



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA E INSTITUTO DE MATEMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MECATRÔNICA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA MULTICANAL PARA
ANÁLISE DE PULSAÇÃO DE PRESSÃO EM COMPRESSORES
ALTERNATIVOS VISANDO A MANUTENÇÃO PREDITIVA**

JOSÉ DIVAL PASTOR RAMOS

SALVADOR
2006

JOSÉ DIVAL PASTOR RAMOS

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA MULTICANAL PARA
ANÁLISE DE PULSAÇÃO DE PRESSÃO EM COMPRESSORES
ALTERNATIVOS VISANDO A MANUTENÇÃO PREDITIVA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Mecatrônica, Escola Politécnica e Instituto de Matemática, como requisito para obtenção do título de mestre em Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Iuri Pepe

SALVADOR
2006

TERMO DE APROVAÇÃO

JOSÉ DIVAL PASTOR RAMOS

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA MULTICANAL PARA
ANÁLISE DE PULSAÇÃO DE PRESSÃO EM COMPRESSORES
ALTERNATIVOS VISANDO A MANUTENÇÃO PREDITIVA**

Tese aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Mecatônica, Universidade Federal da Bahia, pela seguinte banca examinadora:

Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe (Orientador)

Prof. Dr. Germano Pinto Guedes

Prof. Dr. Herman Augusto Lepkson

SALVADOR
2006

A

Minha mãe, Diorita (in memmorium), pelo exemplo de determinação.

Meu pai, Walfredo, pelo exemplo de honestidade.

Minha mulher, Ivana, por me ensinar o valor do desapego e da coragem.

Minha filha, Kaena, por me incentivar a ser um melhor exemplo.

AGRADECIMENTOS

- Ao meu orientador, Prof. Dr. Iuri Pepe, pela sua ampla participação e grande envolvimento, constituindo-se como elemento fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.
- Ao colega Luiz Carlos Simões, pela sua direta contribuição na elaboração de softwares e circuitos eletrônicos para aquisição de sinal, além da sua participação em várias discussões importantes.
- Aos colegas do LAPO, pelo ambiente alegre e saudável.
- A D. Norma e Sr. Helio pela valorização aos idealistas.
- A Jodalia, pela sua inestimável amizade e apoio.
- Aos colegas de prática de Yôga, pelos preciosos momentos de carinho e amizade.
- Aos colegas da TAETECH, pelo apoio e compreensão.
- A Cristina e Sueli, pelo carinho e cuidado que me dedicaram.
- Aos meus irmãos Katya, Simon, Lorena e George, que sempre me incentivaram e apoiaram nos momentos difíceis.

ABSTRACT

The necessity of new methodologies for analysis and monitoring Alternative Compressors motivated the development of a multichannel digital system with the capacity to measure different variables simultaneously. In this work it was chosen to measure dynamic pressure, vibration, and piston displacement. The development of this work, embedded in a Mechatronics course, produced a simple and efficient system, whose experimental results presented through graphics and performance data confirmed the defects artificially introduced. This results allowed to validate the Diagnosis System for Alternative Compressors (DSAC) and demonstrated that this resource is a powerful way for diagnosing defects in the components of the compression part (Fluid end) and in the drive part (Power end). These informations transformed into repair recomendations, will be the base for a Predictive Maintenance Plan.

Key Words: Dynamic Pressure Measurement, Vibration Measurement, Predictive Maintenance, Monitoring, Diagnosis, Reciprocating Compressor.

RESUMO

A necessidade de novas metodologias para análise e monitoramento de compressores alternativos motivou o desenvolvimento de um sistema digital multicanal com capacidade de medir diferentes grandezas simultaneamente. Como base para este trabalho escolheu-se medir pressão dinâmica, vibração e deslocamento do pistão. O desenvolvimento deste trabalho dentro de um curso de Mecatrônica produziu um sistema simples e eficiente cujos resultados experimentais, apresentados sob a forma de gráficos e dados de desempenho, confirmaram os defeitos introduzidos artificialmente. Isto permitiu validar o Sistema de Diagnóstico de Compressores Alternativos (SDCA) e demonstrou o quanto este recurso é poderoso para o diagnóstico de defeitos, tanto nos componentes da parte de compressão (*fluid end*) quanto nos de acionamento (*power end*). Estas informações, transformadas em recomendações de reparo, serão a base para uma atuação preditiva dos setores de Planejamento de Manutenção.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO

1.1	Cenário	1
1.2	Objetivo	3
1.3	Justificativa	3

2 REVISÃO DAS CARACTERÍSTICAS E DEFEITOS DOS COMPRESSORES ALTERNATIVOS

2.1	Definição e Classificação dos Compressores	5
2.2	Aspectos Construtivos de Compressores Alternativos	6
2.3	Princípio de Funcionamento do Compressor Alternativo	13
2.4	Ciclo Termodinâmico: Revisão Teórica	18
2.5	Ciclo Termodinâmico Real	20
2.5.1	Cálculo do Rendimento Volumétrico	21
2.5.2	Cálculo da Vazão	23
2.5.3	Trabalho	23
2.6	Análise de Esforços	26
2.7	Comportamento Vibratório	30
2.8	Análise de Pulsação de Pressão	31
2.9	Análise e Diagnóstico de Defeitos em Compressores Alternativos	35
2.9.1	Diagnóstico de Defeitos em Válvulas de Sucção	35
2.9.2	Diagnóstico de Defeitos em Válvulas de Descarga	38
2.9.3	Diagnóstico de Defeitos em Anéis do Pistão	40
2.9.4	Diagnóstico de Outros Defeitos	42
2.9.5	Diagnóstico de Folga Mecânica	43

3	REVISÃO DE SOLUÇÕES DE INSTRUMENTAÇÃO PARA O DIAGNÓSTICO DE COMPRESSORES ALTERNATIVOS	
3.1	Visão Geral	45
3.2	Sensor para Medição de Pressão Dinâmica	47
3.3	Sensor para Medição de Vibração	50
3.4	Sensor para Medição de Fase	52
3.5	Sistema de Aquisição de Dados	53
4	SOLUÇÃO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA O DIAGNÓSTICO DE DEFEITOS EM COMPRESSORES ALTERNATIVOS	
4.1	Visão Geral sobre a Revisão da Literatura	67
4.2	Solução	68
5	O ARRANJO EXPERIMENTAL	
5.1	Sistema de Compressão	73
5.2	Descrição dos Sensores	76
5.2.1	Sensor de Pressão Dinâmica (S1)	76
5.2.2	Sensor de Vibração (S2)	80
5.2.3	Fototacômetro (S3)	82
5.2.4	Sensor de Temperatura (S4)	83
5.2.5	Sensor de Pressão Estática (S5)	85
5.3	Descrição do Sistema de Aquisição	86
5.4	Descrição dos Softwares	87
5.4.1	Software de Aquisição	87
5.4.2	Software de Tratamento Final para Análise	90
6	METODOLOGIA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO	
6.1	Dados Estáticos	95
6.2	Dados Dinâmicos	96
6.3	Procedimentos de Calibração e Validação	109
6.3.1	Calibração de Pressão Dinâmica	110
6.3.2	Validação de Pressão Dinâmica	113

6.3.3	Calibração de Vibração	117
6.3.4	Validação do Canal de Vibração	119
6.4	Procedimentos de Teste	122
6.4.1	Parte do Fluido	122
6.4.2	Parte de Acionamento	129
7	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO	
7.1	Análise de Dados de Pressão Dinâmica	132
7.1.1	Onde Medir	132
7.1.2	Correção das Curvas	136
7.1.3	Análise de Defeitos nas Válvulas	143
7.2	Análise de Dados de Vibração	149
7.2.1	Análise Qualitativa	151
7.2.2	Análise Qualitativa e Quantitativa	152
7.3	Discussão dos Resultados	167
7.3.1	Estudo da Pressão Dinâmica	167
7.3.2	Estudo do Comportamento Vibratório	169
8	CONCLUSÕES E PESPECTIVAS	173

REFERÊNCIAS

ANEXOS

ANEXO I – Folha de dados dos cartões PCI-4451 e PCI-4452 da National Instruments.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 – Componentes de um compressor alternativo.	09
Figura 2.2 - Câmara de compressão de compressor alternativo.	10
Figura 2.3 - Desenho esquemático de uma válvula.	11
Figura 2.4 a - Válvula Faether.	12
Figura 2.4 b - Válvula de canais.	12
Figura 2.4 c - Válvula de discos.	12
Figura 2.5 - Diagrama P x V .	13
Figura 2.6a – Etapa de compressão.	16
Figura 2.6b – Etapa de descarga.	16
Figura 2.6c – Etapa de expansão.	17
Figura 2.6d – Etapa de admissão.	17
Figura 2.7 - Diagrama P x V para ciclos teóricos.	19
Figura 2.8 - Diagrama P x V real.	21
Figura 2.9 - Áreas utilizadas para geração da equação 2.18.	25
Figura 2.10 – Modelo representativo dos componentes móveis de acionamento de um compressor monocilíndrico.	27
Figura 2.11- Diagrama de composição de esforços.	29
Figura 2.12 - Conjugado resultante da composição da pressão e da inércia.	30
Figura 2.13 - Onda de pressão.	32
Figura 2.14 - Composição de onda de pressão complexa resultante do movimento do pistão de um compressor alternativo.	32
Figura 2.15 - Propagação de onda plana de pressão.	33
Figura 2.16 - Amortecedor de pulsação.	34
Figura 2.17 - Diagrama P x V de um compressor alternativo com vazamento na válvula de sucção.	36
Figura 2.18 - Efeito do vazamento pela válvula de sucção gerando redução na vazão, quando comparada com o ciclo ideal.	37
Figura 2.19 - Diagrama P x V de compressor com vazamento na válvula de descarga.	38
Figura 2.20 - Efeito do vazamento pela válvula de descarga, gerando redução na vazão e aumento do consumo de energia, quando comparado com o ciclo ideal.	40
Figura 2.21 - Diagrama P x V de compressor com vazamento pelos anéis do pistão.	41
Figura 2.22 - Pulso vibratório devido à folga mecânica.	43

