar e fixar duas micro-chaves sob o disco solidário a carcaça no interior do atuador e na adaptação de uma arruela como um anel atuador (Fig. 6.4 e 6.5).

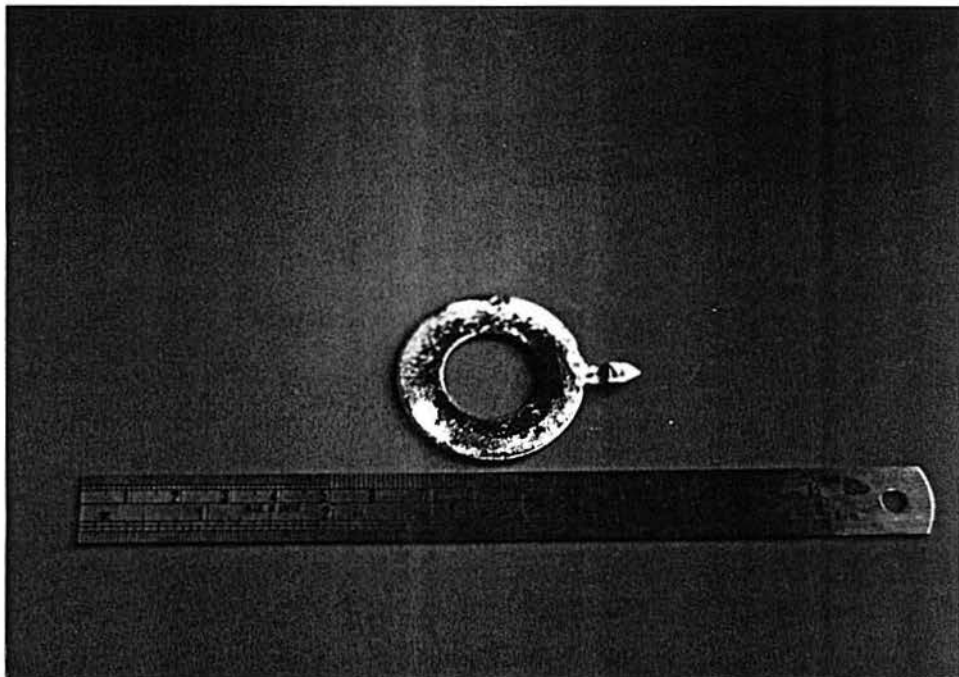


FIGURA 6.4 - Foto do Anel Atuador.



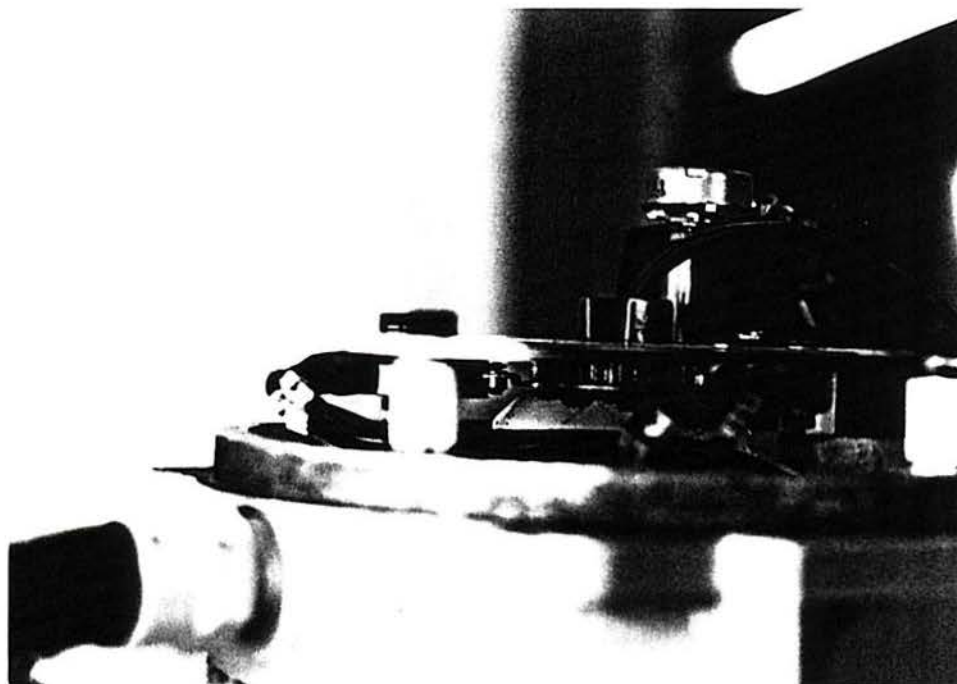


FIGURA 6.5 - Foto do Dispositivo de Segurança Eletromecânico Montado.

#### 6.4 Desenvolvimento do Software

O software é o responsável pela aquisição de dados coletados pelo hardware, pelo tratamento dos mesmos e pela tomada de decisões que o caracteriza como unidade inteligente. Além disso, o software implementa a comunicação de dados com sistemas acoplados ao barramento, ou seja, permite a integração do atuador a um sistema moderno de instrumentação.

A programação para o microcontrolador 8098 foi efetuada utilizando-se de um compilador C. Para os tratamentos de mais baixo nível utilizou-se um assembler. O emprego da linguagem C justifica-se pela portabilidade de código, o poder de trabalhar em baixo nível (como acesso a registradores), a facilidade de escrita do código fonte e a disponibilidade de bons compiladores para linguagens de microcontroladores.

O software desenvolvido pode ser subdividido em três partes principais. Estas partes compõem, segundo o modelo de referência OSI/ISO (Open Systems Interconnections), as camadas ou níveis: Físico, Enlace de Dados e Aplicação. O protocolo de comunicação está baseado numa versão simplificada do PROFIBUS [41].

