

CAPÍTULO 3

REVISÃO DE SOLUÇÕES DE INSTRUMENTAÇÃO PARA O DIAGNÓSTICO DE COMPRESSORES ALTERNATIVOS

Este capítulo apresenta o estado atual de desenvolvimento dos sistemas de monitoramento e análise de defeitos em compressores alternativos. Uma visão geral é inicialmente apresentada, abrangendo os sistemas que são atualmente comercializados. Em seguida, há uma discussão sobre os principais itens que compõem estes sistemas, cujo detalhamento fornecerá uma base de conhecimento para o entendimento do sistema desenvolvido neste trabalho.

3.1 Visão Geral

A utilização da análise de pressão dinâmica, vibração e outros parâmetros vem sendo feita há muito tempo com objetivos e tratamentos específicos. Em consulta ao IKPH (1989), encontrou-se uma descrição da utilização de sensores de pulsação de pressão instalados em uma turbina, de forma a identificar oscilações de pressão decorrentes de distúrbios aerodinâmicos. O trabalho publicado por Hicks (1974) trata do efeito da pulsação de pressão sobre o próprio compressor, tubulações e vasos. Tal abordagem tem o objetivo de fornecer subsídios para a melhoria de projetos de tubulações e filtros, resultando em redução do nível de pulsação e dos seus efeitos danosos. Long e Schuh (1988) utilizaram análises de

vibração, pressão dinâmica, ultra-som, tensão de ignição e parâmetros de processo para o diagnóstico de defeitos em máquinas alternativas (motores, compressores e bombas). Já Bloch (1995) tratou dos efeitos da pulsação de pressão sobre a capacidade (vazão) de compressores alternativos. Zusman e Palm (2001) propuseram a medição de sinais vibratórios transientes por circuitos eletrônicos especiais, como forma de identificar folgas nos elementos mecânicos de compressores. Em publicação da DYNALCO CONTROLS (2003), pode-se encontrar uma relação de vários tipos de defeitos diagnosticáveis pela análise de vibrações e pressão dinâmica. A Bently Nevada (2005) propõe medições de vibração, posição da haste, temperatura, fase e pressão do cilindro para o monitoramento e o diagnóstico de defeitos. Por fim, Drewes (2003) apresentou um trabalho demonstrando que o estudo da pressão dinâmica na forma de diagramas $P \times V$, associado ao estudo de vibração e outros parâmetros, possibilita o monitoramento e a análise de defeitos em componentes de compressores alternativos de forma eficaz.

Recentemente surgiram sistemas comerciais como o 3500 da Bently Nevada, o RT-9260 da DYNALCO CONTROLS e o PROGNOST da Koetter Consulting Engineers. A maioria destes fabricantes apresenta possibilidades de análise, que vão desde defeitos mecânicos a avaliações de performance de válvulas, permitindo uma visão completa do estado do equipamento. A título de ilustração, são apresentados, na Figura 3.1, alguns relatórios gráficos gerados pelo sistema PROGNOST.

