

CAPÍTULO 5

O ARRANJO EXPERIMENTAL

O arranjo foi concebido de forma a simular um sistema real em que fosse possível introduzir defeitos no compressor. A intenção era que os defeitos introduzidos fossem posteriormente estudados pela instrumentação desenvolvida.

5.1 Sistema de Compressão

Para tanto, utilizou-se um sistema de compressão de pequeno porte fabricado pela SCHULZ e especificado como MSI 5,2 ML/25, cujas principais características são:

1) Compressor:

Simplex estágio e simplex efeito

Deslocamento teórico: 147,5 l/min

Pressão máxima de operação: 8,3 bar

Pressão mínima de operação: 5,5 bar

Tempo de enchimento do reservatório: 2,10 minutos

Rotação: 2275 RPM

Acionado por correia

2) Motor:

Potência: 0,75 kW

Dois pólos

Monofásico e alimentado com 110V

3) Reservatório:

Capacidade: 26 litros

Este sistema sofreu algumas adaptações para possibilitar a instalação dos sensores, conforme apresentado no fluxograma da Figura 5.1.

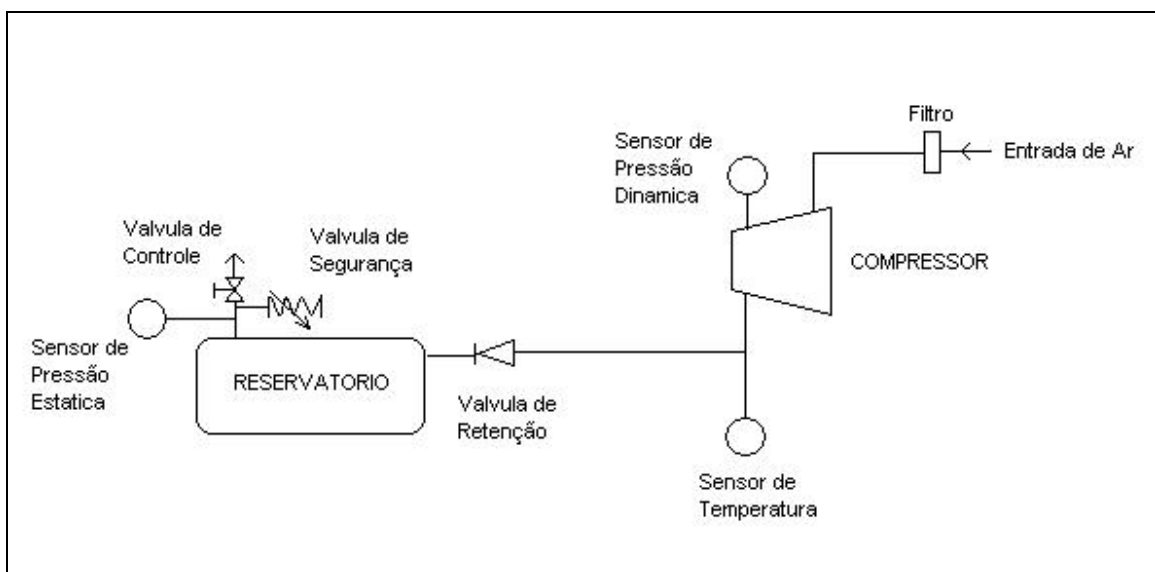


Figura 5.1 – Fluxograma do sistema de compressão, onde é possível identificar o compressor, os sensores, as válvulas e o reservatório.

O sistema físico com sensoriamento completo apresenta alguns detalhes adicionais, como é possível observar no desenho esquemático da Figura 5.2.

No fluxograma apresentado na Figura 5.1, pode-se observar que o ar admitido pelo filtro é comprimido no compressor, passa pela válvula de retenção e entra no

reservatório. Do reservatório, o ar pressurizado sai pela válvula de controle. O sistema possui ainda uma válvula de segurança, devido à possibilidade de acontecerem pressões elevadas caso o compressor continue a operar sem consumo do ar comprimido. O sistema apresenta também um sensor de pressão dinâmica instalado no compressor, um sensor de temperatura de descarga e um sensor de pressão estática instalado na saída do reservatório.