- Nível Físico - descreve as características de hardware de acesso ao meio físico, e em relação ao software, tem a função de controle dos circuitos integrados que viabilizam a comunicação com o barramento. Esta camada apresenta um rotina ligada diretamente a manipulação da interface serial. Esta é ativada por interrupção (roda independente do programa de aplicação) a cada caractere recebido pela interface serial. Quando uma mensagem completa é recebida, a função sinaliza para a camada seguinte (Enlace de Dados) que os dados podem ser processados.
- Enlace de Dados - é decomposta em duas subcamadas: o FAC - Field Access Control e o FLC - Field Link Control. O FAC é responsável pelo controle de acesso ao barramento e constitui-se numa rotina que é executada periodicamente (interrupção) e de forma transparente ao programa de aplicação. Encarrega-se de enviar e receber dados da camada física que está ligada ao barramento para a segunda camada e implementa o protocolo para uma estação escrava de barramento. O FLC faz a ligação lógica entre o programa de aplicação e a FAC e se compõe de primitivas ou funções que são chamadas pela aplicação para a manipulação de dados processados pela FAC oriundos de outras estações.
- Aplicação - é a camada em que se efetiva a tomada de decisões baseado em parâmetros recebidos dos transdutores sobre as variáveis controladas. Constitui a rotina principal do software de controle do atuador. A aplicação é responsável pelas seguintes funções:
  - a) *Inicialização das variáveis operacionais do atuador* - o programa embutido em memória contém parâmetros preselecionados para cada modelo de atuador-válvula e que são carregados como "default" para a aplicação.
  - b) *Posicionamento inicial da válvula* - após a inicialização do sistema, o atuador deslocará a válvula para uma posição previamente escolhida via hardware. Na placa do controlador é possível selecionar a posição inicial em dois valores: totalmente aberta ou totalmente fechada. Esta característica é necessária em caso de situações de volta de energia e também pela eventual falha de comunicação.
  - c) *Ativação da interface serial* - antes de se programar a interface serial, o microcontrolador espera por um sinal de sincronismo (linha muda) vindo pelo

barramento. A taxa de comunicação, o modo de programação e as máscaras de interrupção do microcontrolador são ajustadas.

- d) *Ativação das rotinas de controle de acesso ao barramento* - a rotina responsável pelo acesso ao meio, que roda em "background", via interrupção, é ativada. É utilizado o recurso timer do 8098 para esta função. A partir deste momento as mensagens recebidas pela interface serial podem ser processadas pela aplicação via funções do FLC.
- e) *Leitura do torquímetro* - é efetuado uma média de leituras do conversor A/D (canal 5) para atenuar ruídos elétricos e de quantização. O resultado é armazenado em uma variável acessível pelo barramento através de uma requisição de dados.
- f) *Leitura da posição da válvula* - outro canal do conversor A/D (canal 4) é utilizado para a determinação da posição da válvula. O mesmo tipo de filtragem efetuada na leitura do torquímetro, aqui também é empregada. Uma variável do sistema é utilizada para armazenar o resultado das conversões após a filtragem. Esta variável pode ser lida por uma outra estação supervisora ligada ao barramento.
- g) *Verificação de situações de sobretorque* - durante o funcionamento do atuador podem ocorrer, eventualmente, situações indesejadas de sobretorque no eixo da válvula. Esta condição é determinada pela comparação do valor de torque atual com uma variável que contém o valor de torque máximo permitido. A variável pode ser atualizada via comando de uma estação remota controladora, conforme as condições em que a válvula está operando.
- h) *Verificação de situações de fim-de-curso* - as chaves de fim-de-curso são periodicamente lidas para detectar uma situação de limite de excursão da válvula. O estado destas chaves é armazenado em memória e estará disponível para leitura através do barramento. Estas situações também se dão pela comparação com valores de posição de fim-de-curso, que são armazenadas em variáveis apropriadas e acessíveis por outra estação. Em ambas situações de fim-de-curso (por variáveis ou pelas micro-chaves) o programa efetuará o desligamento do motor do atuador.
- i) *Posicionamento da válvula* - o processo de posicionamento da válvula começa pelo recebimento de uma mensagem através do barramento. A mensagem esperada

inclui o valor de "set-point". Tão logo receba o valor, o programa determina o sentido de rotação do motor e ativa-o. O microcontrolador passa então a comparar a posição atual da válvula e o "set-point". Baseado no erro desta comparação, o programa toma a decisão de manter ativado ou desativar o motor. Se o erro estiver dentro de uma faixa especificada, denominada de janela de desativação, o motor é desligado. Para evitar chaveamentos do motor, devido a flutuações na posição lida pelo A/D, criou-se uma pequena histerese para a ativação. Assim, existe uma outra janela para a ativação do motor, de maior largura que a de desativação.

- j) *Comunicação de parâmetros com uma outra estação* - a maioria dos parâmetros e variáveis do controlador do atuador podem ser passados para outra estação presente no barramento e que lhe faça uma requisição. Alguns parâmetros que podem ser lidos são: a posição instantânea da válvula, as posições de fim e início de curso, o valor do torque no momento, o valor usado para a detecção de sobretorque, o estado do motor (ligado ou desligado, horário ou anti-horário) e das chaves de fim de curso (ligada ou desligada), a velocidade angular da válvula e os limites de operação das duas janelas digitais. Outros parâmetros devem ser passados de uma estação remota para o atuador: o "set-point", o valor de detecção de sobretorque desejado e os limites de funcionamento das janelas de ativação ou desativação. Estes parâmetros são enviados para a estação remota de modo transparente à aplicação.

Para aumentar a confiabilidade do sistema, o software utiliza o recurso de "watch-dog" interno ao 8098. Desta forma em qualquer situação de pane, o microcontrolador reinicializará a aplicação.