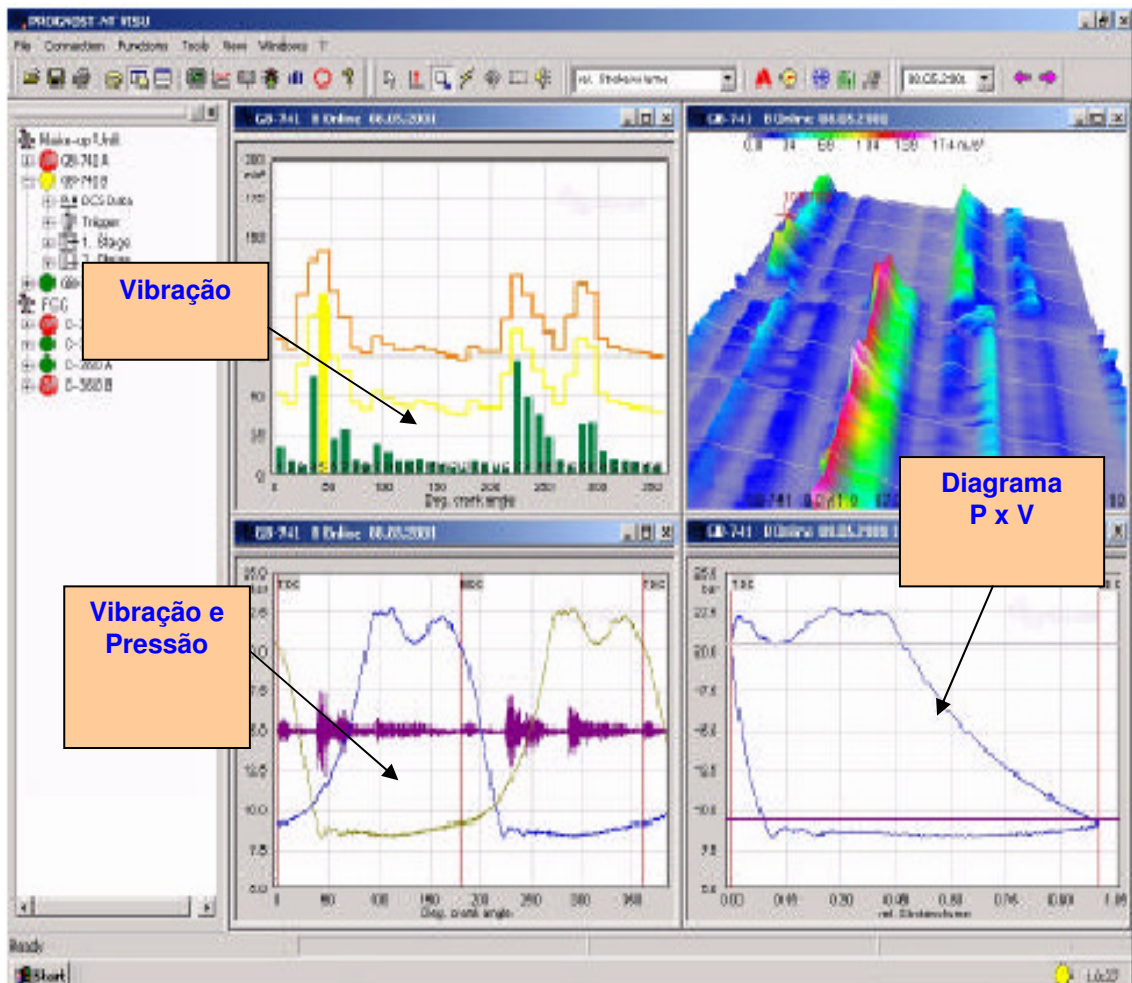


Figura 3.1 - Relatórios gráficos do sistema PROGNOST. (Lenz, 1999)

3.2 Sensor para Medição de Pressão Dinâmica

O sensor utilizado neste trabalho para medição de pulsação de pressão (Figura 3.2), fabricado pela PCB PIEZOTRONICS (2005a), é definido como um sensor para medida de pressão dinâmica. O uso do sensor nesta aplicação se restringe à medida da pulsação pneumática mas, de uma forma mais ampla, pode ser aplicado para a medida de turbulência, rajada, explosão, combustão, etc. Estes sensores normalmente utilizam cristais piezelétricos como transdutores, e podem ser construídos de duas formas :

- Saída em carga – São sensores de alta impedância de saída;

- Saída em tensão – São sensores de baixa impedância de saída equipados com amplificadores internos, denominados de ICP (*Integrated Circuit Piezoelectric*).

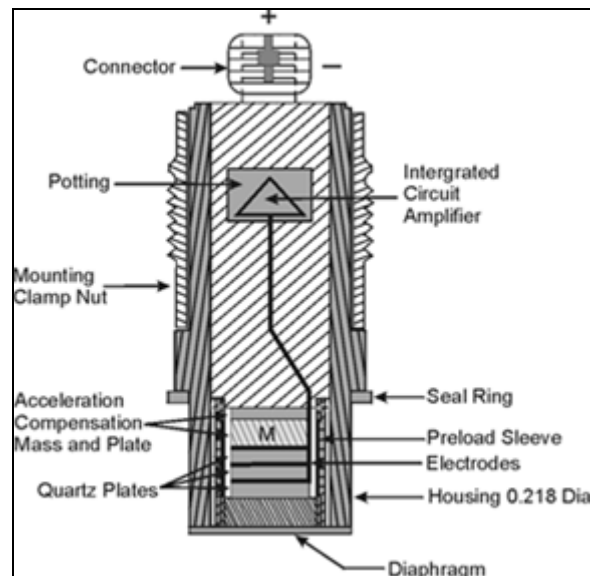


Figura 3.2 - Sensor de Pressão Dinâmica.

(PCB PIEZOTRONICS, 2005b)

Os sensores do tipo ICP têm a sua aplicação bastante facilitada por possuírem amplificador interno, propiciando as seguintes vantagens:

- Sensibilidade independente do comprimento do cabo e da capacitância;
- Possibilidade de transmitir sinal com cabos longos em ambientes agressivos, sem perda da qualidade devido à baixa impedância;
- Utilizam cabo coaxial de baixo custo;
- Possibilidade de auto teste do sensor pelo monitoramento do desvio da voltagem de saída;
- Baixo custo e simplicidade do sistema de condicionamento de sinal.

Os sensores deste tipo (Figura 3.3) são compostos por um cristal piezelétrico e um amplificador de tensão tipo MOSFET. Os cristais de quartzo apresentam baixa capacitância e geram uma tensão elevada ($\Delta V = \Delta q/C$) que é adequada para amplificadores de tensão, os quais definem o ganho do sensor.

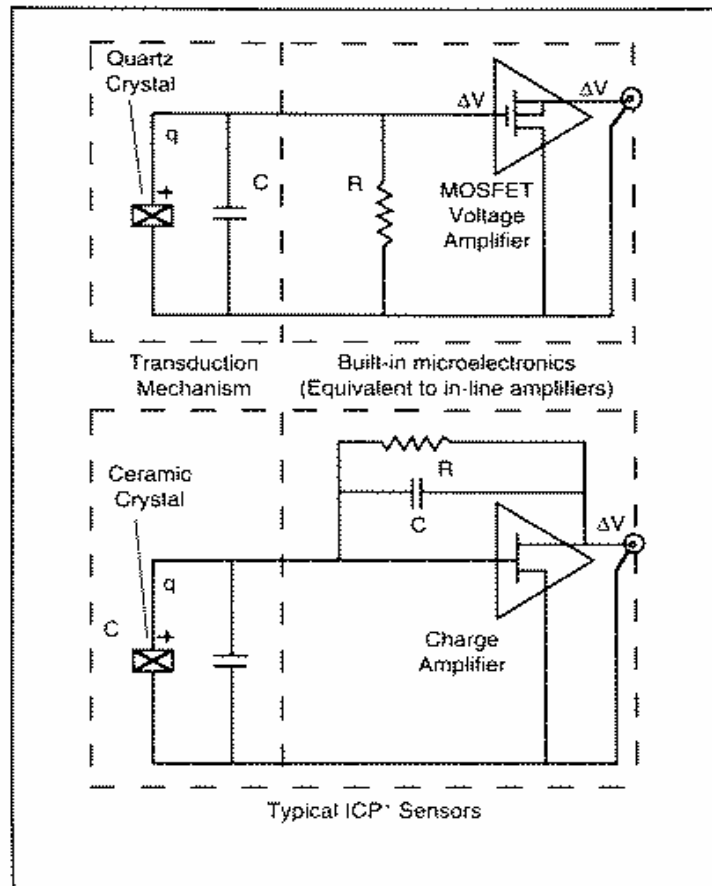


Figura 3.3 – Esquema elétrico de sensor do tipo ICP.