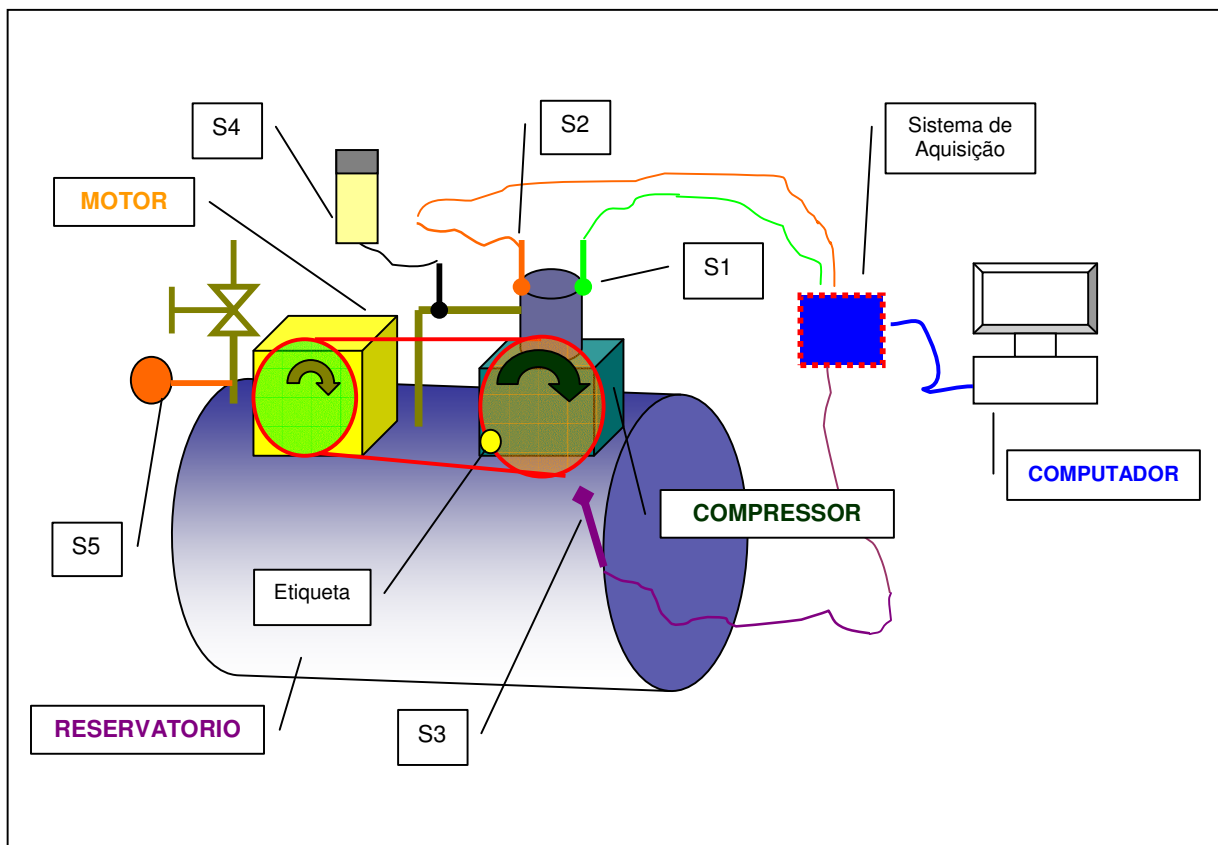


Figura 5.2 – Arranjo experimental composto por um compressor, um motor, sensores, uma válvula de saída, um sistema de aquisição e um computador.

No sistema físico completo (Figura 5.2), é possível visualizar o motor e a transmissão (correia/polias) que aciona o compressor. Para facilitar a identificação, os sensores foram designados por códigos :

S1 – Sensor de pressão dinâmica

S2 – Sensor de vibração

S3 – Fototacômetro

S4 – Sensor de temperatura

S5 – Sensor de pressão estática

O fototacômetro (S3) necessita de uma etiqueta reflexiva fixada na polia de acionamento do compressor. Esta etiqueta reflete a luz emitida, gerando um impulso elétrico.

Os sinais obtidos de S1, S2 e S3 são enviados para o sistema de aquisição que os condiciona, digitaliza e transmite, pela porta paralela, para o computador. Já o sinal de S4 (termopar) é lido em um multímetro digital, enquanto o sensor S5 (manômetro) possibilita a leitura direta.

5.2 Descrição dos Sensores

5.2.1 Sensor de Pressão Dinâmica (S1)

Para medição de pressão dinâmica o sensor 111A23 da PCB Piezotronics foi utilizado. Este sensor é piezelétrico do tipo ICP, cujas características estão apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Características do sensor 111A23.

Fabricante: PCB Piezotronics	
Modelo: 111A23	
Tensão de alimentação: 20 a 30 V	
Corrente de alimentação: 2 a 20mA	
Bias tensão de saída: 8 a 14 V	
Impedância de saída: < 100 Ohms	
Sensibilidade: 0,5 mV/psi	
Faixa de medição(para +/- 5V na saída): 10000psi	
Faixa de temperatura: - 73 °C a +135 °C	
Coef. de temperatura da sensibilidade: 0,36 %/°C	
Frequência de ressonância: > 400 kHz	
Limite em baixa frequência: 0.0005Hz	
Constante de tempo de descarga: ≥ 1 s em temperatura ambiente	
Material do cristal: Quartzo	

Uma fonte de tensão regulada para 20 VDC e um capacitor de desacoplamento foram utilizados para a alimentação deste sensor, conforme desenho apresentado na Figura 5.3.