## 7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 7.1 Calibração do Transdutor de Torque

Levando-se em consideração o fato de que o valor da variável torque seria utilizado somente como referência à lógica de controle (torque de abertura e fechamento da válvula); que a velocidade de abertura e fechamento da válvula é de 0,227 rpm (66 s para span de  $90^{\circ}$ ); e que não se está interessado no fluxo (tipo de fluido ou vazão), realizou-se somente a calibração estática do transdutor de torque [17].

Optou-se pela calibração direta. Consistiu em aplicar pesos padrões, ponto a ponto, em um braço de alavanca de comprimento conhecido, solidário ao transdutor, de modo a de modo a obter-se a curva de calibração da Fig.7.1.

O condicionador de sinais utilizado foi Condicionador Universal de instrumentação modelo NI/01886 do Laboratório de Instrumentação do PPGEMM/UFRGS. A tensão de excitação da ponte foi de 5 V em corrente contínua. O display de 3 ½ dígitos, precisão de 0,05%, indicou o sinal de saída em  $\mu\text{m}/\text{m}$ . O instrumento foi construído para uma sensibilidade K igual a 2. Para corrigir o valor da leitura multiplicou-se o valor indicado no display por 2 e dividiu-se pelo K dos extensômetros utilizados.

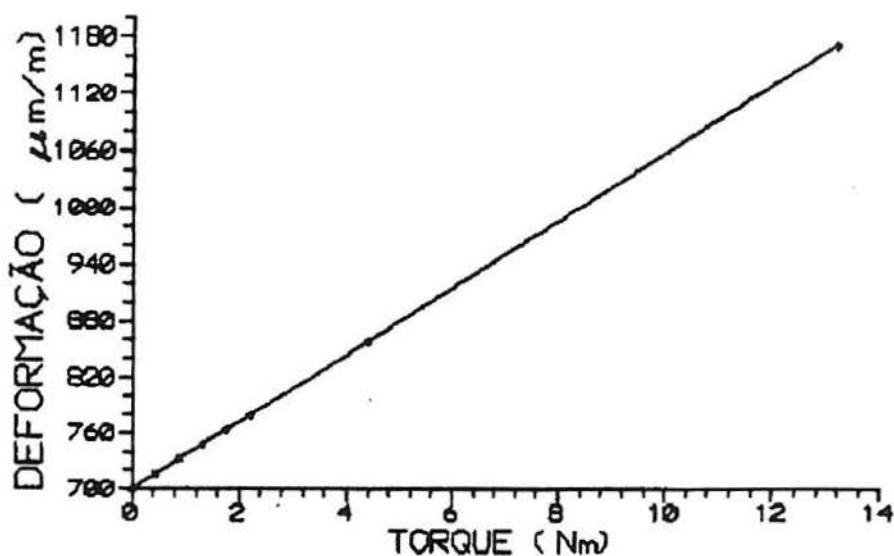


FIGURA 7.1 - Curva de Calibração do Transdutor de Torque.

A curva de calibração mostra-se linear e com um "offset" de 700  $\mu\text{m/m}$ . Provavelmente esse sinal seja proveniente de tensões geradas no processo de colagem dos extensômetros. A sensibilidade dada pela inclinação da reta é de 36 ( $\mu\text{m/m}$ )/Nm, ou seja, um sinal de saída de 0,73 mV/V para o torque nominal de 40 Nm.

Os resultados apresentam um sinal de saída 22% superior ao calculado no projeto. Esta diferença deve-se a usinagem interior realizada na extremidade do eixo para a saída da fiação da ponte, na qual foram colados os extensômetros.

Em funcionamento, o transdutor acusou um torque de aproximadamente 22 Nm para a abertura e o fechamento da válvula. Para a válvula a vazio o torque foi de aproximadamente 5 Nm e o atrito no mancal de 1,5 Nm.

## **7.2 Testes de Conjunto e Comunicação Externa**

O primeiro teste de conjunto realizado foi com o comando local para verificar se os sensores de fim de curso do dispositivo de segurança estavam devidamente posicionados para desligar o sistema. Neste caso, as micro-chaves utilizadas como sensores atuavam diretamente na caixa de comando de potência. Todos os ensaios feitos desligaram o sistema.

Numa segunda etapa, enquanto resolvia-se problemas com o circuito eletrônico (ruídos, instabilidade e outros), fez-se uso do Kit de desenvolvimento SDE-98 utilizado na primeira etapa do projeto (apêndice A) para testar a abertura e fechamento da válvula por variáveis, contribuindo assim para melhorar a aplicação do software de controle.

Comprovou-se também o desligamento do motor no fim do curso através da definição e armazenagem dos limites de excursão da válvula em variáveis apropriadas para comparação com os valores de posição.

Obteve-se bons resultados no tocante a oscilações em torno do "set-point" através da histerese criada para a ativação, evitando o chaveamento do motor devido a flutuações na posição lida pelo conversor A/D.

Outro teste realizado foi o de verificação do sistema ao sobretorque. Estimando o torque máximo acima do valor de abertura e fechamento da válvula (22 Nm), a condição de sobretorque é determinada pela comparação do valor do torque atual com uma variável que contém esta informação. Ao ser obstruída a válvula, o sistema foi desligado.

Numa última etapa foram feitos testes com a comunicação serial. O atuador passou a fazer parte de um *Sistema Integrado de Instrumentação* [10] comandado por microcomputadores, conforme esquema da Fig. 7.2.