(PCB PIEZOTRONICS, 2005a)

A tensão ΔV que aparece na saída é somada a uma tensão contínua de +10 VDC (bias voltagem) que polariza o transdutor. Esta tensão de polarização deve ser eliminada pelo sistema de condicionamento de sinal (Figura 3.4).

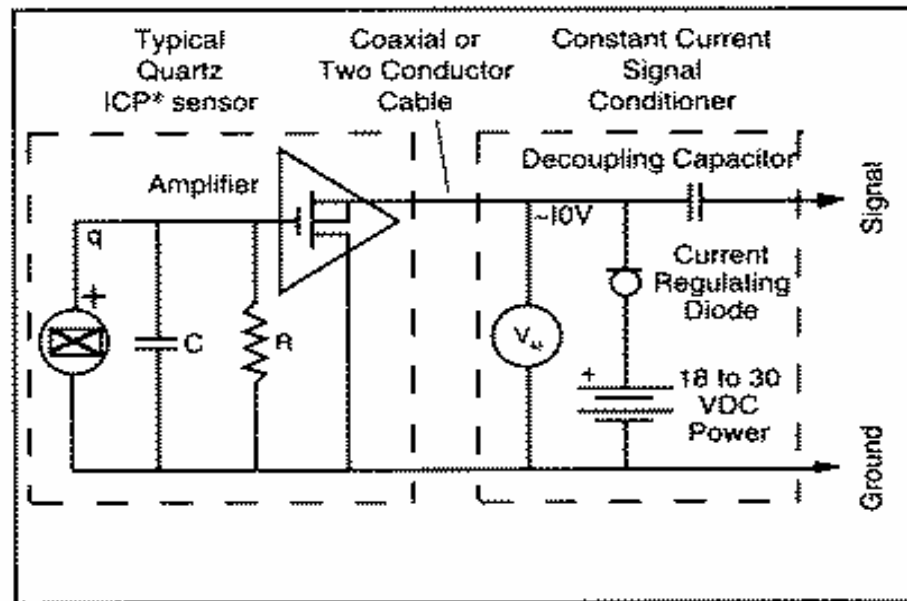


Figura 3.4 - Sistema de condicionamento de sinal para sensor do tipo ICP.

(PCB PIEZOTRONICS, 2005a)

No sistema típico apresentado na Figura 3.4, além do sensor já descrito, encontra-se uma fonte de corrente constante conectada ao sensor por dois fios, fornecendo uma tensão entre 18 e 30 VDC. O sistema possui ainda um diodo regulador de proteção e um capacitor de desacoplamento para eliminação da componente DC de polarização.

3.3 Sensor para Medição de Vibração

A medição e a análise de vibração constituem parâmetros tradicionalmente utilizados para o diagnóstico de defeitos em equipamentos dinâmicos, embora estes parâmetros precisem de tratamentos e cuidados específicos ao lidar com compressores alternativos. Um dos aspectos a ser considerado é o fato de que estes compressores geram vibrações devido a variações de pressão atuantes sobre os pistões. Estas vibrações se somam aos esforços decorrentes das forças de inércia, também variáveis, conforme apresentado no Item 2.6.

Existem vários tipos de sensores aplicados à medição de vibração disponíveis no mercado. No entanto, nos últimos anos os acelerômetros do tipo ICP vêm se difundindo devido a sua robustez, baixo custo e uma ampla banda de resposta em frequência (1 a 20kHz, tipicamente). Os acelerômetros (Figura 3.5) são sensores nos quais cristais piezelétricos são usados como elemento sensor. Segundo Dimarogonas (1996), transdutores piezelétricos são dispositivos que produzem uma carga elétrica proporcional à deformação do cristal. Este mesmo autor conclui sua discussão dizendo que, se em um lado do cristal é acoplado um elemento cuja vibração se deseja medir, e no outro lado está fixada uma massa livre, o cristal age como uma mola. Assim, o cristal se transforma em um oscilador natural de alta frequência, ao qual se denomina acelerômetro.

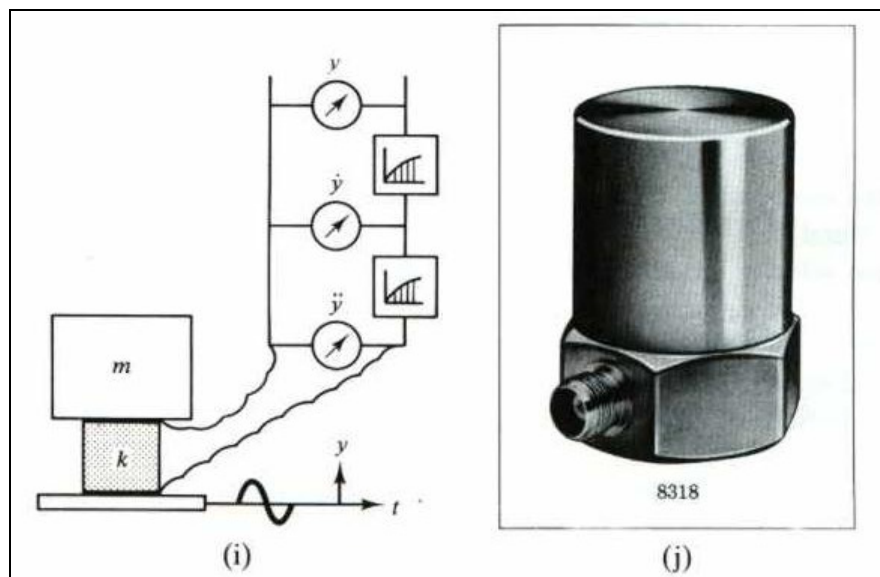


Figura 3.5 - Desenho esquemático e real de um acelerômetro.
(Dimarogonas, 1996)

3.4 Sensor para Medição de Fase

O interesse em medir fase advém do fato de que grandezas oscilatórias são definidas a partir de sua amplitude, frequência e fase. Ou seja, a equação de um movimento vibratório é do tipo $x = x_0 + \text{sen}(\omega t + \varphi)$, onde x_0 é a amplitude, ω é a frequência e φ é a fase. Hartog (1972) acrescenta que a necessidade de conhecer a fase de um dado movimento é imprescindível ao estudar fenômenos de mesma frequência. No caso específico deste trabalho, existe a necessidade de analisar simultaneamente pressão dinâmica e vibração em função do deslocamento do virabrequim, elementos que possuem componentes de mesma frequência.

