UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA E INFORMÁTICA

Medidores de Distância por
Triangulação a Laser

Mário Antonio Stefani

Tese apresentada ao Instituto de Física
de São Carlos, Universidade de São Pau-
lo para a obtenção do título de Doutor
em Ciências Física Aplicada-opção Físi-
ca Computacional.

Orientador: Prof.Dr. Jarbas Caiado de Castro Neto

São Carlos - São Paulo

1995

**UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO**
Instituto de Física de São Carlos

Av. Dr. Carlos Botelho, 1465
CEP 13560-250 - São Carlos - SP
Brasil

C:\WINWORD\WLA\OFDEFD.DOC

Fone (0162) 72-6222
Fax (0162) 72-2218

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA TESE DE DOUTORADO DE MÁRIO
ANTONIO STEFANI APRESENTADA AO INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS,
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 20/09/1995.

COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. Jarbas Caiado de Castro Neto

Prof. Dr. Jan Frans Willem Slaets

Prof. Dr. Sérgio Carlos Zilio

Prof. Dr. Nilson Dias Vieira Junior

Prof. Dr. Luiz Carlos Moura Miranda

Aos meus Pais, Irmã e
À Tê.

Agradecimentos:

Ao Prof. Dr Jarbas Castro pela orientação.

Ao Sr. José Otoboni pelos desenhos e diagramas.

Ao Sr Moisés Satilio pelos ensaios e calibrações.

Ao Eng. Renaldo Massini pelas sugestões e críticas.

A Srta. Fátima Yasuoka pelo auxílio com o programa CODE-V do IFSC-USP.

Aos membros do Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento, especialmente ao Sr. Saulo Bombonato, Eng Helerson Kemmer e Sr. Aparecido Arruda Sobrinho pelas valiosas contribuições.

Aos funcionários e diretores da OPTOELETRONICA S/A que de várias formas permitiram a realização deste trabalho.

Ao CNPQ, Programa RHAE pelos programas de aperfeiçoamento profissional em âmbito industrial.

E um agradecimento especial à D. Natalina, e à Tê cujo apoio, carinho e paciência foram fundamentais ao bom termo deste trabalho.

Sumário

1. Introdução	1
1.1 Justificativa.....	1
1.2 Organização do Trabalho	1
2. Princípio de Funcionamento	3
2.1 Introdução	3
2.2 Os Métodos de Medição de Distância	6
2.2.1 Medidor de Distância por Telemetria de Pulsos.....	6
2.2.2 Medidor de Distância por Comparação de Fase.....	9
2.2.3 Medidor de Distância Interferométrico	11
2.3 Métodos de Medição de Distância por Triangulação	15
2.3.1 Triangulação por Feixe Normal	16
2.3.2 Triangulação por Feixe Oblíquo	19
2.3.3 Triangulação por Feixe Móvel	21
3. Tecnologia dos Medidores	22
3.1 Sistema iluminador.....	22
3.1.1 O Laser semiconductor	23
3.1.2 O Laser de Hélio-Neônio.	41
3.1.3 Outras fontes luminosas	44
3.1.4 Quadro resumo das características dos Sistemas Iluminadores.....	44
3.2 Sistema Captador.....	46
3.2.1 Aberração Esférica.....	46
3.2.2 Aberração Coma.....	48
3.2.3 Curvatura de Campo	49
3.2.4 Astigmatismo	50
3.2.5 Distorção	51
3.2.6 Aberração Cromática Axial e Lateral.....	51
3.2.7 Influência da Geometria das Lentes nas Aberrações.....	53
3.2.8 Resolução Limite	55
3.2.9 Requisitos para o Desenho da Lente Captadora para os Medidores de Distância.....	57
3.2.10 Desenho de Lentes Destinadas a Medidores de Distância	59
3.3 Sensores Ópticos	61
3.3.1 Os Fotodetectores de Silício, ou Fotodiodos.....	61
3.3.2 Os Sensores de Quadrante.....	75
3.3.3 Sensores de Posição Lineares, ou Fotodiodos de Efeito Lateral	80
3.3.4 Rede de Detectores, Sensores CCD.....	92
3.3.5 Comparação entre Sensores	105
3.4 Radiometria e Influências das Superfícies.....	108
3.4.1 Noções Básicas.....	108
3.4.2 A Equação de Ligação	110
3.4.3 A Refletância Direcional de Algumas Superfícies Típicas	113
3.4.4 O Efeito do Granulado Óptico e da Rugosidade Superficial.....	116
3.4.5 Algumas Técnicas de Redução do Efeito “Speckle” e da Rugosidade Superficial.....	121
4. Projeto de Medidores de Distância por Triangulação	124
4.1 Projeto de um Medidor : O MD50	124
4.1.1 Introdução	124
4.1.2 Projeto da Cabeça Medidora	125
4.1.3 Projeto Eletrônico.....	134
4.1.4 Programa de Controle	140
4.1.5 Processo de Calibração.....	144

4.1.6 Resultados Obtidos.....	148
4.1.7 Descrição da Aplicação.....	152
4.1.8 Conclusões.....	157
4.2 Projeto de um Medidor: O MD250.....	158
4.2.1 Introdução e Requisitos.....	158
4.2.2 Projeto da Cabeça Medidora.....	160
4.2.3 Projeto Eletrônico.....	161
4.2.4 Resultados obtidos e conclusões.....	162
4.3 Comparação com alguns medidores Comerciais.....	164
5. Cultura de Utilização.....	166
5.1 Alguns Métodos Alternativos.....	166
5.1.1 Sensores Indutivos.....	166
5.1.2 Sensores Capacitivos.....	168
5.1.3 Sensores Ultra-sônicos.....	169
5.1.4 Comparação entre os Métodos de Medição sem Contato.....	170
5.1.5 Resumo das Características.....	172
5.2 Regras de Boa Utilização.....	173
5.3 Aplicações dos Medidores a Triangulação Óptica.....	176
5.3.1 Controle de Espessura de Placas Metálicas I.....	176
5.3.2 Controle de Espessura de Chapas Metálicas.....	177
5.3.3 Controle de Espessura de Pós Bimetálicos.....	178
5.3.4 Seleção de Chapas Metálicas por Espessura.....	179
5.3.5 Controle de Nível de Purga em Fornos de Fundição.....	180
5.3.6 Determinação da Centralização de Toras de Madeira.....	180
5.3.7 Controle de Espessura de Lâminas de Madeira.....	181
5.3.8 Controle de Espessura de Mantas de Borracha.....	182
5.3.9 Levantamento de Perfil de Bandas de Borracha.....	182
5.3.10 Medição e Controle de Espessura de Plásticos.....	183
5.3.11 Verificações de Super-Alimentação de Prensas Automáticas.....	184
5.3.12 Verificação do Posicionamento de Peças em Máquinas Automáticas.....	184
5.3.13 Verificação de Montagem de Peças.....	185
5.3.14 Medição de Variação da Posição ou Dimensão de uma Peça em Ambiente Agressivo.....	185
5.3.15 Verificação de Selagem de Embalagens.....	186
5.3.16 Controle de Dimensões Durante Usinagem de Peça.....	187
5.3.17 Medição e Controle em Moinhos.....	187
5.3.18 Medição de Espessura de Mantas Fibrocimento.....	188
5.3.19 Medição de Papel Ondulado.....	189
6. Conclusão.....	190
7. Bibliografia.....	192
8. APÊNDICES.....	196
8.1 APÊNDICE I - Programa MathCAD para Ante-Projeto Geométrico de um Medidor de Distância : MD50.....	197
8.2 APÊNDICE II - Programa MathCAD para Calibração de um Medidor de Distância : MD50.....	198
8.3 APÊNDICE III - Programa MathCAD para Ensaio de Refletância Direcional Difusa.....	199
8.4 APÊNDICE IV - Ensaio de Refletância Direcional Difusa de Alguns Materiais.....	200
8.5 APÊNDICE V - Listagem das Características Ópticas da Lente do Medidor MD50, conforme programa CODE V.....	206
8.6 APÊNDICE VI - Diagramas dos Circuitos Eletrônicos do Medidor MD50.....	207
8.7 APÊNDICE VII - Listagem do Programa de Controle do Medidor de Distância : MD50.....	208

Lista de Figuras

Figura 2.1-1) Sensor de Posição Proposto por WALLMARK, (1957)	4
Figura 2.1-2) Medidor de Espessura Proposto por KERR (1969), Usando Sensor Óptico Codificado.....	4
Figura 2.1-3) Medidor de Distância por Triangulação Laser, conforme LASIEWICS, 1974.....	5
Figura 2.2-1) Diagrama de Blocos de um Medidor de Distância por Telemetria de Pulsos	7
Figura 2.2-2) Método de Validação dos Pulsos de Retorno	8
Figura 2.2-3) Método do Histograma para Validação da Distância	8
Figura 2.2-4) Medidor de Distância por Comparação de Fase	9
Figura 2.2-5) Medidor de Distância por Comparação de Fase Transportada	11
Figura 2.2-6) O Interferômetro de Michelson	12
Figura 2.2-7) Interferômetro Usando Lasers	14
Figura 2.3-1) Diagrama Esquemático de um Medidor de Distância por Triangulação Óptica Genérico.....	15
Figura 2.3-2) Esquema Geral de um Medidor de Distância por Triangulação	15
Figura 2.3-3) Diagrama Trigonométrico do MDT a Feixe Normal	16
Figura 2.3-4) MDT Usando Feixe Oblíquo	19
Figura 2.3-5) MDT com Feixe Oblíquo, Linearizado	19
Figura 2.3-6) Medição de Espessura de Materiais Transparentes.	20
Figura 2.3-7) MDT por Triangulação Usando Espelho Móvel	21
Figura 3.1-1) Diagrama Esquemático de um Laser Semicondutor.....	23
Figura 3.1-2) Estruturas Internas de Lasers Semicondutores Visíveis	24
Figura 3.1-3) Curva Característica Potência X Corrente para Laser Toshiba TOLD9211	25
Figura 3.1-4) Divergência Típica de Diodo Laser TOLD9211, a 25°C e 4mW	25
Figura 3.1-5) Colimador Típico para Laser Semicondutor, 06GLC001 da MELLES GRIOT.....	26
Figura 3.1-6) Colimador de Grande Desempenho.....	26
Figura 3.1-7) Lente Colimadora Asférica C240TB da THOR LABS.....	27
Figura 3.1-8) Colimação de um Feixe Laser	28
Figura 3.1-9) Espectro de Emissão de Lasers Semicondutores de Estruturas Distintas	29
Figura 3.1-10) Suporte e Dissipador Típico para Laser Semicondutor	31
Figura 3.1-11) Controle de Temperatura de um Laser Usando Célula de Peltier.....	31
Figura 3.1-12) Efeito de Surto de Corrente devido à Descarga Eletrostática.....	32
Figura 3.1-13) Sintomas Típicos de Degradação de Diodos Lasers. FFP: “ Far Field Pattern”, Perfil do Feixe a uma Distância Conveniente	33
Figura 3.1-14) Formas de Chaveamento de Corrente, Ocorrendo Sobre-oscilação no Laser	34
Figura 3.1-15) Sobrecarga em Diodos Laser devido a Sobre-oscilações.	35
Figura 3.1-16) Redução do Ponto de Operação para Suportar Efeitos de Sobre-oscilações	35
Figura 3.1-17) Uso de Diodo Schottky para Proteção	36
Figura 3.1-18) Encapsulamento Conjunto de Diodo Laser e Fotodiodo Monitor	36
Figura 3.1-19) Curva Característica do Diodo Laser TOLD9211 Toshiba	37
Figura 3.1-20) Exemplo de Circuito de Controle Diodo Laser (CW)	37
Figura 3.1-21) Modulação em Diodos Lasers	38
Figura 3.1-22) Esquema de Fonte para Diodo Laser Operando em Regime AC	38
Figura 3.1-23) Método de Controle para Lasers Pulsados	39
Figura 3.1-24) Curva de Corrente em Fontes Pulsadas	39
Figura 3.1-25) Aspecto de um Laser de HeNe	41
Figura 3.1-26) Modos Transversais Eletromagnéticos Possíveis em uma Cavidade Laser.....	42
Figura 3.1-27) Comportamento Tensão X Corrente de um Laser HeNe.....	42
Figura 3.1-28) Uso do Resistor de Lastro para Estabilizar a Descarga	42
Figura 3.1-29) Comportamento Óptico versus Corrente de Operação	43
Figura 3.2-1) Aberração Esférica Longitudinal e Transversal.....	47
Figura 3.2-2) Aberração Coma.....	48
Figura 3.2-3) Uso dos Limitadores de Campo para Redução da Aberração Coma.....	49
Figura 3.2-4) Curvatura da Superfície Focal	50
Figura 3.2-5) Esquema do Astigmatismo	50
Figura 3.2-6) Distorção Óptica.....	51
Figura 3.2-7) Aberração Cromática Axial e Lateral	52