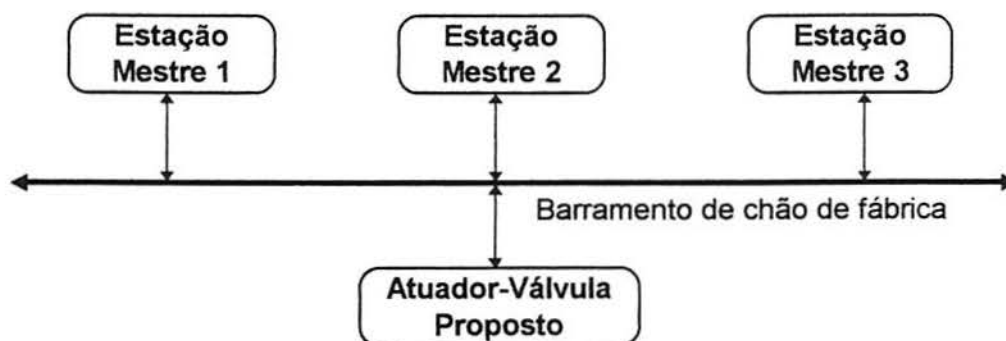


FIGURA 7.2 - Atuador-Válvula em um Sistema Integrado de Instrumentação.

Neste sistema o atuador passa a ser visto como um elemento pertencente a um barramento de chão de fábrica [41] como uma estação escrava.

As três estações mestres monitoraram o funcionamento do atuador enviando-lhe comandos de posicionamento (setpoints) e sobretorque. Alguns parâmetros e variáveis do atuador também foram passadas de uma estação para outra. A Fig. 7.3 é uma foto do sistema montado.

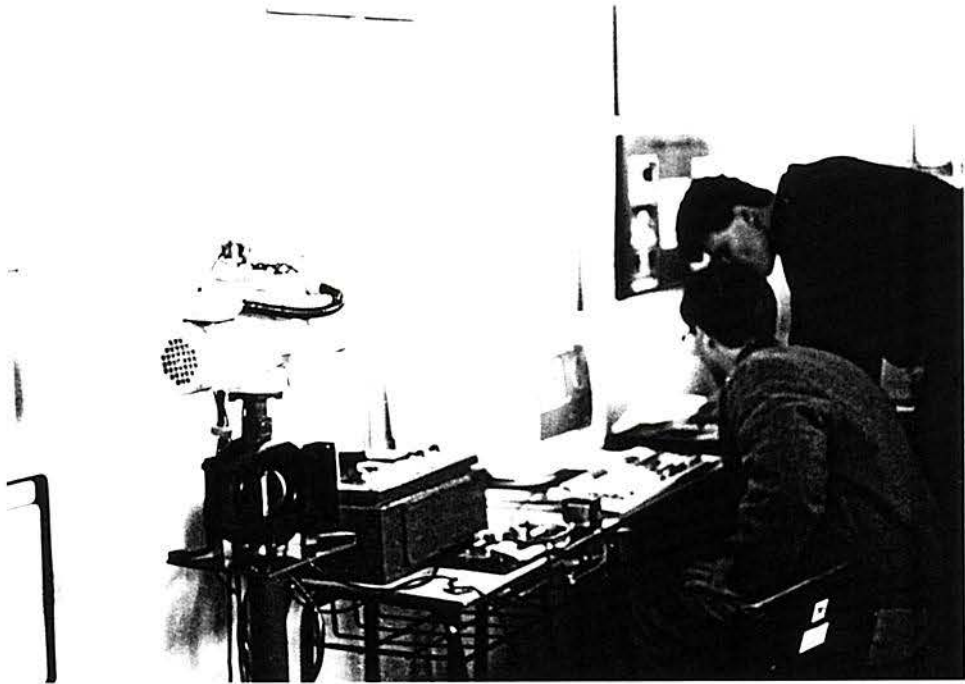


FIGURA 7.3 - Foto do Atuador Comandado por Microcomputadores em Rede.



## 8. CONCLUSÕES

Através da instrumentação aplicada na modernização da válvula de fluxo com atuador eletromecânico MITTO-AEP16 foi proposto um modelo genérico de Instrumentação para Medição e Controle com definições específicas, e um conceito para Instrumentação. Deste trabalho conclui-se que:

- Independente do tipo ou aplicação da instrumentação pode-se ilustrá-la em forma de diagrama de blocos básicos com as mesmas entradas e saídas e regidos pelas mesmas leis de operação, comprovando que é possível um tratamento padronizado para a mesma. Com isso, espera-se contribuir para a normalização da Instrumentação e uma possível compatibilidade dos equipamentos de diferentes fornecedores.
- A instrumentação é uma área do conhecimento que pode ser tratada (entendida, utilizada e ensinada) com conceitos mais gerais e abrangendo a qualquer ramo da ciência e da tecnologia que a utilize para medir e controlar grandezas físicas de um determinado sistema termodinâmico.
- Através da instrumentação desenvolvida no protótipo do atuador para válvula de fluxo utilizando-se de tecnologias já existentes, como a extensometria aplicada a transdutores e os microcontroladores, foi possível demonstrar que é possível a modernização de produtos, máquinas, processos ou até plantas industriais inteiras. Esta modernização é de baixo custo (pois não causou grandes mudanças no projeto original) e pode evitar o sucateamento de máquinas e equipamentos e ainda a perda de mercado dos produtos em comercialização.
- O trabalho também mostra que com a tecnologia dos microcontroladores, associada a sensores com saída elétrica, é possível transferir parte do sistema de medição e controle para o próprio sistema termodinâmico possibilitando o desenvolvimento dos chamados "Sensores ou Atuadores Inteligentes". A descentralização apresenta, entre outras vantagens, maior confiabilidade, segurança, flexibilidade e uma menor carga de processamento para o sistema supervisor ou elemento de controle central.