Em se tratando de equipamentos rotativos, a fase normalmente é medida tomando como referência o eixo virabrequim. Ou seja, a cada giro deste, um pulso de referência precisa ser gerado, marcando o início ou final do giro.

Existem diversos instrumentos que podem ser utilizados para gerar sinal síncrono, mas sem dúvida um dos mais utilizados é o fototacômetro, pela sua simplicidade e facilidade de instalação. A empresa Banner Engineering Corporation chama este tipo de sensor de *Retroreflective Mode Sensor*. Segundo a BANNER (P/N 03562), estes sensores são constituídos por um emissor de luz vermelha (LED), um receptor (fototransistor) sensível a este comprimento de onda e um circuito demodulador seguido de um amplificador.

Em linhas gerais, estes sensores (Figura 3.6) emitem luz vermelha modulada, a qual é refletida quando o feixe luminoso atinge uma etiqueta colada em um ponto do elemento girante. A luz detectada, depois de demodulada e amplificada, gera um

pulso a cada giro completo. Então, pulsos de tensão são obtidos na saída deste detector, com amplitudes entre 1 e 2V.

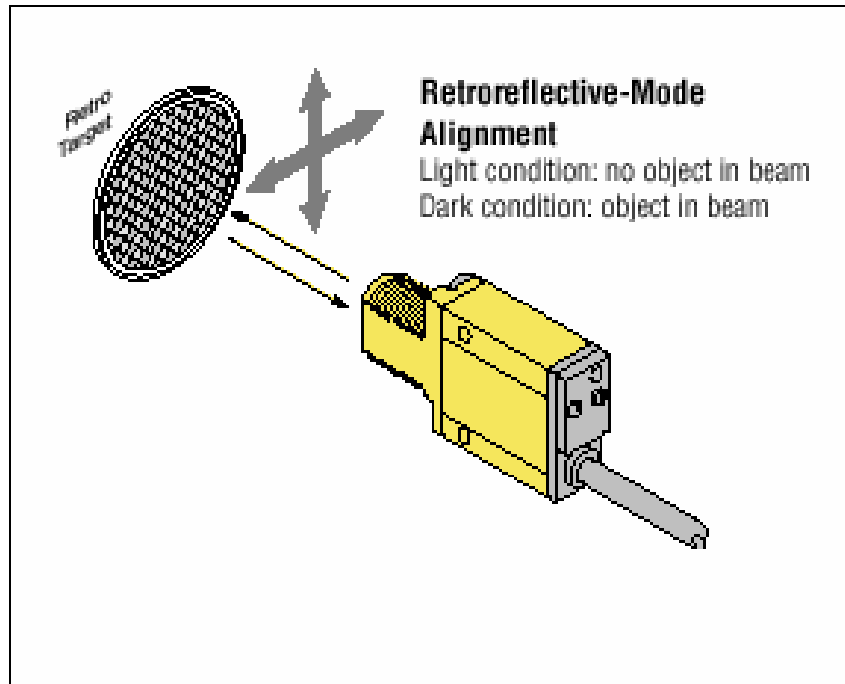


Figura 3.6 – Desenho esquemático de fototacômetro. (www.banner.com)

3.5 Sistema de Aquisição de Dados

No processo de desenvolvimento de um sistema de medição de parâmetros físicos, é necessário tratar os sinais dos sensores de modo a obter as informações requeridas dentro dos padrões esperados de precisão e exatidão. Como se está tratando dos sinais dinâmicos gerados pelos sensores de vibração, pressão e fase, será necessário executar as tarefas de amplificação, filtragem, digitalização e aquisição dos dados antes de se poder utilizar estas informações para o diagnóstico de defeitos.

Uma abordagem dos conceitos e práticas pertinentes a estas operações de condicionamento de sinais é apresentada a seguir.

a) Amplificação

Segundo a PCB PIEZOTRONICS (2005a), a maioria das medições dinâmicas de vibração e pressão utiliza sensores piezelétricos com saída em carga, os quais produzem um sinal de alta impedância. Estes sensores têm a vantagem de poderem ser utilizados em altas temperaturas, mas não permitem o uso de cabos longos e estão sujeitos a ruídos e interferências eletromagnéticas. Nestes casos, são utilizados amplificadores sensíveis à carga com um estágio de saída em baixa impedância.

Muitos acelerômetros e sensores de pressão dinâmica utilizam um circuito chamado ICP, citado anteriormente. Este circuito efetua uma primeira amplificação e transforma o sinal de alta impedância fornecido pelo cristal em um sinal de baixa impedância. Tal sinal é menos suscetível a ruído e pode ser transmitido por cabos longos e de baixo custo. Segundo a IOTECH (1997), sensores construídos desta forma (Figura 3.7) necessitam apenas de fonte externa de alimentação e da interface entre o sensor e um equipamento padrão de medida de tensão.