Figura 3.2-8) Efeito do Fator de Curvatura de uma Lente na Aberração Esférica, Mantida uma Mesma Distância Focal Global, para Conjugado Infinito.....	54
Figura 3.2-9) Efeito da Curvatura de uma Lente no Astigmatismo, Distorção e Curvatura de Campo, para Conjugado Infinito	54
Figura 3.2-10) Espalhamento da Imagem de um Ponto	55
Figura 3.2-11) Resolução Limite.....	56
Figura 3.2-12) O Conceito da Função Transferência de Modulação.....	57
Figura 3.2-13) Aspecto de Algumas Geometrias de Lentes Típicas	60
Figura 3.3-1) Estrutura Básica de um Fotodiodo por Difusão Planar	62
Figura 3.3-2) Estrutura Básica de um Fotodiodo por Barreira de Schottky	62
Figura 3.3-3) Curva de Sensibilidade Espectral Normalizada de Fotodiodos de Silício	63
Figura 3.3-4) Circuito Equivalente a um Fotodiodo.....	64
Figura 3.3-5) Circuito Equivalente das Fontes de Ruído num Fotodiodo	65
Figura 3.3-6) Circuito Amplificador de Fotodiodo no Modo Fotocondutivo	68
Figura 3.3-7) Circuito Amplificador de Fotodiodo no Modo Fotovoltáico.....	69
Figura 3.3-8) Esquema Típico de um Sensor de Presença	70
Figura 3.3-9) Sensor de Presença Usando Máscara.....	70
Figura 3.3-10) Ação da Máscara num Sensor de Presença	71
Figura 3.3-11) Apalpador por Fibras Ópticas.....	72
Figura 3.3-12) Amplificação para Fotodiodo de Avalanche	73
Figura 3.3-13) Razão Sinal/Ruído para um Sensor de Avalanche	74
Figura 3.3-14) Sensores de Quadrante	75
Figura 3.3-15) Curva-Resposta de um Sensor de 2 Hemisférios, ao Movimento de um Foco Incidente de Luz ("spot") de 0,1 polegadas	76
Figura 3.3-16) Circuito Típico de Amplificação e Determinação da Posição	77
Figura 3.3-17) Esquema de um Apalpador Óptico.....	78
Figura 3.3-18) Medidor de Distância por Deflexão de Feixe.....	78
Figura 3.3-19) Estruturas Típicas dos Fotodiodos de Efeito Lateral.....	80
Figura 3.3-20) Correntes Laterais e Erro de Detecção de um Sensor Hamamatsu S3274	82
Figura 3.3-21) Circuito Equivalente a um Sensor por Efeito Lateral.....	83
Figura 3.3-22) Circuito Equivalente para Estimativa de Ruído.....	84
Figura 3.3-23) Erro de Linearidade num Fotodiodo de Efeito Lateral.....	87
Figura 3.3-24) Circuito Básico de Amplificação de um Sensor de Posição	88
Figura 3.3-25) Circuito de Amplificação de um Sensor de Posição Linear, Usando Fonte Luminosa Pulsada	89
Figura 3.3-26) Ação do Circuito Amostrador Síncrono	89
Figura 3.3-27) Amplificação com Retificação Síncrona	90
Figura 3.3-28) Estrutura Típica de um Sensor à Rede de Fotodiodos.....	92
Figura 3.3-29) Estrutura Básica de um Dispositivo Acoplado por Carga, CCD	93
Figura 3.3-30) Esquema de Funcionamento de um CCD.....	94
Figura 3.3-31) Circuito Equivalente da Região Fotosensível de um Sensor de Imagem CCD	95
Figura 3.3-32) Sensibilidade Espectral de um CCD, TCD142D	95
Figura 3.3-33) Estrutura do CCD e seus Sinais de Comandos Básicos.....	96
Figura 3.3-34) Estágio de Saída de um Sensor CCD.....	96
Figura 3.3-35) Diagrama Temporal de Controle Típico de um CCD.....	97
Figura 3.3-36) Sensibilidade de um Sensor CCD.....	98
Figura 3.3-37) Aspecto da Curva-Resposta Típica de um CCD, Tensão de Saída versus Irradiância Aplicada	98
Figura 3.3-38) O Sinal de Escuro e seu Comportamento Térmico.....	99
Figura 3.3-39) Relação entre o Sinal de Escuro e o Tempo de Integração.....	100
Figura 3.3-40) Eficiência de Transferência entre Células de um CCD	101
Figura 3.3-41) Contraste do Sinal em Função do Contraste da Imagem	101
Figura 3.3-42) Efeito do MTF no Sinal de Saída	102
Figura 3.3-43) Curva MTF de um Sensor CCD TCD142D da Toshiba.....	103
Figura 3.4-1) Diagrama Radiométrico dos Medidores de Distância	108
Figura 3.4-2) Reflexão Especular.....	109
Figura 3.4-3) Refletância Difusa	109
Figura 3.4-4) Refletância Mista.....	109

Figura 3.4-5) Modelo de Superfície Lambertiana	110
Figura 3.4-6) Estudo Radiométrico de um Medidor de Distância	110
Figura 3.4-7) O Refleto-Goniômetro usado nos Ensaio de Refletância Direcional.....	113
Figura 3.4-8) Refletância Direcional de Alguns Materiais.....	114
Figura 3.4-9) Aspecto Ampliado do Efeito do Granulado Óptico numa Superfície Rugosa	116
Figura 3.4-10) Origem do Efeito do Granulado em um Sistema Óptico.....	116
Figura 3.4-11) Determinantes do Tamanho do Granulado Óptico	117
Figura 3.4-12) Relação entre a Rugosidade, Coerência da Iluminação e o Contraste do Granulado Óptico.....	119
Figura 3.4-13) Relação entre a Variação do Contraste do Padrão de Speckle e a Rugosidade de uma Amostra Metálica, Iluminada por Fonte de Coerência $\sim 0,0015\text{mm}$, $\lambda=500\text{nm}$, segundo SPRAGUE apud DAINTY (1975).....	120
Figura 3.4-14) Integração do Speckle via Abertura Móvel	122
Figura 3.4-15) Integrador de Speckle e Rugosidade no Medidor Mitutoyo L548	122
Figura 3.4-16) Artificio de Filtragem da Imagem Captada por um Sensor CCD	123
Figura 4.1-1) Refletividade Direcional do Material Usado nas Longarinas	130
Figura 4.1-2) Lente Captadora Adotada para o Medidor MD50	130
Figura 4.1-3) Geometria do Sistema a ser Analisado pelo Programa CODE-V de Cálculo Óptico....	130
Figura 4.1-4) Estimativa do “Spot” sobre o Sensor de Imagem, como Previsto pelo Programa CODE-V.....	131
Figura 4.1-5) Esboço da Cabeça Medidora MD50	132
Figura 4.1-6) Mesa Posicionadora de Sensor de Imagem	133
Figura 4.1-7) Aspecto do Sensor Toshiba TCD142D, Utilizado no MD50	134
Figura 4.1-8) Diagrama de Blocos do Sistema Eletrônico do Medidor MD50	134
Figura 4.1-9) Diagrama em Blocos do Sistema de Controle do CCD	135
Figura 4.1-10) Diagrama de Tempo e Controle do CCD Toshiba TCD142D.....	136
Figura 4.1-11) Os sinais VALID e DOT	136
Figura 4.1-12) Diagrama em Blocos do Sistema Amplificador	137
Figura 4.1-13) Sinais de Comando e Imagem do CCD	137
Figura 4.1-14) Forma do Sinal de Saída do CCD.....	138
Figura 4.1-15) Amostragem e Retenção do Sinal Pulsado de Vídeo.....	138
Figura 4.1-16) Filtragem do Sinal Amostrado para Diminuição do Efeito da Rugosidade.....	139
Figura 4.1-17) Diagrama em Blocos do Controle de Potência do Laser	139
Figura 4.1-18) Método de Captação da Posição da Imagem	140
Figura 4.1-19) Captação da Largura da Imagem.....	141
Figura 4.1-20) Efeito da Rugosidade na Imagem Captada.....	142
Figura 4.1-21) Monitoramento da Potência Óptica Captada	143
Figura 4.1-22) Dispositivo de Calibração da Cabeça Medidora MD50	145
Figura 4.1-23) Cintura do Feixe Laser ao longo do campo de medida , usando Colimador Asférico AP4545 da DIVERSE OPTICS INC , e também um Triplete Esférico de baixo custo, 06GLC002 da MELLE GRIOT	146
Figura 4.1-24) Verificação dos Sinais VALID, ANA no Alinhamento do Sensor de Imagem.....	146
Figura 4.1-25) Ajuste da Origem do Campo de Medição	147
Figura 4.1-26) Curva de Calibração do Medidor MD50 nº de série 014, Usando Parafuso Micrométrico com Acurácia Melhor que $\pm 0,01\text{mm}$ e Superfície Branca Fosca.	148
Figura 4.1-27) Curva Resultado da Acurácia Média.....	149
Figura 4.1-28) Curva de Calibração do Medidor MD50 série 005, considerado “ruim” devido a problemas construtivos ocorridos na óptica de captação.	149
Figura 4.1-29) O mesmo medidor “ruim”, MD50 número de série 005 , calibrado segundo um polinomio interpolador de Grau 5	150
Figura 4.1-30) Acurácia do Equipamento, com o Filtro Suavizador Ligado , Medindo uma Manta de Borracha Fosca. Média de 5 calibrações.....	151
Figura 4.1-31) Acurácia do Equipamento, com o Filtro Suavizador Desligado , Medindo uma Manta de Borracha Fosca. Média de 5 calibrações.....	151
Figura 4.1-32) Esquema de uma Puncionadeira CNC para Fabricação de Longarinas de Caminhões	153
Figura 4.1-33) Posicionamento dos Medidores de Distância na Puncionadeira CNC e seu Uso na Detecção das Deformações das Longarinas	154
Figura 4.1-34) Diagrama Físico da Rede de Medidores.....	155

Figura 4.1-35) Caixas IP54 do Medidor MD50	156
Figura 4.2-1) Uso do Medidor MD250 no Controle de Nível de Sabão em Pó	159
Figura 4.2-2) Posicionamento da Cabeça Medidora com Relação à Caixa	159
Figura 4.2-3) Lente Captadora Adotada para o Medidor MD250	160
Figura 4.2-4) Diagrama de Controle do Medidor através de 2 Processadores	161
Figura 4.2-5) Levantamento da Topografia Média	161
Figura 4.2-6) Curva de Calibração Obtida para o MD250, nº 22, Usando Régua Micrométrica com Acurácia Melhor que 0,01mm, em Superfície Branca Fosca	162
Figura 5.1-1) Sensor Indutivo por Corrente Parasita	166
Figura 5.1-2) Sensor Indutivo por Relutância Variável	167
Figura 5.1-3) Sensor Capacitivo	168
Figura 5.1-4) Sensor Capacitivo na Medição de Espessuras de Materiais não Condutores	168
Figura 5.1-5) Sensor Ultra-sônico	169
Figura 5.2-1) Posicionamento de uma Cabeça Medidora com Relação a Fachos Luminosos Potentes	173
Figura 5.2-2) Orientação da Cabeça Medidora e seu Feixe Iluminador em Relação à Normal da Superfície.	174
Figura 5.2-3) Posicionamento Ideal da Cabeça com Relação à Desníveis	175
Figura 5.2-4) Posicionamento da Cabeça com Relação à Superfícies em Revolução	175
Figura 5.2-5) Posicionamento da Cabeça com Relação a Regiões de Albedo Altamente Diferenciado	176
Figura 5.3-1) Controle de Espessura de Placas de Alumínio	177
Figura 5.3-2) Medição de Espessura de Chapas Laminadas	177
Figura 5.3-3) Medição de Espessura de Camadas de Pós na Fabricação de Bimetais	178
Figura 5.3-4) Seleção de Espessuras de Chapas em Guilhotinas Automáticas	179
Figura 5.3-5) Controle de Purga do Forno em Fundições	180
Figura 5.3-6) Mapeamento de Toras para Laminados	181
Figura 5.3-7) Controle de Espessura de Laminados de Madeira	181
Figura 5.3-8) Medição de Espessura de Borracha durante o Processo de Calandragem	182
Figura 5.3-9) Levantamento do Perfil de Bandas de Borracha na Fabricação de Pneus	183
Figura 5.3-10) Controle de Espessura de Peças Plásticas Extrudadas	183
Figura 5.3-11) Controle de Sobre-Alimentação de Prensas Automáticas	184
Figura 5.3-12) Verificador de Posicionamento em Robôs	184
Figura 5.3-13) Verificação de Montagem de Peças	185
Figura 5.3-14) Verificação de Peças em Ambientes Agressivos	186
Figura 5.3-15) Verificação de Selagem de Embalagens a Vácuo	186
Figura 5.3-16) Controle de Dimensão de Peças durante Operação de Usinagem	187
Figura 5.3-17) Controle de Posição dos Rolos Moinhos	188
Figura 5.3-18) Controle de Espessura de Mantas de Fibrocimento	188
Figura 5.3-19) Controle de Espessura de Papelão Ondulado	189

Lista de Tabelas

Tabela 2.2-1) Comprimento de Coerência de Alguns Lasers	13
Tabela 3.1-1) Tensões Típicas Presentes Durante o Manuseio	34
Tabela 3.1-2) Características Típicas dos Sistemas Iluminadores	45
Tabela 3.2-1) Fator de Proporcionalidade entre a Geometria da Lente e as Aberrações Comuns	53
Tabela 3.3-1) Desempenho Típico de alguns Fotodiodos de Efeito Lateral da HAMAMATSU	86
Tabela 3.3-2) Comparação entre Sensores CCDs e Fotodiodos de Efeito Lateral na Utilização em Medidores de Distância	105
Tabela 4.1-1) Acurácia com e sem Filtro Suavizador para Diferentes Tipos de Superfície , em ordem crescente de Rugosidade R_a	152
Tabela 4.3-1) Comparativo entre alguns medidores por Triangulação Laser , segundo catálogos do fabricantes.	164
Tabela 5.1-1) Quadro Comparativo entre os Tipos de Medidores Sem Contato	172

Lista de Abreviaturas, Siglas

CCD	Charge Coupled Devices, sensor de imagem operando pelo princípio de carga acoplada.
D/A	Conversor Digital Analógico
DSP	Digital Signal Processor , micro-processador com arquitetura otimizada para manipulação de sinais
FEL	Fotodiodo de Efeito Lateral, sensor de posição de imagem linear.
FET	Field Effect Transistor, dispositivo semiconductor.
FIFO	First In, First Out, estrutura de dados comumente chamada pilha
LVDT	Linear Variable Diferencial Transformer, sensor indutivo de deslocamento, por contato
MDT	Medidor de Distância por Triangulação.
SCR	Silicon Controlled Rectifier, dispositivo semiconductor

Resumo

STEFANI, MARIO A. *Medidores de Distância por Triangulação a Laser*. Tese de Doutorado, Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995, 350 pag.

Os Medidores de Distância por Triangulação a Laser são sistemas optoeletrônicos destinados a medição de pequenas distâncias ou deslocamentos, sem contato físico direto. Estes equipamentos possuem um grande campo de aplicações industriais. Este trabalho descreve as diversas configurações que este equipamento pode se apresentar, discutindo suas vantagens relativas. São estudadas também as suas partes e os componentes mais indicados. O projeto detalhado de um medidor usando sensor tipo CCD, é apresentado. Algumas aplicações industriais deste modelo são relatadas, e diversos métodos e sugestões de uso são apresentadas, com base nas experiências realizadas pelo autor.

Palavras chaves: Laser, Medidores de Distância, Aplicações Industriais.

Abstract

STEFANI, MARIO A. *Laser Triangulation Rangefinders*. Doctoral Thesis, Instituto de Física de São Carlos Universidade de São Paulo. São Carlos, 1995, 350 pages (*in Portuguese*).

Laser Triangulation Rangefinders are non-contact, optoelectronic devices for measurement of small displacements or distances. These devices offer a broad range of industrial applications. This work explains common configurations, parts and main components, comparing their advantages. A detailed project on a CCD based Laser Rangefinder is presented. Some industrial applications for that project are related, discussing practical aspects based on author's experience. Some potential applications are also suggested.

Keywords: Laser, Rangefinders, Industrial Applications

1. Introdução

1.1 Justificativa

Como é possível medir a espessura de um material mole, deformável, estando este em movimento, sem que o processo de medida altere o seu valor? Como é possível, por exemplo, verificar as dimensões de uma peça em movimento, ao mesmo tempo em que está sendo trabalhada? Como verificar se um conjunto foi posicionado corretamente em relação a outro, estando ambos em movimento? Além destas situações, poderia-se enumerar uma série de casos em que as técnicas de medição já estabelecidas não se aplicam com a eficiência desejável. Por outro lado, já são de conhecimento, dito científico, uma série de técnicas que poderiam ser aplicadas, mas que, por diversas razões, ainda não o foram.