## 9. SUGESTÕES PARA OS PRÓXIMOS TRABALHOS

Dois trabalhos são sugeridos:

- Desenvolver o Sistema de Comunicação e Aplicativos para o Atuador funcionar como um elemento pertencente a um barramento de chão-de-fábrica.
- Utilizar os parâmetros disponíveis no atuador para implementar um sistema de auto-diagnóstico eletromecânico. Este sistema poderia alertar para a necessidade de manutenção preventiva ou preditiva do atuador.

## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] ARAÚJO, J.R. **Transdutores Estáticos e Dinâmicos de Torque**. Porto Alegre, PPGEMM/UFRGS, 1986. 88 p. Diss. mestrado.
- [02] ARAÚJO, J.R., BORCHARDT, I.G. Transdutor de Torque Construído a Base de Extensômetros de Resistência Elétrica. In: VI CBCIMAT, 1984. **Anais...** Rio de Janeiro, 1984, p.316-319.
- [03] BECKWITH, T.G. et al. **Mechanical Measurements**. Reading, Addison-Wesley Publishing Company, 1993, 876 p.
- [04] BIANCHI, F.C. Aplicações Avançadas de Controladores Programáveis. **Controle e Instrumentação**, p.51-57, nov. 1989.
- [05] BOLTON, W. **Instrumentação e Controle**. São Paulo, Hemus, 1988, 197 p.
- [06] BORCHARDT, I.G. & ZARO, M.A. **Extensômetros de Resistência Elétrica**. Porto Alegre, ed. da Universidade, 1982, 69 p.
- [07] BORCHARDT, I.G. et. al. **O Circuito Ponte para Medição de Impedâncias e Grandezas Físicas**. Porto Alegre, PPGEMM/UFRGS, 121 p. (Apostila de aulas).
- [08] BORCHARDT, I.G. Condicionador Universal para Uso em Extensometria. In: II SIMPÓSIO DE MANUTENÇÃO DE INSTRUMENTOS. Porto Alegre, 26-28 set 1984. **Anais...** Rio de Janeiro, IBP, 1984, p. 265-273.
- [09] BORCHARDT, I.G. **Instrumentação para Monitoração e Controle de Processos**. Porto Alegre, PPGEMM/UFRGS, 68 p. (Apostila de aulas).
- [10] BORCHARDT, I.G. et al. Uma Taxonomia para a Instrumentação. In: III CINISA. São Paulo, dez. 1995, 7 p.
- [11] BORISOV, V.A. et al. Characteristics of Materials Used for Elastic Member of Strain Gauge Resistor Measuring Devices. **Measurement Techniques**, p. 777-780, v. 28, nº 9, 1985.
- [12] CASTRUCCI, P.B.L. **Controle Automático**. São Paulo, Edgard Blücher Ltda, 1969.
- [13] CAUDURO, C.R. Projeto e Utilização de Transdutores Extensométricos. In: VIII SEMINÁRIO DE INSTRUMENTAÇÃO. Rio de Janeiro, 19-22 jun 1989. **Anais...** Rio de Janeiro, IBP, 1989, p. 301-309.
- [14] CAUDURO, C.R. **Uma Metodologia para Auxílio ao Projeto Mecânico de Transdutores Extensométricos**. Porto Alegre, PPGEMM/UFRGS, 1992. 137 p. Tese de Doutorado.

- [15] CHESTNUT, H. & MAYER, R.W. **Servomechanisms and Regulating System Design**. New York, John Wiley, v. 1, 1951, v. 2, 1955.
- [16] DOEBELIN, E.O. **Control System: Principles and Design**. Ohio, John Wiley, 1985,
- [17] DOEBELIN, E.O. **Measurement Systems; Application Design**. New York, McGraw Hill, 1990, 960 p.
- [18] FEODOSIEV, V.I. **Resistência dos Materiais**. Moscou, Editorial Mir, 1980.
- [19] HOFFMANN, K. **An Introduction to Measurements Using Strain Gages**. Darmstadt, Hottinger Baldwin Messtechnik, 1989, 291p.
- [20] HOFFMANN, K. **An Introduction to Strain Gages Techniques by Practical Experiments**. Darmstadt, HBM, 1976.
- [21] HOFFMANN, K. **Applying the Wheatstone Bridge Circuit**. Darmstadt, HBM, 1986, 22 p.
- [22] HOFFMANN, K. **How to Avoid or Minimize Errors in Strain Gauge Measurement**. Darmstadt, HBM, s.d., 57 p.
- [23] HOFFMANN, K. **The Strain Gage a Universal Tool of the Experimental Stress Analysis**. Darmstadt, HBM, s. d.
- [24] KARANDEYEV, K. **Bridge and Potentiometer Methods of Electrical Measurements**. Moscou, Peace Publishers, s. d.
- [25] KIECKOW, F. et. al. **Instrumentação de um Atuador Eletromecânico**. In: X. SEMINÁRIO DE INSTRUMENTAÇÃO, Porto Alegre, 1993, 12 p.
- [26] KUO, B.C. **Automatic Control Systems**. Englewood Cliffs, N. J., Prentice-Hall, 1967.
- [27] LORENZI, C.R. **Relatório de Condicionadores de Instrumentação**. Porto Alegre, Laboratório de Instrumentação, PPGEMM/UFRGS, 1991.
- [28] MEASUREMENT GROUP INC. **Errors due Wheatstone Bridge Nonlinearity**. Raleigh, 1976, 4 p. (TN-502).
- [29] MEASUREMENT GROUP INC. **Strain Gage Based Transducers; their Design and Construction**. Raleigh, 1988, 75 p.
- [30] MEASUREMENT GROUP INC. **Surface Preparation for Strain Gages Bonding**. Instruction Bulletin B-129-04, s. d.
- [31] MEASUREMENT GROUP INC. **Strain Gage Selection Criteria, Procedures, Recommend Ations**. Raleigh, 1988, 75 p.