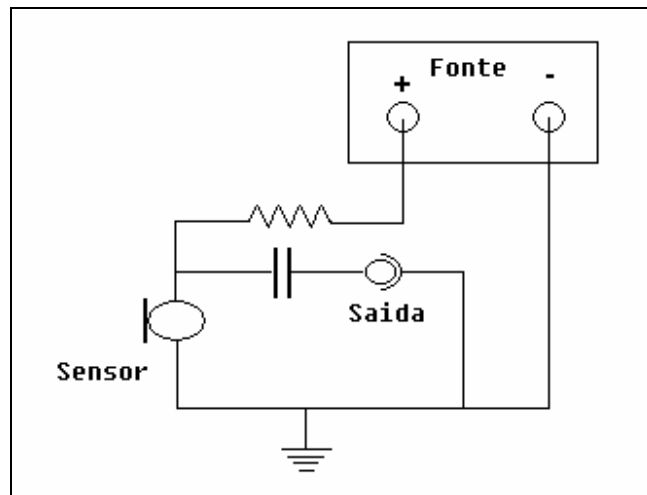


Figura 5.3 - Sistema de condicionamento do sensor de pressão dinâmica.

Além da parte de condicionamento de sinal, o sensor necessita de um dispositivo de adaptação mecânica para possibilitar a medição da pressão interna no cilindro. Este adaptador (Figura 5.4) é composto por quatro peças:

- 1) Sonda de fixação na tampa de válvula;
- 2) Trocador de calor;
- 3) Porca de fixação do sensor;
- 4) Anel de vedação do sensor.

A sonda apresenta uma rosca externa em uma extremidade para fixação na tampa de válvulas, uma rosca externa na outra extremidade permite a montagem do trocador, enquanto uma rosca interna serve à fixação do sensor através de uma porca.

A necessidade de utilizar um trocador de calor veio da experiência adquirida com os testes, quando alterações foram percebidas nas medidas em função da temperatura. Com este dispositivo, o sensor ficou protegido contra variações da temperatura.

Para montar a sonda, foi necessário abrir um furo passante no cabeçote no lado da sucção e um furo roscado na tampa de válvulas, onde a sonda foi aparafusada com a adição de adesivo (éster de cianoacrilato) para garantir a fixação e a vedação.

O sensor foi fixado à sonda por uma porca que o pressiona contra um anel de vedação. O trocador de calor foi montado posteriormente na rosca externa da sonda e acoplado a mangueiras por onde circula água. O trocador, quando totalmente enroscado, faz pressão sobre o cabeçote, aumentando a rigidez do conjunto com a conseqüente eliminação da vibração relativa ao cabeçote. Esta vibração seria nociva para a fixação da sonda na placa de válvulas.