O advento dos Lasers no início da década de 60 permitiu o desenvolvimento de um grande número de aplicações em diferentes áreas, desde processos de usinagem de materiais até aplicações médicas, passando ainda por comunicações e entretenimento. Algumas destas aplicações já estão bem consolidadas, fazendo parte da “cultura” tecnológica do presente. Outras aplicações, no entanto, ainda não se consolidaram, ora pela inviabilidade econômica, ora pela necessidade de se criar tecnologia acessória, ou mesmo pela ausência de uma cultura de utilização.

Dentre estas possibilidades, a medição de Distância por Laser já era conhecida teoricamente há um bom tempo, sendo inicialmente destinada às aplicações militares, ou medições de alta precisão em laboratório. Desde cedo se especulou sobre possíveis aplicações industriais, através de métodos mais simples, principalmente em medições de espessuras e monitorização de posicionamento. Infelizmente, no entanto, até hoje sua utilização é pequena devido, em grande parte, a expectativa do desenvolvimento tecnológico de Lasers e componentes ópticos e eletrônicos que viabilizassem economicamente a produção e uso do equipamento. Também, não se deve desprezar um outro fator determinante, que é a ausência de uma retaguarda tecnológica na sua “cultura” de utilização.

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento e construção de uma configuração de medidor de distância que possa ser aplicado industrialmente, utilizando-se da disponibilidade de Lasers e de outros componentes de baixo custo. Também deverá ser estudada a viabilidade de sua aplicação em algumas áreas, de modo a criar uma “retaguarda tecnológica”, que permita num futuro próximo popularizar a utilização deste tipo de equipamento.

1.2 Organização do Trabalho

O desenvolvimento e construção de alguns modelos de Medidores de Distância utilizando tecnologia Laser, principalmente aqueles cujas características viabilizem seu uso industrial, é o objeto desse trabalho. Apresenta-se inicialmente uma introdução histórica, descrevendo-se desde as primeiras idéias e aplicações pioneiras, até o aparecimento dos primeiros modelos comerciais.

Uma descrição teórica do funcionamento dos principais métodos de medição de distância é também apresentada, onde se procurou verificar as principais implicações e vantagens relativas. Uma ênfase maior foi dada ao método de Triangulação, por ser este em suas formas simplificadas, o mais popular e o que reúne uma boa combinação de desempenho e simplicidade. Também por esses motivos foi o método escolhido para desenvolvimento e aplicação neste trabalho.

A seguir são discutidos os fundamentos tecnológicos para um projeto de Medidor de Distância, onde os principais componentes são descritos. Procurou-se estudar as vantagens e implicações no sistema global, visando orientar um eventual projetista no desenho de um medidor específico. Paralelamente, um projeto de um Medidor por Triangulação usando Laser tipo Semicondutor e Sensor tipo CCD, é detalhadamente descrito, relatando -se também a sua utilização pelo autor em algumas aplicações.

Algumas aplicações são expostas com detalhes, relatando-se a experiência obtida no chamado “chão de fábrica” em processos industriais. Observações foram assim realizadas, possibilitando a obtenção de conclusões, a respeito da relevância do uso dos Medidores de Distâncias, principalmente nos aspectos de produtividade e/ou qualidade. Como produto desta experiência são descritas uma série de regras práticas, auxiliares no bom uso deste tipo de medidor. Tais regras objetivam criar a cultura de utilização necessária para aumentar o conjunto de usuários e a taxa de utilização bem sucedida. Uma série de aplicações possíveis também são descritas e sugeridas, para futura continuidade do trabalho.

2. Princípio de Funcionamento

2.1 Introdução

Não é fácil fornecer um histórico dos métodos ou técnicas passadas, que resultaram nos modernos métodos de medição sem contato utilizando Laser para uso industrial. O aparecimento destes dispositivos foi resultado de uma série contribuições isoladas, motivadas por necessidades específicas, aliadas a métodos seculares de avaliação de distâncias e deslocamentos.

A medição da distância até um ponto inacessível, sempre aguçou a imaginação de diversos pensadores, sendo a Trigonometria consequência disto. Durante toda a história, sempre houve interesse na medição de distâncias, quase sempre por necessidades militares. Cartógrafos e navegantes sempre foram os principais usuários e depositários destas técnicas seculares; também os primeiros construtores, nos primórdios da engenharia, as utilizavam na construção de pontes, muralhas e outros edifícios.

Os telêmetros, ou distanciômetros, são os aparelhos destinados a medição de distância até um ponto inacessível por intermédio de processos ópticos ou eletrônicos. Os primeiros telêmetros ópticos eram baseados em métodos trigonométricos, sendo o processo normalmente chamado de “triangulação”. Estabelecido um lado como base conhecida, mede-se os ângulos relativos a um ponto desejado, calculando-se os outros lados do triângulo assim formado. Na referência KINGSLAKE (1983) são descritos vários telêmetros ópticos baseados neste princípio.

Já os Telêmetros Laser surgiram no início da década de 60, a partir da utilização das propriedades notáveis, recém descobertas, relacionadas a estes dispositivos. O primeiro sistema Laser para medição de distância surgiu em 1963, nos EUA, para aplicações militares, com o uso da técnica de telemetria por pulsos num Laser de Rubi, segundo MAILLET (1987). Esta técnica foi bastante estudada, por ser descendente das tecnologias já aplicadas em Radares. Durante o programa Apollo, um telêmetro deste tipo mediu a distância Terra-Lua com acurácia de 0.15 metros, causando sensação, segundo WILSON E HAWKES (1987). Infelizmente esta técnica é relativamente cara e complexa, não tendo alcançado uso industrial significativo. Outras técnicas, como a interferométrica, são também conhecidas há muitos anos, encontrando o Laser aplicação natural, porém com utilização restrita à medição de pequenos deslocamentos, com o auxílio de superfícies especiais.

A primeira menção da possibilidade de medição de pequenas distâncias por triangulação através de meios ópticos e eletrônicos parece ter sido realizada por WALLMARK (1957), ao descrever um novo tipo de sensor semiconductor. Este sensor, chamado de Fotodiodo de Efeito Lateral, permitia a determinação da posição de um ponto luminoso incidente sobre a sua superfície. Neste artigo o autor já relatava e discutia as acurácias máximas e outras possibilidades de manipulação deste sensor.

Figura 2.1-1) Sensor de Posição Proposto por WALLMARK, (1957)

No entanto, a primeira descrição de um medidor de distância por triangulação usando Laser, somente apareceu em KERR (1969). Num curto artigo, o autor descreve um sistema destinado à medição de espessura de placas de madeira, por intermédio de 4 Lasers dispostos à medição por triangulação. Cada laser forma um medidor de distância junto com um sensor dedicado. O sensor utilizado consistia em uma série de fotodiodos discretos agrupados convenientemente, possibilitando, através da verificação conjunta de quais estavam sendo iluminados pela imagem, a determinação da distância aproximada. Uma lente cilíndrica no caminho óptico produzia uma ligeira deformação na imagem, permitindo que a incidência sobre os sensores codificassem sua posição.

Figura 2.1-2) Medidor de Espessura Proposto por KERR (1969), Usando Sensor Óptico Codificado.

Já no início da década de 70, várias propostas de medição por triangulação Laser são encontradas na literatura. LASIEWICS (1974) descreve um medidor destinado à determinação de espessura de placas de alumínio. O medidor era composto de um Laser fixo, e de um sensor de dois hemisférios (ou quadrantes) presos a uma rosca motorizada. A eletrônica de controle consistia em acionar o motor da rosca de forma a manter a imagem igualmente distribuída entre os dois hemisférios (ou quadrantes) do sensor. Pelo número de voltas (ou passos) dados no motor era possível determinar a dimensão de um braço do triângulo formado entre o sensor, o Laser e o alvo. Uma tabela fornecida ao usuário correlacionava com a distância e assim se obtinha a

espessura da placa. Logo em seguida, com o surgimento dos microprocessadores, este sistema se tornou semi-autônomo, sendo utilizado com sucesso, de acordo com LASIEWICS (1976).

Figura 2.1-3) Medidor de Distância por Triangulação Laser, conforme LASIEWICS, 1974

Com o início da fabricação de sensores de efeito lateral, no final da década de 60, começaram a surgir estudos de seu uso. Num artigo apresentado por KELLY e NEMHAUSER (1973) num Congresso de Máquinas-Ferramentas do IEEE em 1973, são descritas várias técnicas de utilização deste sensor.

Paralelamente, com a revolução da indústria de semicondutores, e a consequente redução de custos destes dispositivos, uma série de novas propostas são apresentadas, tais como sensores de presença, chaves fotoelétricas etc e, notadamente, os primeiros medidores por triangulação Laser disponíveis comercialmente. Nesta época surgem os primeiros fabricantes desta classe de equipamentos, e são documentadas suas aplicações em processos industriais. MAILLET (1987); LUXON E PARKER (1985).

2.2 Os Métodos de Medição de Distância

Existem diversos métodos para a estimativa de distância através de processos ópticos. Alguns destes, tais como o método de triangulação, são originários daqueles utilizados, há muitos séculos, por navegantes e cartógrafos. Outros métodos surgiram com o advento do Radar e do Laser, sendo que alguns destes apareceram a partir da tentativa de aproveitamento das características notáveis da luz Laser, tais como os métodos interferométricos. Para uma abordagem mais geral dos métodos ópticos recomenda-se as referências MAILLET (1987), LUXON e PARKER (1985) e KINGSLAKE (1983).

Na discussão que se segue, apresenta-se uma pequena introdução aos métodos de medição de distância, procurando enfatizar aqueles métodos que possuam capacidade de aplicações industriais. Os métodos enfatizados se referem àqueles cujas superfícies-alvo não necessitam de nenhum tratamento especial, ou o uso de elementos auxiliares como espelhos e prismas retro-refletores.

2.2.1 Medidor de Distância por Telemetria de Pulsos

Este método é derivado direto do processo mais conhecido como Radar. Neste método um pulso curto de luz Laser é enviado para o alvo. A luz refletida pelo alvo é captada, registrando-se o tempo decorrido de ida e volta. Este processo é conhecido também pelo nome de "LIDAR", do termo "light detection and ranging". A maior vantagem deste método com relação ao seu precursor, o Radar, reside no fato da luz Laser possuir uma grande "diretividade". Diretividade é o termo correspondente à "capacidade de uma antena de concentrar energia em determinada direção"¹. Sua utilização permite, portanto, a medição da distância de pontos bem selecionados, sendo assim um candidato natural a vários tipos de aplicações, principalmente militares.

O sistema se constitui basicamente de um emissor Laser pulsado, normalmente um Laser de ND:YAG, CO₂ ou mesmo Semicondutor, e um telescópio para coletar a luz refletida. A luz coletada é transferida para um sensor óptico. O Diagrama de blocos típico é mostrado na Figura 2.2-1.

¹ Segundo Dicionário AURÉLIO ELETRÔNICO, versão 1.3 de julho, 1994.

Figura 2.2-1) Diagrama de Blocos de um Medidor de Distância por Telemetria de Pulsos

O Laser é disparado por um circuito de forma a produzir um pulso muito estreito, da ordem de 8 a 20ns. Este pulso de luz é condicionado opticamente de maneira a iluminar a região de interesse. Uma pequena fração do feixe é desviada para um detector de sincronismo.

A luz incide sobre o alvo e uma pequena parte retorna ao sistema, sendo coletada pela óptica de captação. A luz coletada incide sobre o sensor principal, cujo sinal é amplificado e condicionado.

O sinal proveniente do detector de sincronismo dispara um contador eletrônico, que é interrompido pelo sinal de retorno captado pelo sensor principal. Desta forma se obtém uma medida do tempo de percurso que está relacionado com a distância.

As principais peculiaridades deste método são:

- Como a velocidade de propagação é muito alta, o tempo decorrido é muito pequeno. Assim, uma grande precisão eletrônica é necessária aos relógios e contadores. A *resolução*² do equipamento é diretamente proporcional a largura do pulso e portanto, quanto mais estreito, melhor. Alguns autores, no entanto, sustentam que o pulso pode ser largo desde que o “tempo de subida” seja o menor possível, na ordem de 2 a 3 ns, permitindo melhor discriminação do momento da chegada do pulso. MAILLET (1987).
- Como a largura de pulso é estreita, os amplificadores do detector de sinal precisam apresentar respostas rápidas. Desta forma a banda de passagem se torna larga, da ordem de 100MHz, e conseqüentemente há uma grande presença de ruídos captados, principalmente aqueles provenientes de luz solar. Para se obter uma razoável confiabilidade na medida, é necessário que o nível do sinal captado proveniente do alvo tenha um contraste grande. Normalmente são utilizados pulsos da ordem de 50W até 300KW. Uma outra forma de garantir a confiabilidade da medição é aquela de somente considerar um pulso de retorno, se

² Neste trabalho, o termo Resolução é usado como sendo a menor variação detectável de uma grandeza física obtida através do instrumento de medida em questão.

este se repetir na mesma janela de tempo, por um número de vezes pré-determinado. O processo é melhor demonstrado na Figura 2.2-2, a seguir.

Figura 2.2-2) Método de Validação dos Pulsos de Retorno

- O tempo de retorno possível para o equipamento é dividido numa série de janelas. Quando um pulso de retorno é recebido, a “janela” correspondente é marcada. No próximo ciclo esta janela é considerada somente se o pulso recebido reincidir sobre ela. Assim, um pulso de retorno somente é considerado se este se repetir na mesma posição, por um número de vezes, estatisticamente determinado. Como o ruído solar tem uma distribuição aleatória, falsos pulsos são descontados. Uma pequena modificação neste processo permite resultados mais precisos. As janelas marcadas pela presença de pulsos recebidos são acumuladas num histograma, durante um determinado número de pulsos totais transmitidos. Após este período, a janela que mais recebeu pulsos é considerada a mais válida, sendo a distância calculada com base nesta. Esta técnica permite uma diminuição significativa da potência necessária de transmissão pelos Lasers, às custas, porém, da velocidade de medição. A Figura 2.2-3 mostra um histograma típico.

Figura 2.2-3) Método do Histograma para Validação da Distância

- O método de telemetria de pulsos é muito utilizado em telêmetros militares para avaliação da distância de tiro. Nestes casos, as distâncias de medida são da ordem de até 10 km, com *precisão*³ de 5m e velocidade de resposta inferior a 1 segundo. Utilizam normalmente de Laser de CO₂ ou Nd:YAG com pulsos da ordem de 20ns em potências de até 300KW. MAILLET (1987).

³ Neste trabalho, o termo Precisão corresponde ao grau de exatidão com a qual uma medida ou quantidade é apresentada. Por exemplo 3,14159 é um valor mais preciso de π do que 3,14.