- [32] O'BRIEN, W.F. AC or DC Excitation: which is best for transducer? Eletronic Design, 1965.
- [33] OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Rio de Janeiro, Prentice Hall do Brasil Ltda., 1993.
- [34] OLIVER, F. **Practical Instrumentation Transducers**. New York, Hayden Book, 1971.
- [35] PATRANABIS, D. **Principles of Industrial Instrumentation**. New Delhi, McGraw-Hill, 1981.
- [36] PERRY, C.C. & LISSNER, H.R. **The Strain Gage Primer**. New York, McGraw-Hill, 1955.
- [37] RAVEN, F.H. **Ingenieria del Control Automatico**. Moscou, Editorial Mir, s. d.
- [38] ROSEN, C.A. & NITZAN, D. Use of Sensors in Programmable Automation. **Computer**, p 12-23, dec 1977.
- [39] SHINSKEY, F.G. **Process Control Systems**. New York, McGraw-Hill, 1979.
- [40] SIGHIERI, L. & NISHIARI, A. **Controle Automático de Processos Industriais - Instrumentação**. São Paulo, Edgar Blücher, 1980.
- [41] SIEMENS AG. **PROFIBUS Proposal to ISA SP50 for FIELD BUS standard**. Germany, 1987.
- [42] TIMOSHENKO, S.P. **Resistência dos Materiais**. Vol. I, Rio de Janeiro, LTC, 1985.
- [43] VAN WYLEN, G. & SONNTAG, R.E. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. São Paulo, Edgard Blücher, 1976, p 14-18.
- [44] YONEYAMA, T. Aplicação de Microcomputadores para Controle e Automação Industrial. **Controle e Instrumentação**, p. 27-31, jun 1990.
- [45] ZEMANSKI, M.W. **Calor e Termodinâmica**. Aguilar S.A. de Ediciones, Espanha, 1964.

## 11. APÊNDICE

### APÊNDICE A - SIMULADOR DE POSIÇÃO PARA UM ATUADOR DE VÁLVULA MITTO AEP16.

#### A.1. Mecanismo Utilizado como Simulador de Posição.

Um relógio do tipo despertador foi utilizado como mecanismo mostrador da posição de abertura da válvula (Fig. A.1).

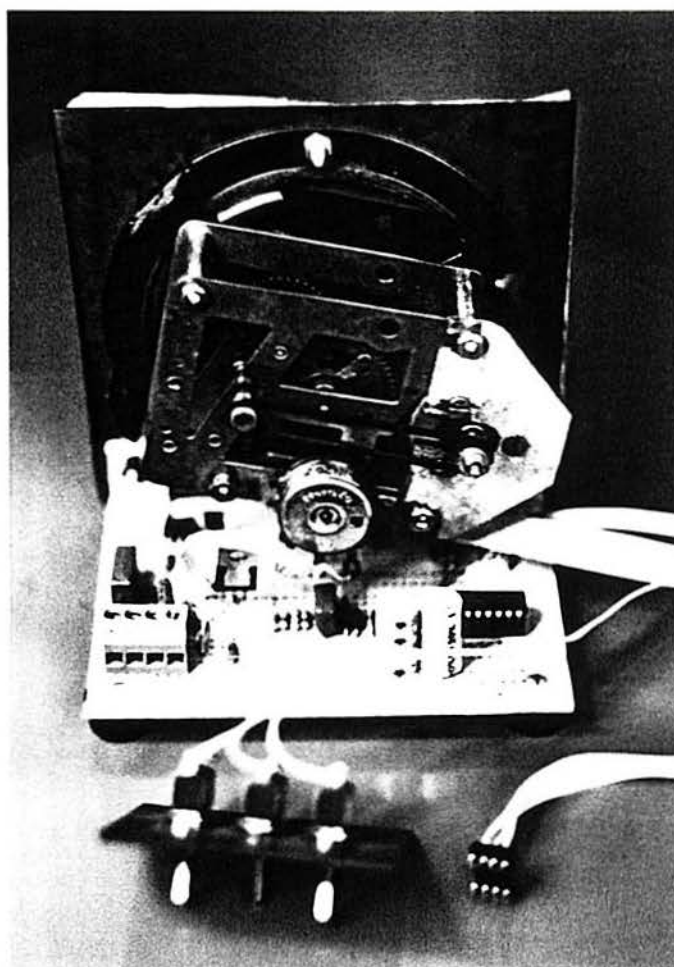


FIGURA A.1 - Mecanismo do Relógio Despertador Utilizado como Simulador de Posição.

Do relógio original foi retirado o dispositivo de corda e mola, sendo substituído por um motor de corrente contínua que aciona as engrenagens através de uma correia. Cabe assinalar que o dispositivo apresenta uma pequena folga, e além disso uma elevada inércia. Um transdutor de posição angular do tipo potenciométrico

(R=100k linear) foi acrescentado no eixo do ponteiro, cujas saídas são condicionadas e posteriormente injetadas ao microcontrolador contido no kit SDE-98 (tratado com maior profundidade no item A.3).

O ponteiro indicador acoplado ao eixo do potenciômetro possui uma excursão de 180°. Esta excursão está limitada fisicamente por dois pontos de solda na engrenagem do eixo do potenciômetro, e foi dividida em cem partes iguais em intervalos de dez. Esta normalização em cem partes corresponde ao padrão solicitado.

A escala indicadora, o ponteiro e a base de fenolite na qual foram afixados o mostrador e o mecanismo do relógio também foram confeccionados no laboratório.

### **A.I.1 Descrição do Controle Eletrônico do Acionador do Simulador.**

O objetivo do controle eletrônico é o acionamento bidirecional do motor de corrente contínua, com controle contínuo e digital de velocidade, assim como a detecção da posição do ponteiro e das chaves de limitação de curso e torque.