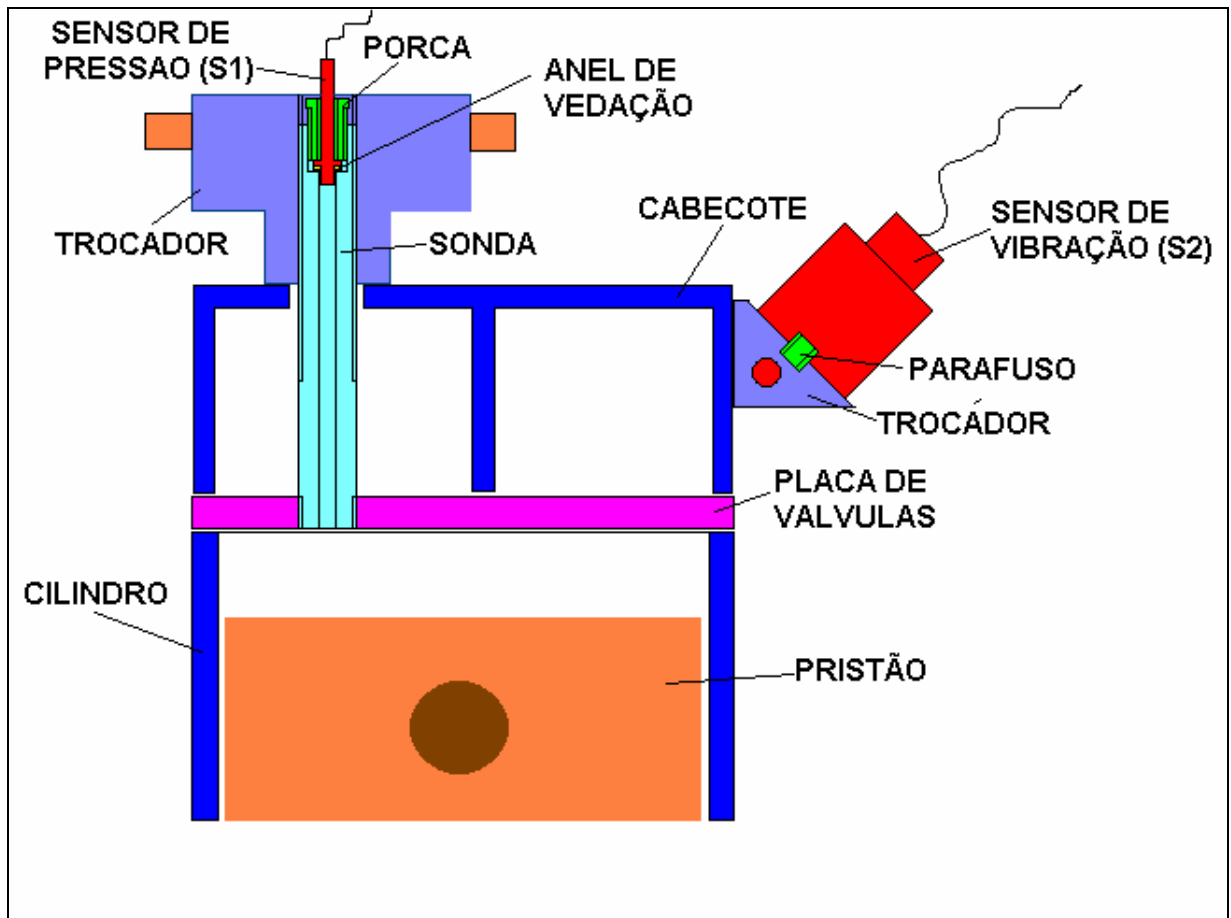


Figura 5.4 – Arranjo para medição de pressão e vibração. É possível observar, no lado esquerdo, a sonda que interliga o sensor de pressão ao interior do cilindro, o trocador de calor e o sensor de pressão. Do lado direito está representado o sensor de vibração fixado a um trocador de calor.

5.2.2 Sensor de Vibração (S2)

Para medição de pressão dinâmica o sensor 786F da Wilcoxon foi utilizado. Este sensor é também piezelétrico do tipo ICP, cujas características estão listadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Características do sensor 786 F

Fabricante: Wilcoxon	
Modelo: 786F	
Tensão de alimentação: 18 a 30 VDC	
Corrente de alimentação: 2 a 10 mA	
Bias tensão de saída: 12 VDC	
Impedância de saída: 100 Ohms	
Sensibilidade: 100mV/g	
Faixa de aceleração : 80 Gs 0-Pk	
Faixa de temperatura: - 50 °C a + 120 °C	
Freqüência de Ressonância: 30 kHz	
Faixa de resposta linear (+/- 10%): 1 a 8 kHz	
Faixa de resposta linear (+/- 3 dB): 0,5 a 13 kHz	
Material do cristal: Cerâmico	


Como o princípio de funcionamento do sensor é semelhante ao do sensor de pressão, utilizando o mesmo tipo de transdutor e amplificador interno (ICP), o condicionamento de sinal é o mesmo apresentado na Figura 5.3.

A montagem do sensor, por outro lado, é muito simples, pois necessita apenas de um trocador de calor para proteger o sensor contra as variações de temperatura, evitando alterações do ganho em função deste parâmetro. O trocador de calor (Figura 5.4) foi fixado ao cabeçote com adesivo (éster de cianoacrilato) e ao sensor com um parafuso.

5.2.3 Fototacômetro (S3)

O fototacômetro utilizado foi o ROS-5P da Monarch Instrument .

Tabela 5.3 – Características do sensor ROS-5P

Fabricante: Monarch Instrument	
Modelo: ROS – 5P	
Tensão de alimentação: 5 VDC	
Corrente de alimentação: 30mA	
Tensão de saída: 0 a 5 Vdc TTL	
Faixa de temperatura: -40 °C a +121°C	
Faixa de velocidade: 1 a 250.000 RPM	
Distância máxima da etiqueta: 0,9m	
Distância mínima da etiqueta: 25,4 mm	
Ângulo de desvio máximo da etiqueta: -45°	

Este sinal não necessitou de condicionamento devido ao fato de já ser um sinal digital no padrão TTL e poder ser conectado diretamente à entrada apropriada da interface usada.

O sensor (Figura 5.5) foi fixado à máquina por uma base magnética de forma que a luz emitida atingisse a etiqueta refletora fixada na polia do compressor. Para o funcionamento adequado do sistema, a etiqueta refletora foi fixada na polia, com o pistão no ponto morto superior (PMS) e a luz do sensor incidindo sobre a mesma.

Este procedimento garante que o pistão esteja no PMS no momento em que cada pulso for emitido pelo fototacômetro. Como há 360° entre um pulso e o

subseqüente, é possível determinar a posição do pistão a cada instante pelo estudo cinemático do movimento do pistão com relação à biela, desde que a velocidade de rotação do virabrequim se mantenha constante.