- Outras aplicações estão na área de levantamento topográfico, levantamento aéreo de superfícies, controle florestal e ambiental. Nestes casos normalmente são utilizados Laser semicondutores. MAILLET (1987).
- Graças ao advento do Lasers semicondutores baratos e circuitos eletrônicos de alta velocidade viabilizou-se, recentemente, o uso deste método na medição de distâncias relativamente pequenas, da ordem de algumas dezenas de metros. Usando Lasers semicondutores pulsados de potências de pico em torno de 1W, estes aparelhos começam a ser utilizados no controle do nível de metal fundido em siderúrgicas, no levantamento do desgaste de paredes refratárias de altos fornos, nível de líquidos ou grãos em silos etc. MÄÄTTÄ et al. (1993).
- Para um estudo mais profundo desta técnica recomenda-se as referências HOVANESSIAN (1988), STITCH (1972).

2.2.2 Medidor de Distância por Comparação de Fase

Este método consiste em enviar um feixe Laser contínuo, modulado senoidalmente, e comparar a fase da onda emitida, com a fase da correspondente onda de retorno, proveniente do alvo. Um diagrama de blocos típico é mostrado na Figura 2.2-4.

O feixe de um emissor Laser é modulado senoidalmente através de um modulador externo, ou mesmo na alimentação do Laser, caso dos Lasers semicondutores. O feixe é então colimado e enviado na direção do alvo. Uma pequena parcela do feixe transmitido é desviado para um sensor de referência, fase 0°. A luz refletida pelo alvo é captada através do telescópio coletor e dirigido ao sensor principal, onde o sinal é então amplificado, filtrado, e a sua fase é comparada com a referência.

Figura 2.2-4) Medidor de Distância por Comparação de Fase

Se a modulação for efetuada na frequência f , pode-se associar um comprimento de onda de modulação L :

$$L = \frac{c}{f} \quad (2-1)$$

onde c é a velocidade da luz no meio. Desta forma, se a distância percorrida for um múltiplo de L , as ondas terão a mesma fase, $\Delta\varphi = 0$. No entanto, caso a distância não seja múltiplo, existirá uma diferença de fase $\Delta\varphi$, correspondente a uma distância percorrida excedente d . Assim, pode-se estimar que a distância total é:

$$D = \frac{c}{f} \left(\frac{n}{2} - \frac{\Delta\varphi}{4\pi} \right) \quad (2-2)$$

Unicamente pela comparação de fase $\Delta\varphi$ não é possível determinar n e consequentemente D . Por esta razão, nos medidores comerciais a frequência de modulação f é alterada periodicamente em 2 ou 3 valores distintos de maneira que, através de processamento matemático se encontre uma solução única de $(n, \Delta\varphi)$

Algumas peculiaridades deste método, são:

- Uma das vantagens do processo é que, devido a modulação do Laser ser em uma frequência fixa, não é necessário que a banda de passagem do circuito amplificador seja muito grande, permitindo o uso de filtros sintonizados estreitos. Assim, o nível de ruído captado é menor, viabilizando a utilização de Laser de pequena potência. Para distâncias de até 20m, é comum uso de Lasers com potências ao redor de 10 mW. CHAPPEL (1978).
- Devido à indeterminação de n , os sistemas mais simples podem ser “enganados”, dependendo da refletância do alvo e da sua distância. Nestes casos, normalmente, são usados 2 ou 3 frequências básicas de modulação, de forma a determinar n . Por exemplo no sistema Laser HP 3850, as frequências usadas são de 15MHz, 375KHz e 3,75KHz permitindo medidas na ordem de 20m, 800m e 80Km respectivamente. MAILLET (1987).
- A velocidade de medida é proporcional a f , e a precisão é proporcional a capacidade de se determinar a diferença de fase $\Delta\varphi$ existente. Para isto, tanto o amplificador do sensor de referência, quanto o amplificador do sensor principal, devem ter comportamento em fase muito parecido para evitar erros. Normamente, são circuitos idênticos mantidos a uma mesma temperatura. CHAPPEL (1978).
- Para distâncias pequenas o valor de n é zero. Para distâncias ainda menores $\Delta\varphi$ é reduzido dificultando sua detecção. Nestes casos se recorre ao esquema mostrado na Figura 2.2-5.

Figura 2.2-5) Medidor de Distância por Comparação de Fase Transportada

- No esquema Figura 2.2-5 o Laser é modulado numa frequência f_1 e enviado ao alvo. Uma fração do feixe refletido no alvo é captado pelo detector 2. O sinal de cada detector é misturado (modulado) por um outro oscilador f_2 . Neste ponto, devido a modulação, o sinal resultante possui frequência que é produto da diferença $f_1 - f_2$, ou seja, a frequência de batimento. As frequências f_1 , f_2 são escolhidas de forma que a diferença $f_1 - f_2$ permita uma velocidade razoável de processamento. É importante notar que a frequência de batimento $f_1 - f_2$ contém a diferença de fase $\Delta\phi$. Ao se “misturar” os sinais provenientes dos sensores, mantém-se a informação da defasagem $\Delta\phi$, porém numa frequência $f_1 - f_2$ muito menor, sendo mais fácil e precisa a medida resultante. Em alguns medidores comerciais, a frequência f_1 está em torno de 5 MHz e $f_1 - f_2$ em torno de 80 Hz, resultando numa precisão de medida da ordem de 2 cm em 16 metros. CHAPPEL (1978).
- Como a velocidade de comparação de fase foi do valor correspondente à modulação f_1 para o valor da transportada $f_1 - f_2$, o circuito de detecção de fase é simplificado. Normalmente $f_1 - f_2$ fica na faixa de 60Hz a 4KHz, permitindo o uso de componentes de baixa frequência. A velocidade de medida, no entanto, é diminuída, o que limita o seu emprego em algumas áreas.
- Para um estudo mais aprofundado desta técnica recomenda-se novamente as referências HOVANESSIAN (1988), STITCH (1972). Em CHAPPEL (1978) existe uma descrição detalhada de um telêmetro deste tipo.

2.2.3 Medidor de Distância Interferométrico

O método interferometria foi um dos primeiros métodos ópticos para detecção de distância e/ou pequenos deslocamentos. O primeiro interferômetro foi o criado com a intenção de detectar possíveis variações na velocidade da luz, devido ao movimento da Terra no espaço. Diversas variantes do método básico foram criados com a intenção de medir “planicidade” ou testar superfícies ópticas. LUXON e PARKER (1985).

Para medição de deslocamento, o esquema básico é mostrado na figura a seguir, sendo este mais comumente chamado de interferômetro de Michelson.

Figura 2.2-6) O Interferômetro de Michelson

Uma fonte de luz, monocromática, é colimada pela lente $L1$, formando um feixe paralelo. Este feixe atinge o divisor B , que conduz metade para $M1$ e a outra metade para C , e depois para $M2$. Desta forma uma parte do feixe passa por B sendo refletido por $M2$, retornando para B e refletindo, novamente, para a direção do telescópio T . A outra metade é refletido por $M1$, passando novamente por B e também sendo captado por T . Os dois sinais captados por T são combinados e caso a luz seja coerente, é produzido sobre a tela do telescópio um padrão de interferência. A placa compensadora C de material e espessura idêntica a B , tem a finalidade de garantir que os dois ‘braços’, $M1$ e $M2$, do sistema apresentem o mesmo “comprimento óptico”, passando pelos mesmos vidros e pelo ar. Como os “braços” são iguais opticamente, é possível considerar a imagem de $M2$, $M2'$, colocada junto a $M1$. Assim, o padrão de interferência pode ser expresso por:

$$p \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \cos \theta \quad (2-3)$$

onde:

- λ comprimento de onda
- p número de franjas de interferência
- θ ângulo entre a superfície $M1$ e $M2' \approx 0$
- d distância entre $M1$ e $M2'$

Se um dos espelhos, normalmente $M2$, é movimentado no eixo do braço B - C - $M2$, o comprimento óptico que a luz caminhante necessita percorrer, se altera. Assim, a medida que D se altera, o número p de franjas também o faz, de modo que as franjas se movam em relação a algum ponto arbitrário de referência. Pela contagem da “passagem” das franjas por este ponto, se determina a variação da distância d .

Como consequência direta do princípio de funcionamento, o medidor por interferometria somente é capaz de detectar deslocamentos, e não distâncias absolutas.

O deslocamento máximo que é possível detectar depende de inúmeros fatores, dentre eles o “comprimento de coerência” da fonte de luz adotada. O comprimento de coerência pode ser definido como sendo o percurso ou comprimento máximo, no qual um trecho de ondas luminosas emitidas pela fonte, mantém coerência de fase, ou seja homogeneidade de fase. Na prática, corresponde ao percurso máximo que o espelho $M2$ pode ser deslocado e ainda ser produzido um padrão de interferência.

No esquema interferométrico mostrado, os dois feixes de luz, entre $M1$ e $M2'$, são capazes de produzir interferência mutua, desde que a distância d não seja maior que este tal comprimento de coerência L_c . Para d acima de L_c , as ondas perdem sua homogeneidade de fase, impedindo que as franjas de interferência ocorram.

O comprimento de coerência depende do tipo de fonte luminosa, sendo uma medida da “qualidade” da luz gerada e, obviamente, o Laser é um forte candidato, devido a suas características intrínsecas. Entretanto, alguns Lasers possuem características mais favoráveis que outros. Na Tabela 2.2-1, são apresentados os comprimentos de coerência para alguns Lasers típicos:

Tipo de Laser	L_c
HeNe estabilizado (Monomodo)	1.000m
HeNe não estabilizado	0,1~0,2m
Argônio (Multimodo)	0,02m
Nd :YAG	0,01m
Diodo Laser (AsGa)	0,0002m~ 0,005m

Tabela 2.2-1) Comprimento de Coerência de Alguns Lasers

Quando se usa Laser como fonte luminosa no interferômetro, deve-se evitar que o feixe luminoso retornante incida novamente sobre o Laser. Este cuidado é necessário por causa do fenômeno de ressonância. Se alguma luz entrar na “cavidade ressonante” do Laser, pode alterar as características do feixe que está sendo gerado. Assim, normalmente os espelhos $M1$ e $M2$ são substituídos por prismas “canto de cubo”, conforme a Figura 2.2-7. O prisma retorna um feixe extremamente paralelo ao incidente, porém deslocado, facilitando a montagem.

Figura 2.2-7) Interferômetro Usando Lasers

Uma outra desvantagem do método interferométrico é a necessidade da superfície móvel ser um espelho como M2. Dessa forma, na maioria das vezes, o espelho deve ser fixado à superfície móvel de interesse. A sua utilização fica muito limitada, pois normalmente se deseja medir o deslocamento ou distância de superfícies não preparadas, ou “não-cooperativas”. Quando, porém, não existe esta limitação, a precisão obtida no método de deslocamento é alta, sendo facilmente alcançados valores da ordem de $\lambda/2$ e em alguns casos até $\lambda/100$. Este método é usado em levantamento de erros em máquina operatrizes, ensaios de estruturas ou levantamento de erros em gabaritos de montagem.

2.3 Métodos de Medição de Distância por Triangulação

O Medidor de Distância por Triangulação a Laser (MDT), também chamado de "proxímetro", tem por princípio calcular a distância de uma superfície, através da visualização da imagem de um feixe Laser incidente sobre esta.

Um MDT genérico possui o diagrama esquemático da Figura 2.3-1.

Figura 2.3-1) Diagrama Esquemático de um Medidor de Distância por Triangulação Óptica Genérico.

Para o melhor entendimento das principais partes, é conveniente sua descrição através de uma configuração típica, mostrada na Figura 2.3-2.

Figura 2.3-2) Esquema Geral de um Medidor de Distância por Triangulação

O Sistema Iluminador, neste caso um Laser, envia um feixe luminoso que através do conjunto de lentes colimadoras, produz uma região onde a espessura deste feixe é a menor possível. Tal feixe ao encontrar uma superfície, produz um ponto de

alto brilho, que é visualizado pelo Sistema Captador. A Lente Captadora, por sua vez, produz no sensor uma imagem proveniente do ponto incidente sobre o objeto. Este sensor corresponde ao bloco Sensor de Posição de Imagem e pode se apresentar de diversas formas. Através da eletrônica de controle deste Sensor, é possível determinar a posição relativa desta imagem sobre este, e através de cálculos trigonométricos, determinar a distância do objeto que está sendo iluminado. Este cálculo é executado pelo bloco Processador, que também atua nos demais blocos, visando a adaptação conjunta de forma conveniente.

Existem vários modelos de MDTs na literatura, que podem ser resumidos em 3 configurações básicas. A principal característica diferenciadora é a forma com que o feixe iluminador incide sobre o alvo. Esta característica determina, muitas vezes, a eficiência da aplicação, o campo de medida e a precisão alcançável.

2.3.1 Triangulação por Feixe Normal

Neste método, o feixe iluminador incide de forma normal à superfície alvo, ou de forma paralela ao eixo de deslocamento. É o método mais comum, devido a sua vantagem intrínseca de delimitar com precisão o ponto de medida, principalmente quando são usados Lasers visíveis.

A determinação da distância por triangulação a feixe normal segue o esquema trigonométrico demonstrado a seguir, Figura 2.3-3:

Figura 2.3-3) Diagrama Trigonômico do MDT a Feixe Normal

O Laser envia o feixe, atingindo a superfície alvo, formando um ponto iluminado que é captado pela lente. Sua imagem é projetada sobre o sensor.

Usando as equações de formação de imagens por lentes ideais tem-se que:

$$\frac{h'}{h} = -\frac{s'}{s} \quad (2-4)$$

onde:

- h' altura da imagem do deslocamento d
- h altura aparente do deslocamento d
- s' distância da imagem no sensor à lente captadora
- s distância aparente do deslocamento d

observando a figura, obtém-se:

$$x \cdot \text{sen}\alpha = -\frac{s'}{s} \cdot d \cdot \text{sen}\theta \quad (2-5)$$

onde:

- x medida do deslocamento captado pelo sensor
- α ângulo formado pelo sensor para manter a imagem no foco em relação ao eixo do sistema óptico de captação
- θ ângulo primário de triangulação, formado pelo feixe Laser, normal à superfície e o eixo do sistema óptico de captação.
- d deslocamento, medido a partir de uma distância d_o , da superfície de interesse.

Assume-se que $x=0$ para $d=0$, assim:

$$s = s_o + d \cdot \cos\theta \quad (2-6)$$

$$s_o \cdot \cos\theta = d_o \quad (2-7)$$

s_o distância entre o ponto iluminado da superfície e a lente captadora quando $d=0$

Sabendo-se que

$$s' = \frac{s \cdot f}{(s - f)} \quad (2-8)$$

e desprezando o sinal (assumindo a orientação de x) :

$$d = \frac{s \cdot x \cdot \operatorname{sen} \alpha}{s' \cdot \operatorname{sen} \theta} \quad (2-9)$$

resolvendo para d :

$$d = \frac{A \cdot x}{(B - x)} \quad (2-10)$$

onde:

$$A = \frac{d_o - f \cdot \cos \theta}{\cos^2 \theta} \quad (2-11)$$

$$B = \frac{f \cdot \tan \theta}{\operatorname{sen} \alpha} \quad (2-12)$$

A partir das equações (2-10), (2-11) e (2-12) é possível prever o comportamento do MDT, porém, é importante salientar que as equações são aproximadas e que o melhor método de se garantir uma boa precisão é submeter o equipamento a um processo de calibração. O método normalmente utilizado corresponde ao deslocamento de uma superfície difusa, em distâncias conhecidas d , registrando-se as detecções x . Monta-se uma tabela de valores (d, x) e através de cálculo numérico se encontra as melhores constantes A e B da equação (2-10), que produzam o mínimo erro na relação entre d e x levantadas. Através de um processador eletrônico acoplado, que tenha registrado em si tais constantes, a medida fornecida já levará em conta muitos dos erros ópticos e mecânicos que o medidor apresenta. No capítulo 4 são demonstrados alguns casos.