A seguir serão especificadas os diferentes blocos que compõem o mesmo.

#### **a) Fonte de Alimentação Utilizada.**

Para a alimentação do motor utilizou-se uma fonte externa regulada e ajustável de -12V e +12V, para a sua movimentação bidirecional. A fonte de alimentação de potência é conectada a placa através de um conector do tipo torre. Um regulador do tipo 7805C é alimentado também por esta fonte, servindo para a polarização do fototransistor interno ao fotoacoplador TIL111 (vide item d).

Para minimizar variações da fonte externa foram acrescentados filtros RCs na placa.

#### **b) Driver de Acionamento do Motor CC.**

O driver de acionamento do motor consiste de um amplificador de corrente classe B, dentro de um laço de realimentação de um seguidor de tensão elaborado com

um amplificador operacional do tipo TL074, cuja saída dirige-se diretamente às bases dos transistores BD678 (PNP) e BD677 (NPN).

Os coletores são ligados diretamente a fonte de alimentação. São utilizados diodos retificadores de proteção na saída deste estágio devido a carga indutiva representada pelo motor.

Foram detectados altos níveis de ruído de comutação que produziam oscilações neste bloco que afetava do mesmo modo a fonte de alimentação.

Para a filtragem destes ruídos, foram empregadas várias técnicas, entre elas o uso do fotoacoplador, para solucionar este problema. Finalmente, o problema foi resolvido quando descobriu-se que a causa deste era a vibração do motor e fez-se a devida lubrificação do mesmo.

Na etapa de implementação do circuito foram detectadas as seguintes particularidades:

- Os ruídos produzidos pela comutação existente no motor causavam interferência no CI 8279 (Programmable Keyboard Display Interface) além de ter sido provavelmente o responsável pela "queima" parcial (saída PWM) de um microcontrolador 8098.
- A corrente do motor em regime permanente é de 60 mA, enquanto que, no transitório de reversão de direção a corrente por este drenada era suficiente para elevar bastante a temperatura dos transistores.

### **c) Tipo de Sinal de Comando Utilizado (PWM).**

Para ter-se um controle contínuo tanto da velocidade como do sentido de rotação do motor foi utilizado a saída PWM (Pulse Width Modulation) com frequência de 8 kHz, compartilhada junto com o sinal P2.5 do 8098. Este sinal de saída permite um controle discretizado em 256 níveis de velocidade, sendo que foi projetado o valor de 128 (ciclo de trabalho "duty cycle" de 50%) para o estado de repouso do motor.



A convenção adotada foi: para valores acima de 128 até 55, ter-se-á velocidades positivas crescentes; e para valores abaixo de 128 até zero, velocidades negativas crescentes (sentido contrário).

Para o desacoplamento entre o sinal do PWM do microcontrolador e o driver de acionamento do motor foi utilizado um dispositivo opto-acoplador (vide item d).

A conversão digital (PWM) para analógica (nível DC de tensão) é realizada por um filtro RC com pólo em baixa frequência, de modo a extrair o valor médio do sinal PWM.

#### **d) Acoplamento do Sinal de Comando para o Acionador.**

Com o objetivo de minimizar as interferências entre o microcontrolador e o circuito discreto de acionamento, principalmente no que se refere a laços de terra, devido a existência de duas fontes de alimentação independentes, foi utilizado um dispositivo opto-acoplador do tipo TIL111 da Texas Instruments.

A saída PWM (Standard Output) do microcontrolador possui uma corrente nominal para nível alto de  $-200\mu\text{A}$  (2,4V) e 2.0 mA em nível baixo (0,45V). No entanto, com esta corrente, o opto-acoplador não consegue operar adequadamente, por este motivo foi interposto um estágio de amplificação de corrente com o auxílio de um transistor BC338 (NPN).

Para a frequência do PWM utilizada (8 kHz) obtém-se uma boa resposta do opto-acoplador conforme o valor do resistor ligado ao fototransistor.

O sinal sobre o resistor ligado ao fototransistor de saída é comparado com um valor de referência que digitaliza esta informação. O valor de referência é gerado por meio de um divisor resistivo conectado ao regulador de tensão 7805C.

#### **A.II Transdutor de Posição Angular.**

A fim de se detectar permanentemente a posição em que se encontra o ponteiro, é utilizado um sinal proveniente de um potenciômetro linear (no caso, de carvão). Este sinal é acessado pelo bloco de condicionamento de sinal (A.IV). Devido

as restrições mecânicas (A.I), o cursor do potenciômetro desloca-se por uma pequena faixa (180°) de sua excursão total (270°). Desta forma o sinal de saída do potenciômetro não atinge os valores limites (0 e  $V_{ref}=V_{cc}$ ) e conseqüentemente subtiliza as possibilidades (range) do conversor A/D do 8098.

Cabe assinalar que a resolução do A/D (10 bits) permitiria posicionar o ponteiro com uma precisão de  $\pm 0,1\%$ .

### **A.III. Condicionamento do Sinal de Posição para o AD.**

Este bloco, sugerido pelo fabricante do microcontrolador (INTEL) é responsável pelo armazenamento temporário da informação de posição oriunda do transdutor angular. Consiste de dois diodos de sinal para a proteção de sobre e subtensões (acima de  $V_{ref}$  e abaixo de  $ANGND$ ) e um resistor R1 que serve tanto para compor um filtro com C1, como limitar a corrente que porventura possa entrar no A/D. O capacitor C1 tem a finalidade de armazenar a tensão amostrada do potenciômetro e mantê-la durante o período de amostragem (SAMPLE and HOLD) do A/D.

O fundo de escala do conversor A/D (1023) é atingido quando o sinal de entrada for igual a  $V_{ref}$  (5 Vcc).