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 - Relatórios gráficos do sistema PROGNOST.	47
Figura 3.2 - Sensor de Pressão Dinâmica.	48
Figura 3.3 – Esquema elétrico de sensor do tipo ICP.	49
Figura 3.4 - Sistema de condicionamento de sinal para sensor do tipo ICP.	50
Figura 3.5 - Desenho esquemático e real de um acelerômetro.	51
Figura 3.6 – Desenho esquemático de fototacômetro.	53
Figura 3.7 - Esquema elétrico de um acelerômetro do tipo ICP conectado a sistema de aquisição.	55
Figura 3.8 – Curva típica de tensão de entrada versus tensão de saída de um amplificador.	56
Figura 3.9 – Simbologia do amplificador operacional.	57
Figura 3.10 – Corte dos valores superiores aos limites de amplificador operacional.	58
Figura 3.11 – Tipos de amplificadores operacionais.	59
Figura 3.12 – Diagrama de blocos de uma porta paralela original encomendada à Centronics pela IBM.	65

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 – Fluxograma do sistema de compressão, onde podemos identificar o compressor, os sensores, as válvulas e o reservatório.	74
Figura 5.2 – Arranjo experimental composto por um compressor, um motor, sensores, uma válvula de saída, um sistema de aquisição e um computador.	75
Figura 5.3 - Sistema de condicionamento do sensor de pressão dinâmica.	78
Figura 5.4 – Arranjo para medição de pressão e vibração.	80
Figura 5.5 – Arranjo para medição de fase.	83
Figura 5.6 – Arranjo para medição de temperatura.	85
Figura 5.7 – Menu para escolha de apresentações gráficas.	91
Figura 5.8 – Menu para escolha de operações matemáticas.	92
Figura 5.9 – Menu para escolha de ferramentas de análise.	93
Figura 5.10 – Menu para escolha de ferramentas estatísticas.	93
Figura 5.11 – Menu para seleção da rotina de busca de picos.	94

CAPÍTULO 6

Figura 6.1 – Fluxograma de tratamento de dados	97
Figura 6.2 – Planilha geral de dados.	98

Figura 6.3 – Planilha de dados de ciclo.	99
Figura 6.4 – Gráfico de pressão sem correção do deslocamento.	100
Figura 6.5 – Gráfico de pressão para vários ciclos.	100
Figura 6.6 – Graf. de Pressão x Desloc. volumétrico unitário do pistão sem correção.	102
Figura 6.7 – Graf. corrigido de Pressão x Desloc. volumétrico unitário do pistão.	105
Figura 6.8 – Gráfico polar da vibração em função da posição angular do eixo.	107
Figura 6.9 – Gráfico de envoltória de pulsos em função do giro do eixo.	108
Figura 6.10 – Gráficos de envoltória de pulsos em função de um giro do eixo.	109
Figura 6.11 – Aparato para calibração do canal de Pressão Dinâmica.	111
Figura 6.12 – Curvas de calibração do canal de pressão para dois valores de resistência do amplificador.	113
Figura 6.13 – Aparato para validação do sistema de medição de pressão dinâmica.	114
Figura 6.14 – Curvas de pulsos de pressão para diversas pressões.	116
Figura 6.15 – Curvas de calibração do canal de pressão pelo método de pulsos.	117
Figura 6.16 – Curvas de calibração do canal de vibração.	118
Figura 6.17 – Aparato para validação do canal de vibração.	119
Figura 6.18 – Formas de onda coletadas pelo sistema LaPO em teste e pelo CSI 2117.	120
Figura 6.19 – Desgastes nos obturadores das válvulas de descarga.	123
Figura 6.20 – Quantificação dos desgastes nos obturadores das válvulas de descarga.	124
Figura 6.21 – Alterações das curvas devido à variação de temperatura no sensor.	126
Figura 6.22 – Curvas sobrepostas após controle de temperatura do sensor.	127
Figura 6.23 – Distorção das curvas devido à baixa prioridade no Windows.	128
Figura 6.24 – Alterações das curvas devido à baixa prioridade no Windows.	129
Figura 6.25 – Desenho dimensional da biela.	130