O esquema da Figura 2.3-3 é muito utilizado em MDTs que possuem campo de medição variando de 20 a 200 mm. MAILLET (1987). Tal esquema apresenta uma vantagem muito significativa, pois o feixe Laser permanece sempre normal à superfície, identificando o ponto onde a distância desejada está sendo captada. Este fato é de suma importância quando se utilizam dois MDTs para a medição de espessuras de chapas, distâncias de superfícies cilíndricas, ou levantamento de perfis. Para campos menores ou mais próximos, a medida que os parâmetros a e d_o diminuem, o ângulo α também diminui, fazendo com que a imagem sobre o sensor apresente distorções, dificultando o reconhecimento da posição x . Nestes casos o esquema apresentado a seguir possui vantagens.

2.3.2 Triangulação por Feixe Oblíquo

Quando se deseja medir pequenos deslocamentos o esquema da Figura 2.3-4 é modificado, como mostrado na Figura 2.3-5 a seguir.

De acordo com a Figura 2.3-4 tem-se que

$$d_i = d_o + \frac{x \cdot (d_o - f)}{\left(f \cdot \frac{\tan \theta}{\sin \alpha} - x \right)} \quad (2-13)$$

Figura 2.3-4) MDT Usando Feixe Oblíquo

O sensor não necessariamente deve ficar normal à superfície. Muitas vezes, visando manter o melhor foco da imagem sobre o sensor, este é inclinado permanecendo paralelo ao feixe. Nestes casos, a lente captadora pode ser escolhida e posicionada da maneira mostrada na Figura 2.3-5. Nesta situação, o deslocamento da imagem é uma função linear do deslocamento do alvo, simplificando o processamento. PARKER (1980).

Figura 2.3-5) MDT com Feixe Oblíquo, Linearizado

De acordo com a Figura 2.3-5, tem-se que :

$$d_i = d_o + x \cdot \left(\frac{\cos \theta \cdot d_o}{f \cdot \sin \theta} - \cos \theta \right) \quad (2-14)$$

O esquema da Figura 2.3-5 apresenta uma séria desvantagem, pois o ponto que está sendo medido não fica sobre o eixo óptico, isto é, o ponto de medição somente é indentificado pela presença do Laser, e "caminha" lateralmente à medida que a distância se altera. Tal comportamento limita sua aplicação, e em certos casos como em medidas de superfícies cilíndricas, pode induzir a erros. Por outro lado este método é muito útil quando o material a ser medido apresenta comportamento reflexivo relevante, como no caso de vidros ou chapas metálicas "espelhadas". O esquema mostrado na Figura 2.3-6 indica um MDT sendo usado para a medição de espessura de placas de vidro. Quando se utilizam sensores tipo CCD, as duas reflexões podem ser captadas pelo mesmo aparelho, indicando diretamente a espessura do material, conhecido o índice de refração deste. Na Figura 2.3-6 é esquematizado este caso.

Figura 2.3-6) Medição de Espessura de Materiais Transparentes.

2.3.3 Triangulação por Feixe Móvel

Voltando ao esquema da Figura 2.3-3, para o caso de distâncias maiores que 200mm, devido a configuração óptica, ou mesmo devido à limites na disponibilidade do parâmetro a , os deslocamentos x tornam-se pequenos frente aos d correspondentes, limitando assim a resolução do equipamento. Nestes casos costuma-se utilizar outra configuração, mostrada na Figura 2.3-7.

Figura 2.3-7) MDT por Triangulação Usando Espelho Móvel

O feixe Laser é deslocado angularmente através do espelho giratório (ou oscilante). A imagem do impacto do feixe sobre o objeto é observada pela lente captadora, formando uma imagem sobre o detector de 2 hemisférios (ou quadrantes). O detector de 2 hemisférios é ligado a um circuito dedicado, especialmente desenhado para determinar o momento preciso em que a imagem do feixe passa pela fronteira dos hemisférios do sensor. A rotação tem um comportamento temporal conhecido (e calibrado), e através de sensores de sincronismo consegue-se medir com precisão, o intervalo de tempo t entre um ângulo θ_0 para uma distância $d_0 = a \tan(\theta_0)$, e o ângulo $\Delta\theta$ para uma distância d , assim sendo:

$$\Delta\theta \approx g(t) \quad (2-15)$$

$$d \approx a \tan (\theta_0 + g(t)) \quad (2-16)$$

Utilizando-se no lugar do espelho móvel, um defletor acústico-óptico, altas precisões são alcançadas, em distâncias de até dezenas de metros. KOEBNER (1984), BODLAJ e KLEMENT (1976).

É importante notar que a precisão de medida de todos os modelos de MDTs aqui descritos, depende fundamentalmente do tamanho do feixe visualizado sobre o alvo e da qualidade da sua imagem formada sobre o sensor. Quanto mais estreito, melhor será a resolução e sua precisão, pois diminui a incerteza da localização exata da imagem x . Na prática, recorre-se à artifícios eletrônicos, dependendo do tipo de sensor utilizado.

3. Tecnologia dos Medidores

Neste capítulo são descritos os principais componentes que viabilizam a construção de um Medidor de Distância, principalmente aqueles usados no método de triangulação, e que sejam destinados a aplicações industriais.

São discutidos os seus principais componentes e suas características, dando ênfase aos aspectos práticos de utilização que influenciam no desenho geral do equipamento.

3.1 Sistema iluminador

Como pode ser concluído pelo capítulo anterior, os métodos de funcionamento dos medidores de distância sempre pressupõem a presença de um feixe luminoso, bem definido. Normalmente, os alvos devem ser “iluminados” de forma conveniente, de maneira que a informação de distância seja gerada e captada.

Nos modelos por telemetria de pulso ou por comparação de fase, os Lasers são semicondutores ou até mesmo de ND:YAG e CO₂ para modelos maiores.

Na discussões anteriores referentes aos principais métodos, nos modelos por triangulação, observa-se que os módulos de iluminação normalmente são constituídos de Lasers Semicondutores ou de Hélio-Neônio. Estes dispositivos são capazes de produzir uma luz com características adequadas, e de fácil discernimento pelo equipamento. O Laser mais utilizado atualmente nos medidores de distância para uso industrial é o Laser semicondutor. Em algumas aplicações, no entanto, o Laser de Hélio-Neônio tem uma forte presença. Em alguns casos especiais podem ser utilizados fontes comuns, tais como lâmpadas halógenas.

Nas discussões que se seguem são descritas as principais características dos Lasers semicondutores e dos Lasers Hélio-Neônio. Os princípios físicos que regem o funcionamento de tais dispositivos não serão descritos, pois existem detalhados estudos já publicados, tais como as referências LUXON e PARKER (1985) e WILSON e HAWKES (1987).

A discussão seguinte está baseada nos aspectos práticos de utilização e a influência de certas características, no desenho de um medidor de distância para uso industrial.

3.1.1 O Laser semiconductor

O Laser semiconductor, mais conhecido por Diodo Laser, é composto por uma junção semicondutora diagramada na Figura 3.1-1.

Figura 3.1-1) Diagrama Esquemático de um Laser Semicondutor

A luz Laser é gerada forçando-se a passagem de uma corrente elétrica através da região ativa da junção, o diodo entre as camadas N e P do semiconductor. Esta corrente forçada produz elétrons e “buracos”, que uma vez combinados emitem fótons. Estes fótons são emitidos num comprimento de onda que é, a grosso modo, determinado pela diferença de níveis de energia entre os materiais semicondutores utilizados.

Os modos espaciais de oscilação Laser são definidos pelos canais estreitos existentes na região ativa, que acabam confinando a luz produzida. Este confinamento pode ser obtido pela cuidadosa seleção de certos parâmetros do material, que terminam por produzir uma variação da densidade da corrente de injeção na região. O Laser baseado neste método é conhecido por “Gain Guided”. O outro método corresponde à seleção e agrupamento em geometrias convenientes, materiais específicos que produzam uma variação do índice de refração, fazendo com que o Laser deste tipo seja conhecido por “Index Guide”.

Os Lasers semicondutores podem ser encontrados numa grande diversidade de características. Os mais comuns podem ser encontrados possuindo comprimentos de onda de emissão desde 1.500nm até 630nm, com potência da ordem de 0,1mW até 200mW, quando operados de forma contínua, (CW). Esta faixa, no entanto, é dividida em algumas regiões bem específicas, ditadas pelas aplicações comerciais a que se destinam. Por exemplo: os comprimentos de 1.300nm e 1.500nm são utilizados em telecomunicações, na faixa de 750 a 890nm em aplicações tais como CD, impressoras Laser etc. Os Lasers no espectro visível e infravermelho próximo, possuindo emissão entre 630nm até 750nm, são usados em leitora de código de barras, indicadores luminosos etc.

Figura 3.1-2) Estruturas Internas de Lasers Semicondutores Visíveis

A potência de saída de um diodo Laser depende de uma série de fatores. Na Figura 3.1-3 é apresentada a curva característica resultante da interação entre a corrente de injeção, temperatura e a potência óptica de saída. Pode-se observar o ponto de transição onde a ação Laser passa a ocorrer no dispositivo semicondutor. É possível observar também a acentuada dependência em relação à temperatura de operação, o que exige sistemas eletrônicos para a estabilização da potência, como será discutido mais adiante.

Alguns tipos de Lasers semicondutores são especialmente construídos para trabalharem no modo pulsado. Neste caso, a corrente é injetada em pequenos períodos, de 20 a 200ns. Desta forma as potências de pico obtidas atingem em alguns casos até 50W. Entretanto, com o intuito de evitar a degradação das faces do semicondutor, estes dispositivos apresentam uma taxa de repetição máxima. A degradação é conhecida pela sigla “COD” de “catastrophic optical damage”. A taxa de repetição costuma estar entre 1 e 10kHz. Pode-se dizer, portanto, que estes Lasers possuem um ciclo de trabalho ativo máximo. Normalmente os ciclos variam de 0,05% a 0,2%. Caso este ciclo seja excedido, o semicondutor se degrada em poucos períodos.

Alguns Lasers possuem taxa de trabalho de 0,2% atingindo até 10%, e larguras de pulso de até 10ms. Tais Lasers são chamados de “Quase-contínuos” e apresentam potências de pico na ordem de 1 a 5W.

Figura 3.1-3) Curva Característica Potência X Corrente para Laser Toshiba TOLD9211

Figura 3.1-4) Divergência Típica de Diodo Laser TOLD9211, a 25°C e 4mW

O feixe de luz emitido pelo Laser semiconductor provém de uma pequena região, normalmente com dimensões da ordem de $0,1\mu\text{m}$ até $0,3\mu\text{m}$, como mostrado na Figura 3.1-1. WIEMAN e HOLBERG (1991). Assim, normalmente, o feixe apresenta uma grande divergência. Um feixe típico de Laser trabalhando no infravermelho possui no eixo de junção divergência de 10° , e no eixo transversal cerca de 30° , medindo-se um ponto de 50% da intensidade máxima. Os Lasers que trabalham no espectro visível possuem divergência ainda maiores e assimétricas, chegando a 7° e 40° respectivamente. Na Figura 3.1-4 é apresentada a curva de distribuição nos dois eixos ortogonais.

Normalmente, o feixe pode ser colimado utilizando-se uma lente de pequena distância focal ($f < 3\text{mm}$), produzindo um foco de forma elíptica, que na maioria das aplicações é aceitável. Na figura seguinte é mostrado o desenho de um colimador típico.

Figura 3.1-5) Colimador Típico para Laser Semiconductor, 06GLC001 da MELLES GRIOT

Quando é preciso obter um foco simétrico de perfil “Gaussiano”, no entanto, se faz necessário o uso de colimadores mais sofisticados, como aquele esquematizado na Figura 3.1-6.

Figura 3.1-6) Colimador de Grande Desempenho

Este colimador usa um par de prismas que, uma vez ajustados, controla as dimensões necessárias de foco em dois eixos ortogonais. O ajuste é executado alterando-se os ângulos, distâncias e dimensões entre os prismas.

A grande divergência do feixe emitido faz com que, uma parte da potência emitida, seja perdida nos colimadores. Normalmente, cerca de 30% da potência é bloqueada devido à não captação pelo colimador, de todo o feixe divergente emitido. Este valor pode ser melhorado através de cuidadoso projeto óptico, apelando-se, muitas vezes, para lentes asféricas. WIEMAN e HOLBERG (1991).

Mais recentemente, surgiram os colimadores para diodos Laser que possuem lentes asféricas, produzidas por prensagem. Apesar da qualidade superficial destas não permitirem uma colimação com qualidade de feixe comparável aos modelos já descritos, exibem uma vantagem significativa em relação a custo e simplicidade de uso.

Figura 3.1-7) Lente Colimadora Asférica C240TB da THOR LABS

Nos Lasers de maior potência, a região ativa possui, às vezes, dimensões maiores que $0,1 \times 0,3 \mu\text{m}$, e são chamados de “canal largo”. Esses Lasers costumam apresentar divergência ainda mais assimétricas. Alguns Lasers típicos desta classe apresentam canais com dimensões de 1 e $5 \mu\text{m}$, que impedem uma colimação comparável aos seus parentes mais fracos.

De qualquer forma, nos Lasers semicondutores, o perfil do emissor é quase Gaussiano. A dimensão do foco produzido por um sistema óptico segue portanto as regras usadas para feixes Gaussianos. No entanto devido às grandes divergências que os Lasers semicondutores apresentam, o chamado “Parâmetro Confocal” é pequeno (na ordem de 10λ). Este parâmetro é conhecido também como “Campo de Rayleigh”. Assim um sistema óptico colocado de maneira a produzir um foco com o feixe do Diodo Laser normalmente atua como se estivesse posicionado bem longe do Campo de Rayleigh, permitindo que as dimensões teóricas do foco sejam limitadas pela difração, e determinadas pela abertura do sistema óptico utilizado. Para um estudo mais detalhado recomenda-se a referência O’SHEA (1985). Assim, a dimensão mínima obtível do foco, w_o , é determinada pela abertura utilizada de saída do colimador D , pela distância focal f e comprimento de onda λ , podendo ser aproximada pela equação:

$$w_o \approx 1.22 \frac{\lambda \cdot f}{D} \quad (3-1)$$

A profundidade de foco w_f pode ser aproximada por:

$$w_f \approx 1.22\lambda \cdot \left(\frac{f}{D}\right)^2 \quad (3-2)$$

Como exemplo, um Laser de 670nm que, se bem colimado, apresenta um diâmetro de 1mm na saída do colimador, quando focado a cerca de 500mm de distância, produzirá um “spot” de 427µm com profundidade de campo de 213mm.