### **A.IV. Sensores de Simulação de Curso e Advertência de Torque Máximo**

Estes sensores foram simulados mediante o emprego de chaves do tipo alavanca (SPDT), presas a uma placa de fenolite. Elas podem ser acionadas manualmente pelo operador.

Estas chaves têm por finalidade simular as correspondentes situações reais a que estão submetidas as válvulas.

As chaves estão conectadas ao circuito eletrônico de acionamento via um "flat-cable" de 4 fios. O Comum das chaves é alimentado pelo nível alto da fonte do microcontrolador.

### **A.V. Características Elétricas do Acionamento.**

Originalmente, o atuador era acionado por uma placa eletrônica (analógica) encarregada de comandar (baixa potência) os relés de acionamento das contactoras (alta potência). Esta placa foi substituída por uma novo sistema de controle digital microcontrolado. O novo sistema de controle é composto de duas partes: um kit de desenvolvimento (SDE-98) baseado em microcontrolador 8098 (INTEL), que controla uma interface de acionamento elétrico de baixa potência e, a própria interface.

O acionamento elétrico para o sistema de posicionamento é do tipo ON-OFF. A interface de acionamento elétrico responsável pela ativação do sistema de contactoras originais do sistema é através do modo Remoto. As contactoras são ativadas por meio de relés METALTEX G1RC2 (12VCC - 5A). A corrente para o fechamento do relé é de 40 mA nominais. Na placa estão instalados dois relés daquele tipo, cada um sendo responsável pelo acionamento de uma contactora. A cada contactora está associado um sentido de rotação do motor.

O circuito de acionamento das bobinas dos relés é bem simples. Trata-se de um transistor na configuração emissor-comum.

### **A.VI. Interface com o Kit de Desenvolvimento SDE-98**

A interface com o SDE-98 consiste na ativação dos relés de baixa potência, através de transistores NPNs conectados nas saídas P2.5 e P2.2 do microcontrolador.

A interface conecta-se ao kit por intermédio de um cabo plano multivias com conectores de 10 pinos (terminais crimpados) nas suas extremidades.

Uma outra função desta interface é condicionar o sinal oriundo do transdutor de posição (potenciômetro). Uma vez condicionado, o sinal é levado ao kit de desenvolvimento SDE-98 por meio da entrada analógica ACH5 do conversor A/D interno ao microcontrolador.

Para evitar que ruídos de chaveamento das contactoras interfiram no funcionamento do kit, principalmente no chip controlador de teclado e display (INTEL

8279), filtros passivos (RC e LC) foram adicionados nas linhas de alimentação da interface de acionamento elétrico.

O circuito de acionamento das bobinas dos relés consiste de transistores na configuração de emissor-comum. A ativação é feita aplicando-se o sinal na base. Dado a baixa capacidade de corrente em nível alto das saídas do microcontrolador faz-se necessário a introdução de resistores "pull-up" para conseguir-se saturar o transistor. Em nível baixo, sendo a capacidade de corrente maior, consegue-se manter uma tensão suficientemente baixa na base do transistor para que este não conduza.

O circuito de condicionamento do transdutor de posição angular (potenciômetro) já foi analisado na seção A.IV do simulador previamente descrito.

#### **A.VII. Software de Controle para o Microcontrolador 8098**

Devido a inexistência do programa monitor do kit SDE-98, foi necessário a criação de várias rotinas para tratamento do teclado e display do kit. As rotinas acessam diretamente o chip 8279 (PKDI) responsável pelo controle do visor e da varredura do teclado. As bibliotecas de subrotinas desenvolvidas tem por finalidade a interação do operador com a máquina via teclado, display e interface serial com outro microcomputador para processamentos mais complexos e envio de dados para outros periféricos.

#### **A.VIII. Software de Controle de Posição**

A partir do trabalho inicial descrito no item anterior desenvolveu-se o programa para o acionamento do simulador que serviu de base para este software escrito em linguagem C96. As modificações e ajustes em decorrência aos problemas mecânicos mencionados anteriormente foram as seguintes:

a) Devido a imprecisão do sistema de detecção de sobrecarga (chaves de torque máximo), neste programa foi elaborada uma rotina alternativa que consiste na detecção da velocidade de movimento da válvula. Abaixo de um limite predeterminado, a rotina desativa o motor, indicando no visor um sinal de alarme e pedindo a

intervenção do operador (reprogramação de posição, após uma acurada verificação na válvula).

b) Um filtro digital sobre a leitura do A/D (posição) foi inserido na rotina de detecção de posição devido ao ruído existente na linha proveniente do transdutor de posição. Este filtro efetua a média de vinte leituras do conversor A/D.

c) No algoritmo de controle foi colocada uma histerese digital no sinal de saída para os relés. A histerese foi obtida pela construção de duas janelas digitais operando sobre o erro de posição (setpoint menos posição atual). Para desativar os relés é necessário que o erro encontre-se dentro dos limites da janela interior. Para ativar os relés é preciso que o erro encontre-se fora dos limites da janela exterior. Esta histerese tem por finalidade desligar o motor quando a leitura da posição está dentro da janela interior. Este fato determina a eliminação das infinitas oscilações em torno do setpoint, que leva a deterioração prematura dos contatos dos relés e chaves contactoras do sistema, além do acionamento do motor em sentidos alternados não apropriados às especificações técnicas de construção (ciclo de trabalho contínuo).

d) Para reduzir o tempo de atuação do alarme de sobrecarga, um novo algoritmo foi implementado. Este algoritmo consiste na detecção da reversão de rotação do motor para desprezar o tempo de reversão relacionado a folga (3,5 s). Se não houver reversão esta implementação permite a desativação do motor em caso de sobrecarga num tempo significativamente menor (0,5 s).