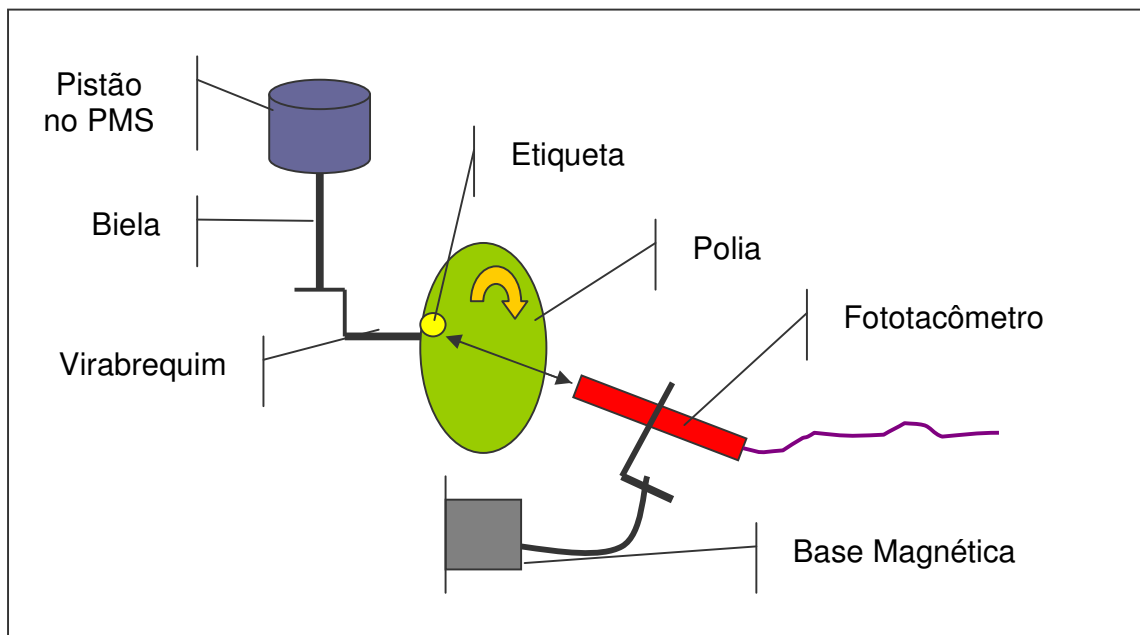


Figura 5.5 – Arranjo para medição de fase. É possível identificar o pistão no PMS, a biela, o virabrequim e a polia com uma etiqueta que reflete a luz emitida pelo fotocômetro, o qual é suportado por uma base magnética.

5.2.4 Sensor de Temperatura (S4)

Para medição da temperatura, um termopar conectado a um multímetro foi utilizado. A Tabela 5.4 apresenta as características deste instrumento.

Tabela 5.4 – Características do Minipa ET-2070

Fabricante: Minipa
Modelo: ET-2070
Faixa de temperatura de medição: -40 a 1000 °C
Faixa de temperatura de operação: 0 a 40 °C
Resolução: 1 °C
Sensor: termopar do tipo K

As informações de temperatura não foram obtidas pelo módulo de aquisição de dados; estes valores eram lido diretamente no multímetro.

Uma redução com um *cap* preenchido com massa epoxy foi utilizada para a montagem do termopar (Figura 5.6), a fim de que este estivesse submetido à passagem do gás de descarga. Este conjunto foi montado em uma conexão de quatro saídas e instalado na descarga do compressor.

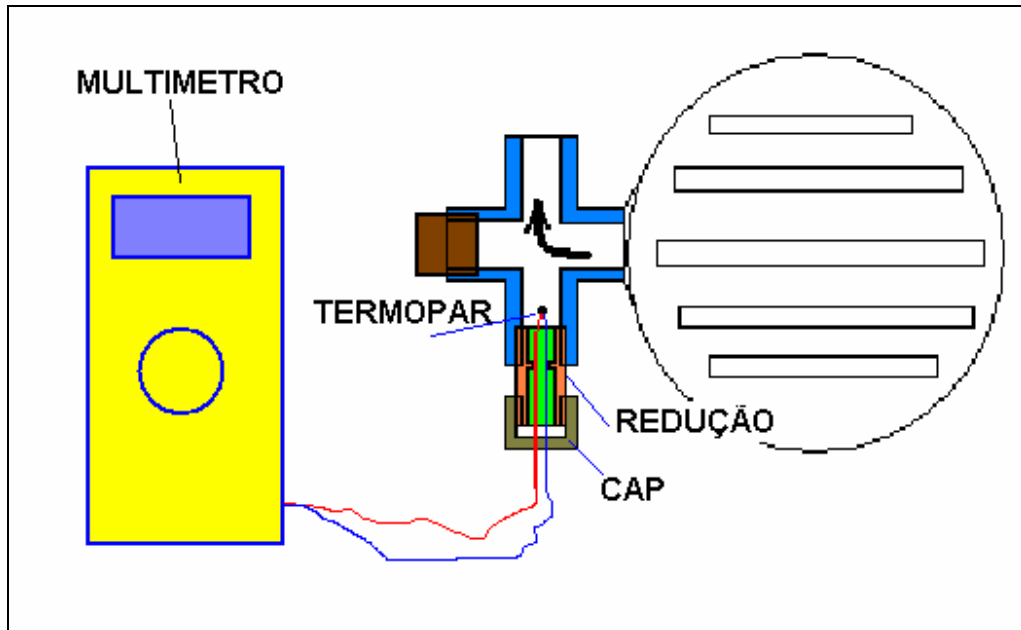


Figura 5.6 – Arranjo para medição de temperatura. É possível observar, por uma vista superior, o termopar instalado em uma conexão de quatro vias através de uma redução. Este termopar está ligado a um multímetro para leitura de temperatura.