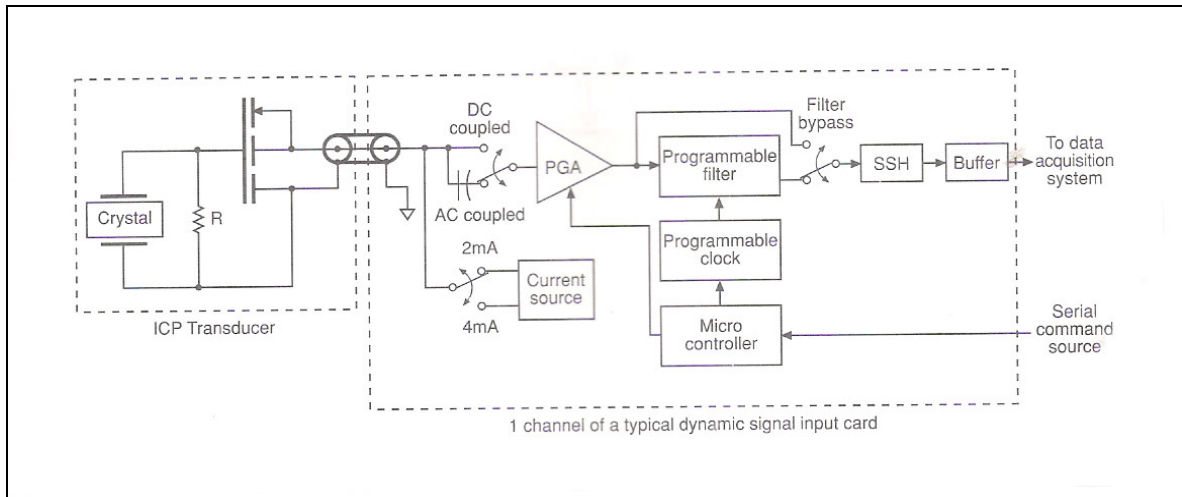


Figura 3.7 - Esquema elétrico de um acelerômetro do tipo ICP conectado a Sistema de aquisição. (IOTECH, 1997)

A maioria dos sensores que utilizam cristal piezelétrico já incorpora amplificadores. No entanto, a amplificação dos sinais de saída deste detector ainda é necessária para compatibilizar o nível de tensão do sinal do sensor com o instrumento de medição.

A principal característica de um amplificador é o ganho G , que corresponde à relação entre a tensão de entrada V_i e a de saída V_o , ou seja,

$$G = \frac{V_o}{V_i} \quad (3.1).$$

Por outro lado, é importante levar em conta que a resposta dos amplificadores não é linear sobre toda a faixa de tensões. Para demonstrar este comportamento, Fraden (1996) apresenta na Figura 3.8 um exemplo de curva real de um amplificador. Esta curva é normalmente influenciada pela tensão de alimentação e pelas características intrínsecas do amplificador usado.

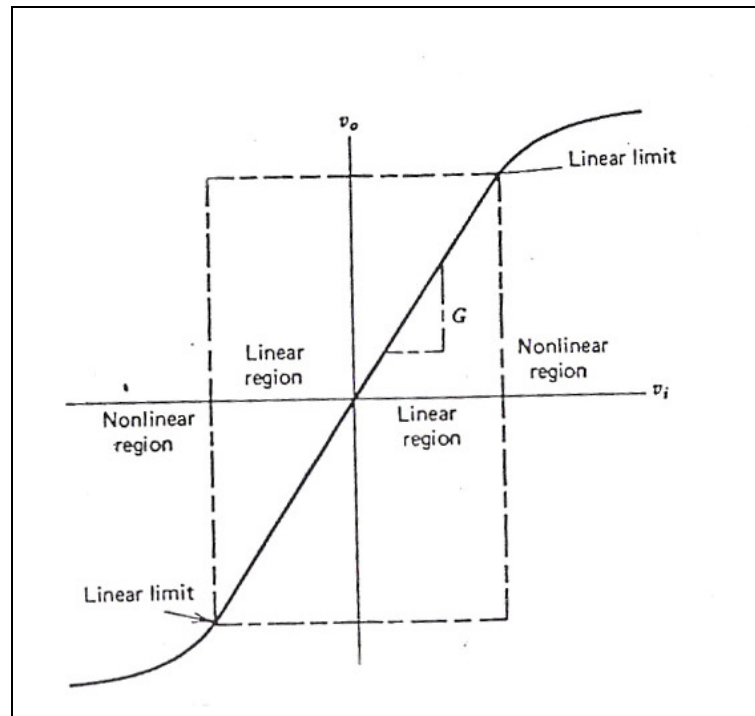


Figura 3.8 – Curva típica de tensão de entrada versus tensão de saída de um amplificador. (Fraden, 1996).

Os amplificadores operacionais constituem a opção mais viável para amplificação de sinais analógicos de sensores. Estes dispositivos são circuitos integrados compostos de transistores e diodos, usualmente crescidos em uma pastilha de silício, formando um circuito completo de amplificação. Estes amplificadores apresentam ganho de malha aberta elevado ($G=10^6$ é típico), com alta impedância de entrada e baixa impedância de saída.

A simbologia de um amplificador operacional está apresentada na Figura 3.9, onde é possível observar uma entrada com símbolo "+", chamada de não inversora, e outra com símbolo "-", chamada de inversora (Torres (2002)). Em geral, estes amplificadores precisam de uma fonte de alimentação simétrica (por exemplo, +12V e -12V). Alguns destes dispositivos possuem um par de entradas chamadas de

ajuste de *offset*, utilizadas para regular o nível de tensão contínua existente na saída quando as tensões de entrada são nulas.