CAPÍTULO 7

Figura 7.1 – Forma de onda da pressão dinâmica medida na descarga do compressor.	133
Figura 7.2 – Espectro da pressão dinâmica medida na descarga do compressor.	134
Figura 7.3 – Forma de onda da pressão dinâmica medida no cilindro do compressor e função seno de mesma amplitude e frequência.	135
Figura 7.4 – Espectro da pressão dinâmica medida no cilindro.	136
Figura 7.5 – Curvas P x D não corrigidas com diferentes pressões de descarga.	138
Figura 7.6 – Curvas P x D corrigidas com diferentes pressões de descarga.	140
Figura 7.7 – Curvas P x D para diferentes válvulas.	144

Figura 7.8 – Curvas Log P x Log D para diferentes válvulas.	145
Figura 7.9 – Graf. polar de vibração acima de 1kHz utilizando válvula V0 e biela B0.	153
Figura 7.10 – Graf. de envoltória de vibração acima de 1kHz utilizando válvula V0 e biela B0.	154
Figura 7.11 – Graf.o polar de vibração acima de 1kHz utilizando válvula V0 e biela B1.	155
Figura 7.12 – Graf. de envoltória de vibração acima de 1kHz utilizando válvula V0 e biela B1.	157
Figura 7.13 – Graf. polar de vibração acima de 1kHz utilizando válvula V0 e biela B2.	158
Figura 7.14 – Graf. de envoltória de vibração acima de 1kHz utilizando válvula V0 e biela B2.	160
Figura 7.15 – Graf. polar de vibração acima de 1kHz utilizando válvula V1 e biela B0.	161
Figura 7.16 – Graf. de envoltória de vibração acima de 1kHz utilizando válvula V1 e biela B0.	163
Figura 7.17 – Gráfico de envoltória de média de vibração acima de 1kHz utilizando válvula V0 e bielas B0, B1 e B2.	164
Figura 7.18 – Gráfico de envoltória de média de vibração acima de 1kHz utilizando válvulas V0 e V1 com biela B0.	165
Figura 7.19 – Gráfico de envoltória de média de vibração acima de 1kHz utilizando válvula V0 com biela B0 e válvula V1 com bielas B1 e B2.	166
Figura 7.20 – Valores das áreas sob as envoltórias em função da folga da biela para válvulas V0 e V1.	167

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 - Sintomas de defeitos em válvulas de sucção.	36
Tabela 2.2 - Sintomas de defeitos em válvulas de sucção.	37
Tabela 2.3 - Sintomas de defeitos em válvulas de descarga.	38
Tabela 2.4 - Sintomas de defeitos em válvulas de descarga.	39
Tabela 2.5 - Sintomas de defeitos em anéis do pistão.	40
Tabela 2.6 - Sintomas de defeitos em anéis do pistão.	41
Tabela 2.7 – Outros parâmetros de análise.	42
Tabela 2.8 – Defeitos analisados por vibração.	43

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1 – Resumo dos tipos de ADCs .	61
---	----

CAPÍTULO 5

Tabela 5.1 – Características do sensor 111A23.	77
Tabela 5.2 – Características do sensor 786 F.	81
Tabela 5.3 – Características do sensor ROS-5P.	82
Tabela 5.4 – Características do Minipa ET-2070.	84
Tabela 5.5 – Características do Manômetro Classe B.	85

CAPÍTULO 6

Tabela 6.1 – Valores RMS de aceleração.	121
Tabela 6.2 – Dados dimensionais do diâmetro d1 (lado do eixo).	130
Tabela 6.3 – Dados dimensionais do diâmetro d2 (lado do pistão).	131

CAPÍTULO 7

Tabela 7.1 – Dados obtidos diretamente e calculados a partir das curvas P x D sem correção, para diversas pressões de descarga.	139
Tabela 7.2 – Coeficientes da equação de ajuste das curvas para diversas pressões de descarga.	141

Tabela 7.3 – Parâmetros para avaliação de performance, calculados segundo a metodologia descrita a seguir.	146
Tabela 7.4 – Gráficos polares de vibração acima de 1kHz para diferentes bielas (B0, B1 e B2).	152