5.2.5 Sensor de Pressão Estática (S5)

Um Manômetro Bourdon foi utilizado para medir a pressão estática após o balão.

A Tabela 5.5 apresenta as características deste instrumento.

Tabela 5.5 – Características do Manômetro Classe B

Fabricante: Lube Fer
Modelo: Classe B (ABNT)
Fundo de escala: 7,0 Kgf/cm ²
Resolução: 0,1 Kgf/cm ²
Precisão: 0,05 Kgf/cm ²

5.3 Descrição do Sistema de Aquisição

A interface de aquisição de dados consiste em uma placa de uso geral, desenvolvida pelo Laboratório de Propriedades Óticas (LaPO). Esta placa possui dois canais de conversão analógico-digitais de 12 bits de resolução, uma entrada digital de 8 bits e uma saída digital de 8 bits. Tal disposição permite que cada uma das partes da interface seja endereçada independentemente, provendo assim controle individual de cada um dos blocos pela porta de impressora de um computador pessoal.

As duas entradas analógicas possuem amplificadores operacionais, em montagem não inversora, com impedância de entrada de 1 Mohm e ajuste de *offset* por trimpots de 10 voltas. O amplificador operacional utilizado foi o TL071 (um amplificador com entradas J-FET de baixo ruído, baixa corrente de *offset*, baixa distorção harmônica e resposta rápida).

O sinal dos amplificadores é aplicado aos conversores analógico-digitais (ADC) que, por sua vez, efetuam a digitalização dos dados a partir dos comandos do programa de controle da interface. Como conversor, foi utilizado o ADS7804 (BurrBrown Texas) para uso industrial. O ADS7804 é um conversor analógico-digital completo de 12 bits de resolução, utilizando tecnologia CMOS. Este conversor é composto por uma rede (C, C/2) de capacitores, um conversor DA, um registrador do tipo SAR, com um circuito do tipo *sample-and-hold* na entrada, uma fonte de tensão de referência, um *clock* interno, uma interface para uso em microcontroladores e um controle para saída de *tri-state*.

O ADS7804 é especificado para trabalhar em uma taxa de amostragem de até 100KHz, garantido em toda a faixa de temperatura. Este ADC utiliza uma tensão de alimentação simples de +5V, com uma potência dissipada abaixo de 100mW.

Os dados digitalizados são então transmitidos ao computador em palavras de 4 bits pela porta paralela, na configuração SPP, através de um buffer. Este circuito, além de possibilitar a transmissão dos dados em blocos, serve de proteção ao computador.

Para a medida dos sinais de vibração e pressão foram feitas algumas adaptações na interface. Foram inseridas duas fontes de tensão de 20 Volts que alimentam os sensores, além dos circuitos de desacoplamento dos sinais de saída dos respectivos transdutores.

5.4 Descrição dos Softwares

5.4.1 Software de Aquisição

Um programa em Visual Basic 6.0 foi desenvolvido para a aquisição dos dados. Este programa faz a comunicação com a interface, controlando os ciclos de conversão dos sinais analógicos de pressão e vibração em função do sinal de tempo gerado pelo fototacômetro.

O programa foi desenvolvido de forma a tornar a comunicação a mais rápida possível, gerando uma interface usuário-máquina flexível e agradável.

Como a interface criada não possui “inteligência” própria, foi utilizado um computador pessoal (PC) para controlá-la a partir da porta paralela. Alguns passos são efetuados pelo programa para a leitura dos dados dos conversores analógico-digitais. Primeiro, a instrução para limpar os dados contidos nos ADCs é enviada. Em seguida, o comando de início de conversão dos dados é executado. Finalmente, estes dados são lidos pelo PC.

A interface de aquisição foi desenvolvida para trabalhar com o padrão de comunicação SPP (*Standard Parallel Port*), o qual só permite a leitura de uma palavra de 5 bits por vez, com o quinto bit negado. No projeto da interface, este quinto bit não é levado em conta, o que faz com que os dados transmitidos ao computador sejam palavras de 4 bits. Como os ADCs utilizados na interface possuem 12 bits de resolução, o valor binário convertido é dividido em três palavras de 4 bits, lidas seqüencialmente para posterior reconstrução no PC. Para esta reconstrução, a primeira palavra sofre um deslocamento de 8 bits, é somada ao segundo *nibble* e, depois de deslocada novamente de 4 bits, é finalmente somada à terceira palavra.

Como o sinal de entrada do estágio analógico varia entre -5V e +5V, é necessário checar o bit de número 12, que corresponde à polaridade do sinal (\pm) da tensão de entrada. Se este bit de sinal for 1, significa que o valor lido é negativo; se este bit for 0, a tensão de entrada é positiva.

Os dados adquiridos são armazenados em uma matriz de quatro colunas, junto com o valor correspondente ao instante de tempo em que a medida foi executada. Assim, os valores de pressão e vibração digitalizados e o sinal adquirido do tacômetro – correspondentes a cada medida – podem ser salvos em um arquivo de texto para posterior tratamento e análise por programas específicos.