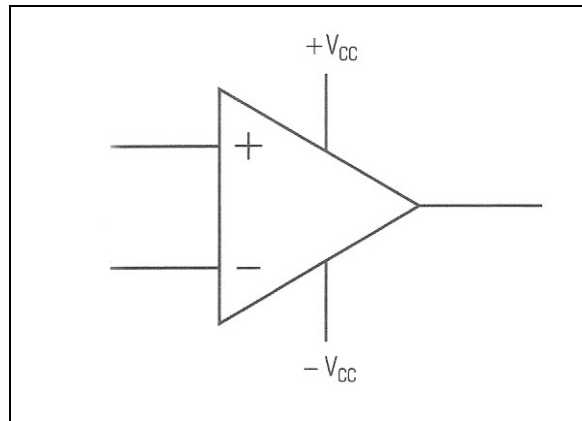


Figura 3.9 – Simbologia do amplificador operacional.
(Torres, 2002)

Um aspecto importante enfatizado por Torres (2002) é que o limite máximo de amplificação é dado pela tensão de alimentação, e que é possível considerá-lo como sendo 1,4V menor que esta. Ou seja, se as tensões de alimentação são de +12V e -12V, as máximas tensões na saída são de +10,4V e -10,4V. Qualquer nível de tensão de entrada que leve a uma saída com tensão fora desta faixa será cortado (Figura 3.10), o que resulta em uma distorção do sinal.

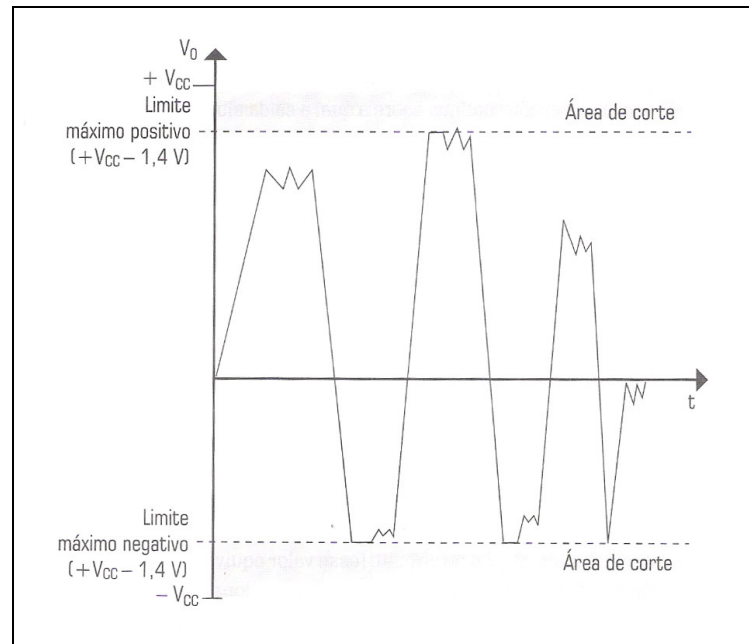


Figura 3.10 – Corte dos valores superiores aos limites de um amplificador operacional. (Torres, 2002)

Torres (2002) afirma que, teoricamente, o ganho de um amplificador operacional tende ao infinito. No entanto, pode-se estabelecer o ganho desejado utilizando resistores, como em algumas configurações típicas apresentadas na Figura 3.11, que são designadas por:

- Amplificador não inversor;
- Amplificador inversor;
- Amplificador diferencial.