Na prática, no entanto, esses valores dificilmente são obtidos sem um cuidadoso desenho óptico, com atenção especial ao acabamento das lentes utilizadas. Um fator importante e frequentemente negligenciado se refere ao alinhamento do semiconductor com o eixo óptico das lentes. Algumas referências concluem que a centralização necessária entre o eixo óptico e o eixo de emissão do semiconductor deve ficar ao redor de 0,5µm, para que o limite de difração seja atingido. MAHONY e GROMALA (1989).

Figura 3.1-8) Colimação de um Feixe Laser

Outro fator que se deve levar em conta é a razoável dispersão das características ópticas, que ocorrem devido ao processo de fabricação do diodo. Variações da ordem de 10% na divergência são comuns. Desalinhamento e excentricidades do semiconductor em relação ao encapsulamento, da ordem de até 0,5mm, são reportadas por alguns fabricantes. O posicionamento angular também apresenta tolerâncias de até 5° em relação a carcaça. Assim, quando se necessita de desempenho assegurado, ajustes e seleções preliminares devem ser consideradas.

O comprimento de onda de emissão também varia com uma série de fatores, principalmente com a temperatura e a corrente de alimentação. Nos Lasers “Index Guide” por exemplo, mudanças na corrente de injeção afetam tanto a temperatura quanto a densidade de portadores, que também alteram o índice de refração do material, acabando todos por influenciar na emissão. Na Figura 3.1-9 é mostrado o efeito da corrente, e assim potência óptica, com o espectro de emissão.

Figura 3.1-9) Espectro de Emissão de Lasers Semicondutores de Estruturas Distintas

Observando-se o espectro verifica-se que dependendo da corrente ou potência, um modo longitudinal prevalece. De fato, verifica-se que a emissão de Laser semicondutor não é puramente monocromática. Dependendo da corrente de injeção, o Laser pode se comportar como se fosse quase “incoerente”. É salientada, assim, uma característica importante que é o baixo comprimento de coerência da luz de um Laser diodo semicondutor.

O comprimento de coerência pode ser definido como o percurso máximo em que a luz pode ser composta, para produzir padrões de interferência. Como já discutido no item 2.2.3, pode ser definido como:

$$l_c \approx \frac{c}{\Delta\nu} \quad (3-3)$$

onde

c velocidade da luz

$\Delta\nu$ largura da banda de emissão do Laser.

Os Lasers semicondutores possuem a banda $\Delta\nu$ muito larga quando comparados com outros tipos de Laser. Os Lasers semicondutores apresentam l_c da ordem de 0,01mm até 5mm, nos melhores casos. Tal fato dificulta, por exemplo, que os Lasers semicondutores sejam usados em interferômetros. No entanto, a baixa coerência diminui, e às vezes elimina, o efeito de “Speckle” ou granulado óptico. Este efeito é muito comum e claramente visível, por exemplo, quando se incide um feixe Laser de Hélio-Neônio sobre uma superfície fosca. O efeito de granulado pode confundir a captação da imagem nos medidores de distância por triangulação, como será visto mais adiante.

É importante notar que o ponto central no espectro de emissão varia também com a temperatura. Normalmente esta variação se encontra na ordem de $0,05\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ até $0,28\text{nm}/^{\circ}\text{C}$, dependendo dos materiais e de certas características construtivas. A faixa de operação também é larga. Alguns Lasers são construídos para trabalhar a $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, outros possuem faixa variando de -40 até $+75^{\circ}\text{C}$, e alguns são feitos para trabalhar até cerca de 30°K .

Os Lasers utilizados nos medidores de distância em geral devem possuir faixa de temperatura de operação grande, prevendo os diversos ambientes industriais a que podem ser submetidos. A variação espectral deve ser analisada, por causa da presença de filtros ópticos “passa banda” estreita, que normalmente são utilizados para eliminar ruídos luminosos provenientes do sol ou mesmo de lâmpadas. Esses filtros apresentam com frequência variação térmica, que em alguns casos atinge cerca de $-0,2\text{nm}/^{\circ}\text{C}$.

A componente de pico no espectro de emissão também sofre de dispersão em seus valores, devido aos processos produtivos. Para um mesmo “modelo” comercial, normalmente o pico de emissão pode variar entre 5 nm até 30nm . Assim, ao se utilizar o Diodo Laser, é aconselhável que o filtro óptico de captação seja desenhado largo e suficiente para acomodar tal dispersão, bem como o passeio térmico.

É importante notar também que, as especificações do Laser são apresentadas a uma determinada temperatura, incluindo-se aí a expectativa de vida. Habitualmente, os diodos Lasers comerciais possuem uma expectativa de vida maior que 10^5 horas, para 25°C . Contudo, caso a temperatura de operação se eleve em 10°C , o tempo de vida cai para 2×10^4 horas, diminuindo de um fator 5. WIEMAN e HOLBERG (1991) A vida de um Laser semiconductor depende de diversos fatores, incluindo desde os processos produtivos até o manuseio. Normalmente os fabricantes, sob solicitação, informam os estudos estatísticos a respeito dessa questão. Para maiores detalhes consultar a referência TOSHIBA (1990). É importante salientar que a definição de “vida” também não é padronizada, porém usualmente é considerada como sendo o período em que 96% dos Lasers estudados apresentam a potência óptica decaída em 50%.

Frequentemente, os circuitos que controlam o Laser procuram variar a corrente, de forma a manter a potência óptica de saída constante. Devido à passagem de corrente o Diodo esquenta, e caso não possua um dissipador de calor, a potência óptica tende a cair, forçando o circuito a aumentar a corrente, realimentando então o processo, e podendo causar dano por excesso de corrente. É necessário portanto, o uso de generosos dissipadores de calor. Nas especificações fornecidas pelo fabricante dos Lasers, normalmente são indicadas as dimensões mínimas e formas de fixação, que não comprometem a integridade mecânica do encapsulamento. Na Figura 3.1-10 é esquematizado o suporte/dissipador típico para um Laser de baixa potência.

Figura 3.1-10) Suporte e Dissipador Típico para Laser Semicondutor

De modo usual, um dissipador bem dimensionado é suficiente para manter o diodo Laser operando dentro dos limites aceitáveis, porém, em certas aplicações, um controle ativo da temperatura se faz necessário. Em alguns casos extremos, chega a ser necessário a passagem de fluidos refrigerantes. Todavia, na maioria dos casos, são utilizados os dispositivos chamados de “Células de Peltier”. Estas células funcionam como se fossem “bombas” de calor, transferindo a energia de um lado para outro, através da passagem da corrente elétrica. Por ser um dispositivo de estado sólido, ativado por corrente, um circuito eletrônico é especialmente construído para controlar esta corrente, de acordo com a temperatura do Laser semicondutor. O circuito procura manter esta temperatura o mais constante possível.

Figura 3.1-11) Controle de Temperatura de um Laser Usando Célula de Peltier

De acordo com a figura, a temperatura do Diodo Laser é monitorada através de um termistor. O sinal deste é amplificado e comparado com outro, que indica a temperatura desejada. Um circuito regulador de potência dirige a corrente para a “Célula de Peltier”, retirando o calor de uma face (“fria”) e transferindo para outra, onde um dissipador de dimensões apropriadas é colado. O suporte do diodo Laser é fixado na face “fria”.

Este método é muito utilizado quando se necessita manter as características espectrais do Laser, ou seja, evitar que o comprimento de onda de emissão varie devido à variação de temperatura. Vários métodos alternativos podem ser encontrados na referência WIEMAN e HOLBERG (1991). Alguns fabricantes já incorporam a “Célula de Peltier” no próprio encapsulamento do Laser. SDL (1994).

Devido às pequenas dimensões das regiões ativas dentro do dispositivo, bem como, devido aos materiais usados no semicondutor do Diodo Laser, estes são altamente susceptíveis à danos causados por surtos de corrente, ou mesmo por descargas eletrostáticas. Se um surto passa pela junção, pode ocasionar a deterioração ou mesmo a destruição das finas camadas que constituem a geometria do canal semicondutor, necessário à produção do efeito Laser.

Alguns fabricantes publicam, a título de advertência e mesmo como regras de boa utilização, ensaios mostrando a influência de uma descarga na degradação do desempenho do Laser. Na Figura 3.1-12 é apresentado um ensaio realizado, pelo fabricante, em um lote de um Laser TOSHIBA TOLD9211, 670nm 5mW.

A passagem da corrente de surto proveniente de uma descarga eletrostática causa uma mudança na curva característica do Laser. Mesmo uma aplicação “instantânea” de 50V sobre a junção provoca uma deterioração da curva-resposta do Laser. Infelizmente é uma situação extremamente inconveniente, pois o Diodo Laser ainda funciona aparentemente bem, passando por testes, se estes não forem executados com extremo cuidado e precisão. Estes Lasers deteriorados possuem vida extremamente curta, cerca de 200 a 500 horas.

Figura 3.1-12) Efeito de Surto de Corrente devido à Descarga Eletrostática

A degradação do Laser também pode ser monitorada pela observação do feixe emitido. Na Figura 3.1-13 é mostrada a situação.

Figura 3.1-13) Sintomas Típicos de Degradação de Diodos Lasers. FFP: “Far Field Pattern”, Perfil do Feixe a uma Distância Conveniente

O formato do feixe é modificado por causa da degradação da superfície do semicondutor de onde o feixe emerge. É comum a existência de aparente “movimento” do feixe, onde o perfil deste se altera aleatoriamente.

Devido a extrema sensibilidade e descarga eletrostática, os fabricantes indicam severas medidas de precaução durante o manuseio do Diodo Laser. Em resumo sugerem :

- Aterrar a bancada de trabalho através de superfícies condutoras, no mesmo potencial da fonte de alimentação do Laser.
- Aterrar ferramentas, soldadores e até mesmo as mãos do operador através de pulseira ligada ao aterramento comum. Manuseio direto é altamente desaconselhável
- Não operar equipamentos que geram surtos eletrostáticos próximos à bancada de trabalho, tais como Monitores de vídeo, transmissores de rádio, etc.

A título de ilustração é apresentada a Tabela 3.1-1 seguinte, onde é indicada a tensão de pico medida nas mãos de uma pessoa, em função da resistência de aterramento da pulseira. TOSHIBA (1989). Com base em ensaios empíricos, as pulseiras devem possuir resistência máxima de 10MΩ para que evitem danos ao Laser.

Tensão de pico (Volts)	Resistência de Aterramento (M Ω)
<2	0,21
<2	1
11	10
30	50
80	100
1550	∞ (sem pulseira)

Tabela 3.1-1) Tensões Típicas Presentes Durante o Manuseio

As especificações elétricas do Diodo Laser também contém informações úteis e essenciais para o sucesso de seu uso. Três informações são fundamentais: a potência máxima, a corrente máxima e a tensão reversa máxima.

A potência óptica máxima é aquela que nunca deve ser ultrapassada, sob risco de causar degradação nas superfícies de saída do feixe Laser, no semicondutor. Este efeito é chamado de “*Catastrophic Optical Damage*”. Se excedida, a eficiência do Laser cai abruptamente. Para evitar isso, é muito importante verificar a presença de transientes na corrente de alimentação do Laser. É muito comum que, no momento em que é ligada a fonte de alimentação, ou mesmo durante a operação pulsada, ocorram transientes e sobre-oscilações, como mostrado na Figura 3.1-14.

Tais fenômenos devem ser evitados através do uso de filtros supressores, circuitos de amortecimento, “partida lenta” na fonte etc.

Figura 3.1-14) Formas de Chaveamento de Corrente, Ocorrendo Sobre-oscilação no Laser

O efeito nocivo das sobre-oscilações pode ser melhor compreendido pela Figura 3.1-15.

Figura 3.1-15) Sobrecarga em Diodos Laser devido a Sobre-oscilações.

Se a sobre-oscilação na corrente fizer com que a potência emitida ultrapasse o valor máximo, mesmo que momentaneamente, a degradação acelerada tem início. Nestes casos, quando não se conseguem filtros que eliminem esses transientes, a potência de regime deve ser abaixada, de forma que o pico da sobre-oscilação não ultrapasse o máximo valor permitido.

Figura 3.1-16) Redução do Ponto de Operação para Suportar Efeitos de Sobre-oscilações

Conclui-se assim, pela necessidade de cuidadoso estudo e ensaio da fonte de alimentação, bem como o uso de ligações curtas para o Laser, de forma a evitar efeitos indutivos.

A sobre-oscilação “negativa” também é extremamente danosa. Ao se desligar a fonte ou mesmo ao fim de um pulso, é frequente a presença de tensões negativas. As especificações comuns dos Diodos Lasers informam que as máximas tensões reversas suportáveis estão em torno de 1,5 a 2,5 V. Caso o Laser seja polarizado reversamente, com tensões maiores de 2V, mesmo que por períodos extremamente curtos, as camadas interiores do bloco semiconductor são “furadas”, degradando o conjunto. Nestes casos, se não for possível a eliminação da sobre-oscilação pelo uso de filtros etc, os fabricantes recomendam o uso de um diodo de proteção ultra-rápido, ligado junto aos terminais do Laser. Na Figura 3.1-17 é mostrado esse processo.

Figura 3.1-17) Uso de Diodo Schottky para Proteção

O Diodo S1 deve ser rápido o suficiente para conduzir a sobre-oscilação negativa, evitando a polarização reversa do Laser. Normalmente são utilizados diodos Schottky, tal como o IN5818, que possui velocidade da ordem de 20 ns.

O controle de potência dos Laser Semicondutores usualmente é realizado através de circuitos eletrônicos. Estes circuitos, de maneira geral, medem a potência óptica de saída do Laser e a partir daí, controlam a corrente de alimentação deste, visando manter a primeira dentro dos valores desejados.

Para o monitoramento da potência, na maioria dos casos, se usa um fotodiodo adequadamente posicionado, de forma a medir uma proporção conhecida do feixe de saída total. Felizmente, a maioria dos fabricantes de Diodos Lasers já incorpora dentro do próprio encapsulamento destes um fotodiodo, como mostrado na Figura 3.1-18.

Figura 3.1-18) Encapsulamento Conjunto de Diodo Laser e Fotodiodo Monitor

O fotodiodo é colocado de forma a captar a emissão proveniente da face posterior do Laser semicondutor. Na maioria dos tipos de Laser, a emissão “traseira” é cerca de 1 a 10% da emissão da face principal de saída. Este fato, aliado ao conhecimento do ganho do fotodiodo empregado, permite que o fabricante forneça uma curva característica muito importante para o desenho do circuito de controle.