Além deste, um outro arquivo de texto pode ser gerado com os dados referentes à pressão em função do deslocamento do pistão. O valor correspondente ao deslocamento é calculado pelo programa utilizando o sinal do tacômetro. Para tanto, o programa armazena os instantes de tempo em que houve uma transição de descida do sinal do tacômetro. Em seguida, faz a diferença entre estes intervalos, calculando o período médio dos ciclos e conseqüentemente a freqüência, conforme as equações 5.1 e 5.2.

$$Period(a) = temp(i) - temp(i - 1) \quad (5.1)$$

$$f = \frac{1}{\frac{1}{a} \sum_{n=1}^a Period(n)} \quad (5.2)$$

Sabendo que existe uma relação periódica entre o tempo e o deslocamento do pistão em cada ciclo, é possível fazer a conversão do tempo para deslocamento unitário utilizando a seguinte expressão:

$$D(temp(i)) = \frac{Di}{Dt} = \frac{1}{2}(1 - \text{Cos}(2\pi * f * temp(i))) \quad (5.3).$$

Neste caso, o deslocamento unitário do pistão (D) é definido como sendo a razão entre o deslocamento instantâneo (D_i) e o deslocamento total (D_t) do pistão. Caso haja informações a respeito da excentricidade do virabrequim e do valor do diâmetro do pistão, é também possível calcular o deslocamento e o volume deslocado.

5.4.2 *Software* de Tratamento Final para Análise

A fim de permitir as análises necessárias à identificação de defeitos nos compressores alternativos, optou-se por utilizar um *software* comercial para o tratamento final dos dados, o qual foi desenvolvido para a análise de dados científicos. As ferramentas disponíveis no programa permitem executar diversos tratamentos e apresentações dos dados sob diferentes formas gráficas. O *software* escolhido foi o Origin 7.0 SR0 (2002) devido à diversidade de recursos disponíveis, tais como: recursos matemáticos, gráficos, estatísticos, filtros, FFT (Fast Fourier Transformer), etc.

A entrada de dados se faz na forma de planilhas, que podem ser importadas de diversas formas: ASCII, Dbase, DIF, *Axon Binary Data Files* (*.DAT), vetores, matrizes, etc.

Os arquivos gerados no *software* de aquisição são de dois tipos: um com as quatro variáveis adquiridas simultaneamente (tempo, pulso, pressão e vibração) e outro com vários ciclos de pressão em função do deslocamento do pistão.

Os dados armazenados nestas planilhas podem ser representados em diversos formatos gráficos selecionáveis a partir de uma lista de opções predefinidas (Figura 5.7).

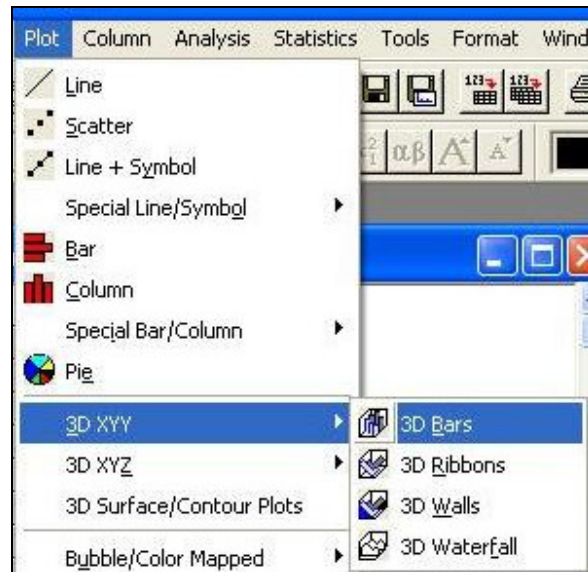


Figura 5.7 – Menu para escolha de apresentações gráficas. (Origin 7.0 SR0, 2002).

Outros recursos de grande importância são as operações matemáticas entre as colunas e as funções matemáticas, escolhidas a partir de uma lista de opções predefinidas (Figura 5.8) .

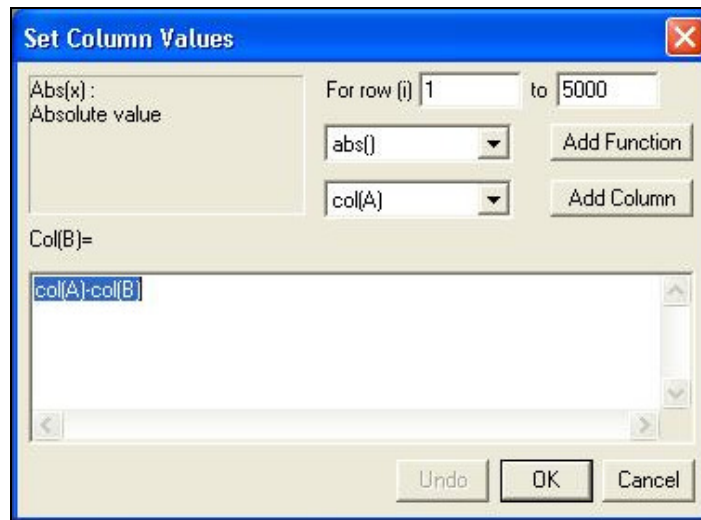


Figura 5.8 – Menu para escolha de operações matemáticas.
(Origin 7.0 SR0, 2002)