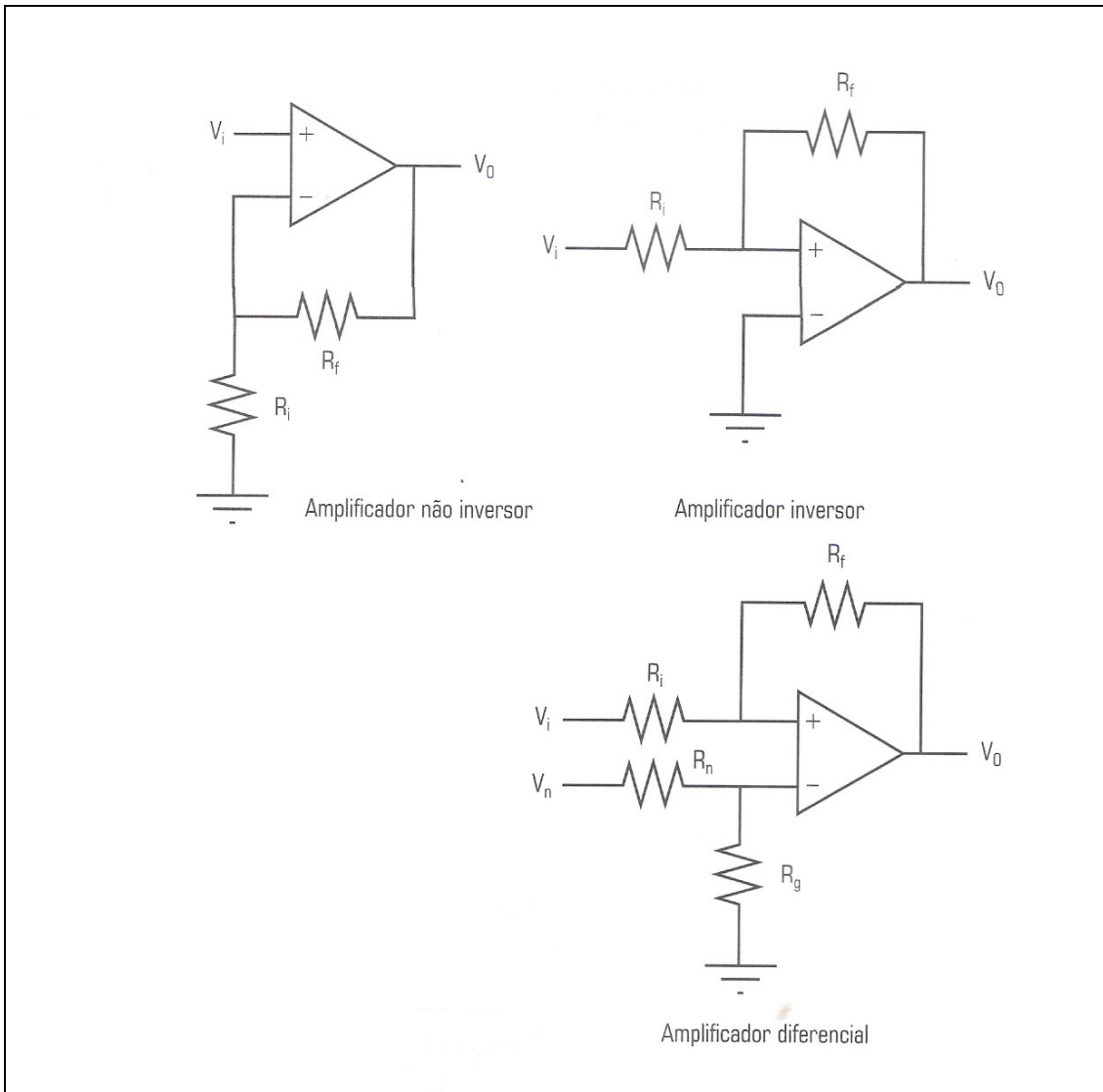


Figura 3.11 – Tipos de amplificadores operacionais. (Torres, 2002)

Para cada uma das configurações descritas na Figura 3.11, Torres (2002) apresenta uma equação para cálculo do ganho, conforme relacionado abaixo:

$$1) \text{ Não inversor: } G = 1 + \frac{R_f}{R_i} \quad (3.2)$$

$$2) \text{ Inversor: } G = -\left(\frac{R_f}{R_i}\right) \quad (3.3)$$

$$3) \text{ Diferencial: } V_o = \frac{R_f}{R_i} \times (V_n - V_i) \quad \text{se} \quad \frac{R_i}{R_f} = \frac{R_n}{R_g} \quad (3.4)$$

Obs: As designações das resistências seguem a simbologia da Figura 3.10

b) Filtragem

Para justificar a necessidade de filtragem de sinais antes da digitalização, Johnson (1993) cita o teorema de Nyquist, que estabelece a frequência mínima de amostragem de um sinal como igual ou superior a duas vezes a frequência mais alta existente no sinal. Segundo Johnson (1993), caso os componentes com frequência superior a duas vezes a taxa de amostragem não sejam previamente eliminados por um filtro analógico passa-baixa, o sinal fica permanentemente corrompido por falsas amplitudes. Estas amplitudes falsas aparecerão somadas às amplitudes verdadeiras em frequências mais baixas; este tipo de erro é denominado de *aliasing*. Johnson (1993) lembra ainda que mesmo os ruídos devem ser considerados. Estes filtros devem ser, portanto, analógicos e calculados conforme a característica do sinal de interesse a ser digitalizado.

c) Digitalização

Os sensores geralmente possuem saídas analógicas, as quais passam normalmente pelos processos de amplificação e filtragem. Tais processos propiciam a digitalização sem perda significativa do conteúdo de informação desses sinais, e tendem a minimizar a introdução de erros que comprometeriam as análises e as interpretações posteriores.

Estas saídas analógicas tratadas são aplicadas às entradas dos conversores analógico-digitais, conhecidos como ADC (do inglês: *Analog to Digital Converter*). O

ADC realiza a tarefa de converter um sinal tensão em um número binário proporcional, cuja resolução é determinada pela quantidade de bits do ADC em questão.

Johnson (1993) define o tamanho de um quantum de um sistema digital como sendo $1/2^N$, onde N é o número de bits utilizados pelo ADC e 2^N é o número máximo de combinações possíveis. Johnson (1993) enfatiza que, como a resolução final de um sistema digital é limitada pelo número de bits, existirão variações do sinal contínuo (analógico) que serão perdidas. Esta limitação resulta em um sinal numérico que é uma aproximação do original, com a introdução de ruídos devido à quantificação.

Outra característica importante do ADC é a sua frequência de amostragem que, segundo o teorema de Nyquist discutido anteriormente, deve ser sempre superior a pelo menos duas vezes a frequência máxima presente no sinal.

IOTECH (1997) apresenta alguns tipos de dispositivos para digitalização de sinais disponíveis no mercado, agrupados na Tabela 3.1, na qual é possível perceber variações de velocidade e resolução em função do tipo de ADC .

Tabela 3.1 – Resumo dos tipos de ADCs (IOTECH (1997))

Tipo de ADC	Resolução	Velocidade
Conversor paralelo (<i>Flash</i>)	4 – 8 bits	100kHz a 500MHz
Aproximações Sucessivas	8 – 16 bits	10kHz a 1 MHz
Tensão - Frequência	8 – 12 Bits	1 a 60Hz
Integração	12 – 24 Bits	1 a 60Hz

A escolha de um ADC está condicionada principalmente ao estabelecimento das necessidades de resolução e taxa de amostragem. A coleta simultânea de grandezas distintas, com a utilização de dois ou mais ADCs, é primordial quando se

torna necessário analisá-las, comparando-as entre si no domínio do tempo. Este trabalho, por exemplo, se propõe a estudar o comportamento da pressão dinâmica e da vibração em função da posição angular do pistão de um compressor alternativo. Não se pode utilizar para este tipo de aplicação, portanto, sistemas multiplexados, pois estes coletam dados dos diversos canais em tempos diferentes e de forma seqüenciada. A aquisição de dados deve ser feita de forma simultânea, onde cada um dos canais terá o seu próprio ADC.

Quando há a necessidade de uma amostragem paralelizada (simultânea), normalmente se utiliza um sistema chamado *sample-and-hold*, no qual as informações analógicas coletadas de maneira simultânea são armazenadas temporariamente.