Uma curva típica é apresentada na Figura 3.1-19:

Figura 3.1-19) Curva Característica do Diodo Laser TOLD9211 Toshiba

A curva relaciona a corrente do fotodiodo monitor com a potência óptica de saída. A partir desta característica é possível projetar o circuito de controle.

Para os Lasers que serão operados no modo contínuo CW, o circuito típico é mostrado abaixo, na Figura 3.1-20.

Figura 3.1-20) Exemplo de Circuito de Controle Diodo Laser (CW)

O circuito pode ser dividido em 4 partes. A primeira, setor 1, corresponde ao circuito de “partida lenta”, que impede o surgimento de surtos durante a energização do circuito. O setor 2 corresponde ao monitor de potência, onde o sinal do fotodiodo interno ao Laser é amplificado e “isolado” pelo circuito operacional CI U1. O sinal proveniente do setor 2 é comparado com a referência Z no setor 3, cuja diferença faz com que o amplificador U2 no setor 4, controle a corrente que flui no diodo Laser.

A entrada “C” serve para introduzir modulações de baixa frequência na saída do Laser, através da soma do sinal de controle ao sinal proveniente do fotodiodo monitor. Daí se pode observar a facilidade com que o diodo Laser pode ser modulado. Os Lasers CW podem ser modulados facilmente em frequência de até alguns MHz.

Isso os torna extremamente interessantes para certas aplicações, pois permitem o uso de formas elaboradas de amplificação do sinal óptico, ajudando a eliminar a influência de sinais espúrios, tais como fontes luminosas, ruído solar etc.

Uma preocupação que se deve ter é a de evitar que a modulação aplicada ultrapasse o valor máximo de potência. A modulação pode ser efetuada de 2 formas nos Lasers CW. A primeira é simplesmente chavear a corrente de controle de forma “digital”, ou seja 0% e 100% de corrente de regime. A outra forma é somar um sinal AC, modulante, diretamente sobre a corrente de polarização. Na Figura 3.1-21 é esquematizado o processo.

Figura 3.1-21) Modulação em Diodos Lasers

A fonte DC é a responsável pela polarização do diodo Laser num ponto conveniente da curva-resposta. O gerador AC soma uma componente, produzindo a modulação desejada. Os filtros de Transientes (normalmente bobinas com o núcleo de alta perda), servem para evitar que os ruídos de modulação atinjam a linha de alimentação, isolando o restante do circuito dos transientes de alta frequência.

Em operação pulsada, o circuito deve ser capaz de ajustar a potência somente levando em conta o valor de pico desta, e não o valor médio. O diagrama de blocos de uma fonte pulsada é mostrado Figura 3.1-22.

Figura 3.1-22) Esquema de Fonte para Diodo Laser Operando em Regime AC

O controle de potência é efetuado pela comparação entre a referência e o valor armazenado pelo circuito detector de pico, que monitora a potência óptica. O pulso é aplicado diretamente no controle de corrente do Laser. Este método é utilizado quando

os pulsos são de baixa frequência ou quando possuem largura relativa de 5 a 50% do ciclo de repetição.

Quando se deseja comandar diodos pulsados as configurações mudam muito. Como já visto, os Lasers pulsados operam com larguras de ciclo em torno de 0,1%. Assim, um Laser trabalhando na taxa de repetição de 10kHz por exemplo, necessita que o circuito de potência que o alimenta, seja capaz de chavear em períodos menores de 100ns. Como a corrente de pico necessária para um Laser típico de 1,5W, está em torno de 3A, se observa a dificuldade técnica imposta. Os métodos tradicionais de chaveamento direto de um transistor, FET ou mesmo SCR, não atingem a velocidade necessária. Os FETs, que são os mais rápidos, costumam levar de 20 a 50ns para entrar em condução plena, e mais alguns 150ns, para entrar em estado de não condução, nas correntes típicas de 3 a 10A.

Normalmente, nestes casos, o processo utilizado é aquele esquematizado na Figura 3.1-23.

Figura 3.1-23) Método de Controle para Lasers Pulsados

Durante o período de não condução de Q1, o capacitor C é carregado por R2, de acordo com o valor proveniente do circuito de controle de potência. Geralmente se tem 99% do período de ciclo de repetição para que C atinja o valor necessário de carga. Ao se disparar Q1, C é descarregado por R1 e pelo Diodo Laser. O valor da carga armazenada em C é escolhido de forma que produza um pico de corrente, limitado por R1, durante o tempo de duração necessário. A curva de chaveamento é mostrada a seguir, na Figura 3.1-24

Figura 3.1-24) Curva de Corrente em Fontes Pulsadas

A vantagem deste método está na possibilidade de utilização de pulsos largos para o comando do transistor FET Q1. As ligações, no entanto, devem ser as mais curtas possíveis, principalmente em C, R1 e Q1, para evitar efeitos indutivos provenientes da fiação, que além de limitar a velocidade de subida da corrente, produz sobre-oscilações que podem danificar o Laser. O Diodo Schottky S1 objetiva minimizar o efeito das sobre-oscilações reversas na junção. Recentemente, alguns fabricantes começaram a construir todo o conjunto Laser + C + R1 + Q1 num mesmo encapsulamento e, algumas vezes, no mesmo bloco semicondutor, visando aumentar as velocidades atingidas. O modelo SFH311 da LDP por exemplo, atinge pulsos de largura 20ns na taxa de repetição 50kHz, com picos de corrente da ordem de 30A, produzindo cerca de 20W de potência. A largura do pulso de comando pode ser de até 1 μ s. LDP (1994).

É importante lembrar que se o Laser estiver colocado a uma distância grande do circuito de controle de potência, o cabo condutor deve possuir uma impedância casada para evitar o surgimento de transientes, principalmente se o Laser for controlado de forma pulsada.

Uma vantagem dos Diodos Lasers Semicondutores é sua imunidade a ruídos mecânicos, ou vibrações. Por causa das suas pequenas dimensões, os diodos Lasers são praticamente imunes às vibrações normalmente encontrados nos ambientes industriais. Outros tipos de Laser, como por exemplo o Hélio-Neônio, são sensíveis devido à sua geometria e características construtivas, modulando a potência luminosa do feixe de saída de acordo com a vibração presente.

3.1.2 O Laser de Hélio-Neônio.

O Laser de Hélio-Neônio foi até recentemente o mais comum, e barato, de todos os Lasers. Este tipo de Laser emite a 632,8nm. As potências vão de 0,5mW até 50mW, predominantemente de maneira contínua. Os Lasers de Hélio-Neônio são construídos normalmente com um tubo de vidro selado, onde uma mistura de gás Hélio e Neônio em proporção de 10/1 a 7/1 é colocada à pressão de ordem de 1 Torr. O aspecto geral de um tubo de Laser HeNe é mostrado na Figura 3.1-25.

Figura 3.1-25) Aspecto de um Laser de HeNe

Uma descarga elétrica é gerada através de uma fonte DC entre 1 e 8kV, produzindo uma corrente que flui pelo tubo capilar entre os polos + e -. Os átomos de Hélio são excitados pela colisão dos elétrons da descarga, até um nível coincidente a um estado excitado do Neônio. Durante as colisões a energia é transferida do Hélio para o Neônio. Neste estado, o Neônio perde alguns elétrons excitados para os níveis intermediários disponíveis. A diferença de energia entre estes níveis equivale a uma radiação de comprimento de onda 632,8nm. Este valor é selecionado através do uso de filtros dielétricos multicamada nos espelhos no extremo do capilar. Os filtros permitem que o sistema somente apresente ganho neste comprimento de onda.

O feixe de Laser de Hélio-Neônio possui divergência mínima, da ordem de 0,5m radiano, característica que permite, em muitas aplicações, o seu uso dispensando qualquer tipo de óptica colimadora. Tal fato também facilita o projeto de lentes colimadoras. Esta característica é muito útil em sistemas de alinhamento, indicadores luminosos, etc. Outra característica muito útil é a alta coerência do feixe gerado. Comprimentos de coerência da ordem de 0,1 a 0,2 metros são comuns, e com auxílio de estabilizadores, é possível atingir até cerca de 1.000 metros. Esta característica explica sua grande utilização em medidores interferométricos.

Normalmente, os Lasers Hélio-Neônio operam no modo transversal básico, TEM₀₀, produzindo um feixe de perfil Gaussiano nos dois eixos ortogonais. No entanto, devido a desalinhamentos, ou mesmo deliberadamente, outros modos transversais podem aparecer. Na Figura 3.1-26 é mostrado o aspecto de tais modos.

Figura 3.1-26) Modos Transversais Eletromagnéticos Possíveis em uma Cavidade Laser

Apesar de todas essas características positivas, uma séria desvantagem do Laser HeNe se refere à dificuldade de modulação do seu feixe de forma econômica, por meios eletrônicos.

A curva na Figura 3.1-27 esquematiza o comportamento entre corrente de descarga e a tensão de operação.

Figura 3.1-27) Comportamento Tensão X Corrente de um Laser HeNe

Para se produzir uma corrente de excitação pelo tubo, é necessário que a tensão de disparo atinja cerca de 8KV. Feito isso, a corrente aumenta bruscamente enquanto a tensão diminui. Neste momento, normalmente a fonte não consegue suprir a corrente e a descarga se interrompe forçando novo disparo. A descarga gasosa portanto, é eminentemente instável, não seguindo as leis de Ohm. Para estabilizar a descarga, a forma mais comum é a colocação em série com o tubo Laser de um resistor somando uma componente “Ohmica”, como indicado na Figura 3.1-28.

Figura 3.1-28) Uso do Resistor de Lastro para Estabilizar a Descarga

Esta resistência é chamada de Resistência de Lastro (Ballast) e é muito comum em Lasers de estado gasoso excitados por descarga elétrica. O comportamento resultante da soma entre a impedância não Ohmica do Laser e a resistência em série, produz uma região “confortável”, onde a operação do Laser pode ser estabilizada. Contudo, é necessário que a fonte de alta tensão mantenha a corrente de descarga dentro de valores “estáveis”. A fonte deve ser construída com a topologia de controle mais comumente denominada de “fonte de corrente constante para alta tensão”. A lógica de controle deste tipo de fonte procura variar a tensão aplicada, visando manter a corrente de operação constante, no chamado “Ponto Quiescente”. Esta topologia também é justificada dado o comportamento da potência óptica de saída, esquematizado na Figura 3.1-29.

Figura 3.1-29) Comportamento Óptico versus Corrente de Operação

Para se obter potência máxima, é necessário que a corrente esteja num determinado valor. Caso esta diminua, a potência cai até cerca de 20% e entra na região instável, fazendo com que o Laser fique intermitente. Caso a corrente suba, a potência também cai, produzindo sobre-aquecimento e desgaste do catodo.

Conclui-se que por meios puramente eletrônicos, raramente se obtém mais que 20% de taxa de modulação com Laser Hélio-Neônio. Modulações maiores que este valor somente são obtíveis através de modulações externas, através de dispositivos auxiliares. Outra desvantagem é que os tubos Lasers HeNe são construídos de vidro ou cerâmica, devendo ser cuidadosamente alojados para evitar choques ou vibrações que possam danificá-los. Vibrações mecânicas podem “modular” a potência, devido a oscilação do capilar central, produzindo ruídos indesejáveis no feixe.

As deformações térmicas também são elevadas, daí o costume de se deixar o Laser estabelecendo o equilíbrio térmico, antes de tomar medidas que exijam precisão. O feixe Laser nesta situação exibe pequenas oscilações angulares que podem causar problemas em certas situações, como por exemplo em medidores de alinhamento. (“*Beam Point Stability*”).

3.1.3 Outras fontes luminosas

Além dos Diodos Laser e do Laser de Hélio-Neônio, as outras fontes luminosas mais comumente encontradas nos medidores de distância para uso industrial são os LEDS e as lâmpadas incandescentes. Os LEDS são Diodos luminescentes, que emitem luz pela passagem de corrente por uma junção PN. Os leds são simples, baratos, altamente confiáveis, robustos e emitem luz com banda relativamente estreita, podendo essa luz ser filtrada para evitar a interferência da luz ambiente.

No entanto, os LEDS possuem baixa potência, e devido às características construtivas, não emitem um feixe de forma colimada, e sim de forma difusa, sobre uma área de dimensões consideráveis, impedindo que sejam colimados eficientemente. Principalmente devido a esta última característica, são pouco utilizados nos medidores de distância, exceto os modelos mais simples, detectores de presença ou “chaves luminosas”.

As Mini Lâmpadas Incandescentes são baratas, possuem potência elevada, são simples de operar, entretanto, apresentam distribuição espectral larga, sendo difícil de isolá-las da luz ambiente. São difíceis de serem colimadas, e também por esta razão, pouco utilizadas nos medidores de distância.

Laser de NdYAG, CO₂, Argônio etc, também não são utilizados devido às suas dimensões, custos e complexidade, sendo restritos a utilizações Militares ou Cartográficas.

3.1.4 Quadro resumo das características dos Sistemas Iluminadores

Na tabela seguinte são relacionados as diversas características das fontes luminosas discutidas, que possuem características viáveis para utilização em medidores de distâncias.

	Diodo Laser	HeNe	LED	Lâmpada Incandescente miniatura
Potência	de 0,5mW a 5W CW até 30W pulsado	0,5 a 50mW	0,01 a 10mW	até 200W
Disponibilidade espectral mais comum	de 630 até 1.500nm	632nm	450 a 1.550nm	“branco”
Comprimento de coerência	0,05 a 25mm	0.1m a 1.000m	<0,05mm	<0,001mm
Dimensões	pequenas	grandes	pequenas	médias
Confiabilidade	pequena	média	alta	média
Custo	médio	alto	baixo	baixo
Colimação, facilidade	média	alta	baixa	baixa
Sensibilidade à vibração	pequena	grande	nenhuma	média
Vida estimada	até 10 ⁵ h	até 2x10 ⁴ h	>10 ⁵	<200h

Tabela 3.1-2)Características Típicas dos Sistemas Iluminadores

Nos medidores de distância, o Laser Semicondutor é o sistema iluminador mais utilizado. Cobre as faixas de 0,5 a 5mW CW visível e em alguns casos até 50mW pulsado no infravermelho. Suas pequenas dimensões e facilidade de modulação são determinantes em muitos casos.

É importante ressaltar que o uso de Laser num medidor de distância impõe que o sistema obedeça à normas de segurança com relação à potência óptica utilizada. Como regra geral, quanto maior a potência maior é a complexidade e redundância requerida do sistema de segurança, exigidas pela norma. Por esta razão, somente em casos especiais as potências ultrapassam 5mW. Na referência FDA (1985) são descritas as exigências da norma “CDHR CFR 1040 Subchapter J” dos EUA, norma esta a pioneira e mais comumente aplicada.

3.2 Sistema Captador

O Sistema Óptico Captador é o responsável pela coleta da luz espalhada, proveniente do alvo que está sendo iluminado, e a conseqüente formação da imagem deste sobre o sensor de posição eletrônico.