No que diz respeito a recursos para análise (Figura 5.9), o Origin 7.0 SR0 (2002) possui várias opções, dentre as quais se destacam:

- Filtros passa alta, passa baixa, passa banda, etc;
- Cálculo integral e diferencial;
- Cálculo de curva média;
- Transformada Rápida de Fourier (FFT);
- Regressões lineares, exponenciais, polinomiais, etc.

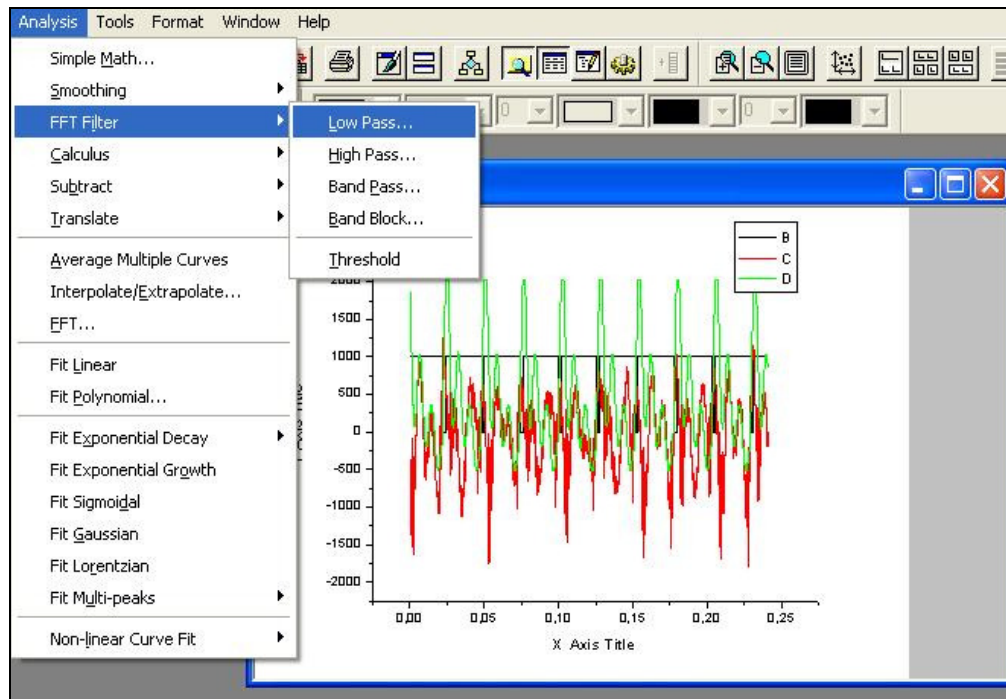


Figura 5.9 – Menu para escolha de ferramentas de análise. (Origin 7.0 SR0, 2002)

Também é possível analisar estatisticamente os dados para obtenção de médias, desvios e outros tratamentos mais sofisticados (Figura 5.10).

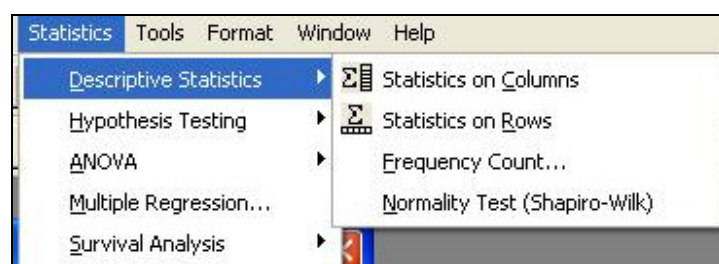


Figura 5.10 – Menu para escolha de ferramentas estatísticas. (Origin 7.0 SR0, 2002)

Ferramentas adicionais podem ser utilizadas, como a geração de planilha com os picos de uma onda vibratória (Figura 5.11). Este recurso permitiu traçar uma envoltória em torno de um sinal composto por uma seqüência de pulsos.



Figura 5.11 – Menu para seleção da rotina de busca de picos.

(Origin 7.0 SR0, 2002)

Por fim, é possível ainda abrir uma planilha Excel a partir do *software*, deixando à disposição mais um leque de opções para tratamentos matemáticos e recursos gráficos. Há, inclusive, grande facilidade de migrar dados de um sistema para outro.

O Origin 7.0 SR0 (2002) salva todos os dados e gráficos – manipulados ou criados em um determinado trabalho de análise – em um único arquivo denominado de projeto. Esta forma de organização permite uma rápida visualização das análises efetuadas, com possibilidade de utilização da mesma metodologia repetidas vezes.