A título de exemplo, estão incluídas no **Anexo I** as folhas de dados de um sistema produzido comercialmente pela National Instruments, projetado para analisar sinais dinâmicos tais como choque, vibração, pulsação, etc.

d) Transferência de dados

Johnson (1993) afirma que, de forma geral, os sistemas de transmissão de dados podem ser classificados como serial ou paralelo. No entanto, este mesmo autor argumenta que, para uma melhor definição, é necessário analisar a natureza física dos sinais, o formato de dados e o meio de controle da transmissão.

A norma ISO (*International Standard Organization*), citada por Johnson (1993), divide este processo entre os seguintes aspectos:

- Interface física – parafusos, porcas, tensão, frequência, etc.;
- Controle de ligação – formato de dados e protocolos;
- Controle de rede – supervisão da transferência.

A escolha da forma de transferência de dados de um dispositivo para o PC é um aspecto que deve ser analisado com bastante cuidado, devido a suas implicações físicas, de protocolos e de controle, conforme citado acima. Segundo Johnson (1993), o sistema de transmissão utilizando a porta paralela é mais simples e rápido, sendo que o padrão Centronics (interface de impressora) é o mais usual. Já o tipo GPIB (*General Purpose Instrumentation Bus*) é recomendado quando se trabalha com grupos de instrumentos.

Outras vantagens da transmissão pela porta paralela são citadas por Johnson (1993):

- Facilidade de controle de fluxo por linhas de controle separadas;
- Características elétricas simples.

O meio de transmissão utilizando a porta serial possui a vantagem de usar apenas um fio para conduzir todos os bits seqüencialmente, ao passo que o sistema paralelo utiliza um fio para cada bit. Este aspecto é significativo quando cabos longos são necessários. Por outro lado, este sistema apresenta a desvantagem de maior complexidade e falta de padronização dos protocolos de comunicação.

e) *Aquisição dos dados*

Devido às várias vantagens da utilização da porta paralela, esta foi a interface escolhida para o desenvolvimento deste trabalho. Por isso, apenas este tipo de interface de comunicação entre um periférico e um PC (computador pessoal) é abordado.

A interface de impressora é normalmente designada como LPT1, LPT2 ou LPT3 na arquitetura dos computadores pessoais. Segundo Johnson (1993), a interface Centronics, como foi projetada para comunicação com impressoras, possui as seguintes linhas:

- Saída do computador: Oito linhas de dados (D0 a D7), uma de habilitação (STB) e três de controle (*AUTOLF, *INIT, *SELINPUT);
- Entrada no computador: Uma linha para acusar recebimento de dados (ACK), três linhas de *status* (BSY, PE, SEL) e uma de controle (*ERROR).

Eletricamente estas portas trabalham com sinal do tipo TTL e, segundo Johnson (1993), normalmente não requerem muito esforço para compatibilizar terminais e impedâncias. Este autor afirma, ainda, que conexões com cabos de até 3,6 metros são aceitáveis, desde que os cabos sejam blindados.

É necessário um adaptador para a troca de dados entre um dispositivo qualquer e um computador, como por exemplo o tipo padrão da IBM (Figura 3.12). É possível observar que, pelo lado do conector, existem as linhas de dados, *status* e

controle (conforme citado). Já pelo lado do barramento do PC, além das linhas de dados (D0 a D7), existem as linhas de controle de entrada/saída (IOW/IOR), os endereços (A0 a A9) e também a linha de controle do barramento (AEN).

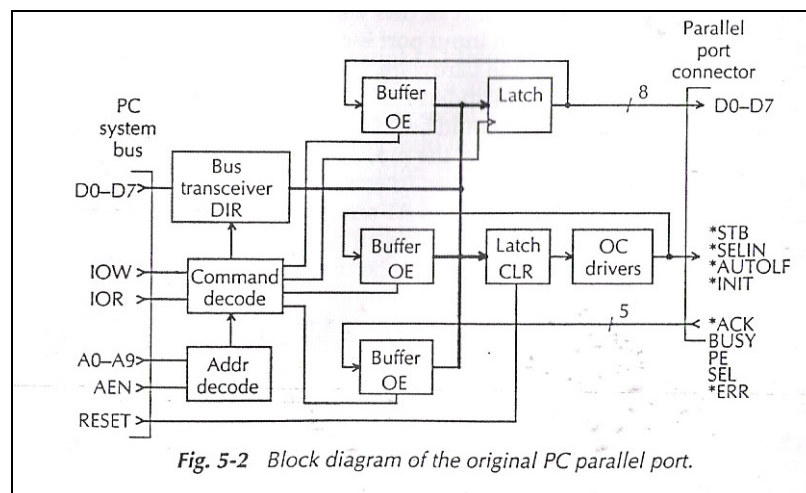


Figura 3.12 – Diagrama de blocos de uma porta paralela original encomendada à Centronics pela IBM. (Johnson, 1993)

A utilização desta porta para aquisição de dados requer alguns cuidados adicionais, haja visto que o projeto original tinha por objetivo a comunicação entre um PC e uma impressora. Um dos cuidados relacionados por Johnson (1993) é que algumas linhas têm lógicas invertidas, que podem ser re-invertidas por um operador lógico XOR. De resto, há o recurso da manipulação por *software*, que permite gerar algumas opções de uso desta porta para entrada de dados (*input*).

Dentre as opções citadas por Johnson (1993), destacam-se as seguintes:

- Uso das linhas de *status* (4 bits);
- Uso das linhas de controle (4 bits);
- Uso das linhas de *status* e controle (8 bits).

O *software* de aquisição é o elemento mais importante para uma perfeita utilização desta porta para entrada, saída ou um sistema bidirecional de dados. Este programa é o responsável por controlar o transporte de dados, de maneira confiável, do dispositivo externo para o barramento de dados do PC. As rotinas podem ser escritas em várias linguagens (Assemble, Pascal, Basic, C, etc.), com desempenhos variáveis em função dos recursos de cada linguagem e da qualidade da programação.