É fácil concluir, portanto, que a qualidade da imagem formada pode influenciar na precisão do sistema, principalmente por ser esse elemento, o responsável direto pela geração da informação de posição do alvo.

O objetivo da discussão que se segue é apresentar os diversos fatores que podem afetar o desempenho de um conjunto de lentes captadoras, e a influência destes no desempenho de um medidor de distância por triangulação. O cálculo óptico, por ser um assunto vasto e extremamente especializado, não será coberto aqui, recomendando-se as referências KINGSLAKE (1978, 1983) e também HECHT (1987).

Todo o cálculo teórico do funcionamento dos medidores por triangulação, executado no capítulo 2, foi baseado no fato de que as lentes eram “ideais”, ou seja, a imagem era tratada como uma transformação ideal, sem distorções.

No entanto, devido principalmente ao fato das lentes serem compostas de superfícies esféricas, alguns desvios surgem, comprometendo a qualidade da imagem formada.

Como já foi dito, num medidor de distância, o objetivo da lente captadora é coletar a luz proveniente do alvo e criar uma imagem sobre o sensor de posição. Numa lente ideal, a imagem produzida corresponde a um ponto bem definido, e o movimento da imagem corresponde diretamente a uma transformação linear do movimento da superfície alvo. Infelizmente, as lentes reais possuem características que tornam a imagem um ponto indefinido e distorcido. Estas distorções são chamadas de Aberrações.

Existem vários tipos de aberrações que influem no comportamento da lente de formas diversas, e muitas vezes a correção de um tipo pode causar um agravamento de outro. Assim, uma lente deve ser desenhada de acordo com sua finalidade e as correções das diversas aberrações deve seguir o objetivo prioritário para o qual o sistema se destina.

Existem 7 tipos de aberrações, que serão descritas sucintamente a seguir.

3.2.1 Aberração Esférica

A Aberração Esférica, como o nome já sugere, provém da aproximação normalmente executada ao se construir uma lente, usando superfície esférica ao invés de se usar a superfície teórica ideal, uma curva cônica. O efeito da Aberração Esférica é evidente quando se tenta colimar um feixe luminoso paralelo. Neste caso, cada zona anular da lente possui uma distância focal ligeiramente diferente, resultando numa imagem global distorcida, como mostrado na Figura 3.2-1.

Figura 3.2-1) Aberração Esférica Longitudinal e Transversal

Para o feixe pertencente ao anel mais interno, chamado paraxial, a colimação é efetuada na região "A". Para o anel mais externo, chamado Marginal, o foco ocorre em "B". A Distância "A"~"B" corresponde a Aberração esférica presente, "LSA", chamada de Aberração Esférica Longitudinal.

É importante notar que, apesar dos diversos anéis produzirem o foco, ou "Spot", em posições distintas, a imagem produzida, ainda assim, possui um ponto onde a dimensão do "Spot" global é mínima.

A aberração esférica depende acentuadamente do perfil da lente. Outros fatores são a orientação e a posição entre o objeto e a imagem. Pela escolha adequada das curvaturas das superfícies de uma lente, mantendo a distância focal global, é possível obter a diminuição da aberração esférica presente.

3.2.2 Aberração Coma

Um outro tipo de aberração muito comum é a chamada “coma”, que é uma aberração que atinge os feixes não alinhados com o eixo da lente.

Quando um feixe luminoso atinge a lente num ângulo não paralelo ao eixo da mesma, cada anel da lente produz um foco ou "Spot" de diferente tamanho e posição no plano da imagem. O resultado é um "Spot" distorcido lembrando a forma de um cometa com sua cauda, daí o seu nome.

Figura 3.2-2) Aberração Coma

A correção da Coma pode ser executada pelo encurvamento das superfícies, pela combinação de efeitos de sinal oposto de várias lentes ou superfícies, ou mesmo pela escolha adequada de barreiras que impeçam que raios provenientes de muitos campos distintos, formem a imagem conjuntamente. Estas barreiras são chamadas de “field stops”, ou limitadores de Campo.

Figura 3.2-3) Uso dos Limitadores de Campo para Redução da Aberração Coma

Para sistemas ópticos em que a imagem está posicionada simetricamente com relação a fonte ou objeto, ou seja distâncias finitas entre ambos, de mesma magnitude, é observada uma redução significativa da Coma. Este artifício é muito usado quando se deseja diminuir seus efeitos. É importante notar que mesmo uma lente corrigida para aberração esférica pode conter Coma. Uma lente que é corrigida tanto para aberração esférica quanto para Coma é conhecida como lente "Aplanática"

3.2.3 Curvatura de Campo

Na maioria dos sistemas ópticos, e em especial nos medidores de distância, deseja-se que a imagem forme uma superfície plana. Infelizmente, na maioria dos casos, a imagem tende a formar uma superfície curva.

Lentes convergentes tendem a possuir superfícies focais côncavas e lentes divergentes, convexas. A curvatura de campo normalmente pode ser atenuada pela combinação de lentes de potência e curvaturas cuidadosamente selecionadas. Algumas lentes, chamadas de "Field Flatteners" são especialmente desenhadas para corrigir a curvatura de campo conjugada de um sistema óptico.

Figura 3.2-4) Curvatura da Superfície Focal

3.2.4 Astigmatismo

O Astigmatismo corresponde à aberração na qual uma imagem de um ponto não axial aparece como um par de linhas focais distintas, uma delas radial ao ângulo de entrada e a outra tangencial a este. Neste, caso a curvatura do campo possui duas superfícies focais distintas. Na Figura 3.2-5 é esquematizado o fenômeno.

Figura 3.2-5) Esquema do Astigmatismo

A posição focal tangencial é distinta da posição focal sagital. A separação entre estes pontos é a medida do Astigmatismo. Quando uma lente não possui astigmatismo, a curvatura de campo assume a forma parabolóide e é chamada de superfície de Petzval.

O Astigmatismo depende da curvatura e perfil da lente, e também, da disposição do objeto e imagem com relação ao sistema óptico. Porém, na maioria das vezes, não é possível eliminar esta aberração sem introduzir outras.

3.2.5 Distorção

A distorção é a única aberração que não afeta a qualidade da imagem em termos de contraste ou foco. Esta aberração afeta o perfil da imagem, evitando que esta seja uma " projeção" linear do objeto. Na Figura 3.2-6 é mostrado o sintoma:

Figura 3.2-6) Distorção Óptica

Esta aberração normalmente não é muito relevante, salvo em alguns sistemas onde a imagem deve possuir propriedades "metrológicas", como em projetores de Perfis. Novamente, para sua correção são usados conjuntos de distorções simétricas, com a finalidade de cancelar os efeitos negativos. Nos Medidores de Distância, esta distorção pode comprometer a relação entre os deslocamentos da imagem e o objeto, mesmo quando estes são colocados no mesmo plano.

3.2.6 Aberração Cromática Axial e Lateral

Como os materiais ópticos usados nas lentes possuem índice de refração variável com relação ao comprimento de onda, nem sempre a posição de uma imagem num determinado comprimento de onda coincide com a mesma imagem em outro comprimento de onda. Normalmente nos vidros ópticos, o índice de refração para luz no "azul" é maior que no "vermelho". Ao se usar um feixe de luz "branco", no foco serão observados anéis coloridos, como mostrado na Figura 3.2-7.

Figura 3.2-7) Aberração Cromática Axial e Lateral

A distância entre o ponto focal "azul" e o ponto "vermelho" é chamado de Aberração Cromática Longitudinal (ou Axial).

Quando um feixe luminoso atinge a lente formando um ângulo com relação ao eixo desta, os componentes da luz de comprimento de onda distintos se desviam de forma diferente, como também mostrado na Figura 3.2-7. A distância entre as diferentes alturas dos raios no plano focal corresponde à Aberração Cromática Lateral.

A Aberração Cromática é, com frequência, a mais evidente num sistema óptico, sendo aquela que, prioritariamente, se dedicam as maiores atenções, visando sua eliminação. Para tanto, são usados conjuntos de lentes com materiais distintos com o objetivo de anular seus efeitos. Uma lente ou conjunto de lentes que apresente aberração cromática nula ou bem reduzida é chamada de Lente "Acromática". Felizmente, nos medidores de Distância, por usarem Lasers "monocromáticos", esta aberração não se aplica.

3.2.7 Influência da Geometria das Lentes nas Aberrações

A maioria das Aberrações aqui descritas são produzidas devido a utilização de superfícies esféricas. Assim, é de se esperar que o grau de magnitude de aberrações dependa de alguns fatores geométricos que definem tais lentes.

Na Tabela 3.2-1 são indicados os fatores de proporcionalidade entre as aberrações, a abertura Φ da lente, o ângulo de entrada φ , e o tamanho da imagem h .

Aberração	Abertura	Campo Angular	Altura da Imagem
Aberração Esférica Longitudinal	Φ^2	-	-
Aberração Esférica Lateral	Φ^3	-	-
Coma	Φ^2	φ	h
Astigmatismo	-	φ^2	h^2
Curvatura de Campo	-	φ^2	h^2
Distorção	-	φ^3	h^3
Aberração Cromática	-	-	-

Tabela 3.2-1) Fator de Proporcionalidade entre a Geometria da Lente e as Aberrações Comuns

Como regra geral conclui-se que quanto menor a abertura, o campo angular e o tamanho da imagem, melhor é o comportamento da lente quanto à ausência de aberrações.

Como já visto na descrição das aberrações, elas podem, muitas vezes, ser diminuídas através da adequada escolha das curvaturas presentes. Uma lente com distância focal f , pode ser construída de diversas formas e materiais. Ou seja, dada uma distância focal, é possível escolher diversos conjuntos de raios ou curvaturas, que combinadas mantenham f . Esta técnica permite a diminuição considerável de várias aberrações, conforme está indicado na Figura 3.2-8.

Nesta figura são mostradas as aberrações Esféricas e Coma em função do fator de forma, ou fator de curvatura da lente, determinada pela razão entre a curvatura da superfície frontal $c_1 = 1/r_1$ e a curvatura total $c = 1/r_1 + 1/r_2$.

Figura 3.2-8) Efeito do Fator de Curvatura de uma Lente na Aberração Esférica, Mantida uma Mesma Distância Focal Global, para Conjugado Infinito

O fator de forma também pode alterar os valores das aberrações de astigmatismo e distorção. A curvatura de campo, por depender da curvatura global, não se altera sem apelar para outros conjuntos auxiliares. Vide Figura 3.2-9

Figura 3.2-9) Efeito da Curvatura de uma Lente no Astigmatismo, Distorção e Curvatura de Campo, para Conjugado Infinito

Lentes convergentes geralmente exibem aberrações esféricas de sinal oposto àqueles produzidos por lente divergentes. Alterando-se o perfil de uma lente, ou seja, as curvaturas das superfícies, mantendo a mesma distância focal conjunta, é possível aumentar ou diminuir a aberração esférica presente. Pela combinação de lentes convergentes "Subcorrigidas" e divergentes "Supercorrigidas", é possível obter a redução significativa da aberração global. Esta é uma forma comum e eficiente de diminuir este tipo de aberração, sendo uma característica importante dos chamados "doubletos", onde uma lente convergente é colada em outra divergente. O mesmo ocorre com os outros tipos de aberrações. Assim, uma superfície pode contribuir com sinal oposto a outra, mantendo o conjunto globalmente corrigido.

3.2.8 Resolução Limite

Mesmo quando uma lente ou sistema óptico está completamente livre de aberrações, a imagem de um ponto luminoso não é exatamente um ponto bem definido, mas sim uma região difusa. Este fenômeno é resultante do efeito da difração da luz ao passar por uma abertura de tamanho finito, no caso a abertura do sistema. Na Figura 3.2-10 é esquematizado esse efeito.

Figura 3.2-10) Espalhamento da Imagem de um Ponto

Ao invés de um ponto bem definido, a imagem assume uma distribuição de intensidade crescente, sendo esta chamada de "Distribuição de Airy". A maior parte da luz é concentrada numa região central cujo tamanho, ou raio r , depende da abertura do sistema óptico e que pode ser representado pela equação seguinte. SIROHI e KOTHIYAL (1991), HECHT (1987).

$$r = \frac{0.61 \cdot \lambda}{d \cdot \sin \theta} \quad (3-4)$$

que pode ser simplificada para:

$$\sigma = \frac{1.22 \cdot \lambda}{A} \quad (3-5)$$

onde:

λ comprimento de onda.

σ máxima resolução angular do sistema.

A abertura do sistema.

Para entender o termo resolução limite, basta agora considerar o mesmo sistema óptico, captando a luz de 2 pontos luminosos, de mesma intensidade. Cada ponto vai formar uma imagem com a “distribuição de Airy”. Se os dois pontos apresentarem suas imagens superpostas devido a dispersão, o sistema é incapaz de perceber a existência dos dois pontos. Assim, conclui-se que existe uma separação angular mínima entre as partes, de forma que suas imagens não sejam superpostas. Em outras palavras, dado um sistema óptico, existe uma máxima separação angular discernível, σ . Esta separação depende do comprimento de onda λ e da abertura A do sistema. A situação é esquematizada na Figura 3.2-11.

Figura 3.2-11) Resolução Limite

Portanto, uma lente sempre possui uma resolução limite, imposta pelo limite de difração da luz, e determinada pela abertura do conjunto. Devido às aberrações, a resolução diminui ainda mais, porque piora a distribuição luminosa.

Uma forma de se medir a máxima resolução de uma lente real, é dada pela chamada Função Transferência de Modulação (MTF).

A imagem de um padrão de linhas claras e escuras, é apresentada para o sistema. Sua imagem é captada e as intensidades dos pontos mais claros e escuros são registradas. Na Figura 3.2-12 está representado esse processo.

Figura 3.2-12) O Conceito da Função Transferência de Modulação

O termo M_i (contraste da Imagem) é definido como:

$$M_i = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (3-6)$$

Onde I_{max} e I_{min} são as intensidades mínimas e máximas da imagem resultante. Se o contraste é máximo I_{min} é zero, sendo $M_i = M_o$, (M_o contraste do objeto).

No caso particular do padrão fornecido possuir perfil senoidal, o MTF é definido como:

$$MTF = \frac{M_i}{M_o} \quad (3-7)$$

O termo MTF define o contraste que a imagem exhibe, em função da frequência espacial desta. Para um sistema sem aberrações, o MTF é zero quando a resolução atinge a resolução limite, definida pela Distribuição de Airy.

É importante também salientar que o MTF de um sistema óptico composto por vários elementos, é obtido simplesmente pela multiplicação dos MTFs de cada um.

3.2.9 Requisitos para o Desenho da Lente Captadora para os Medidores de Distância

Introduzidas as principais aberrações, se deve entender quais são aquelas que podem influenciar na qualidade de um Medidor de Distância.

Como na maioria das vezes o sistema iluminador é composto por um Laser, e portanto um sistema monocromático, as aberrações cromáticas podem ser descartadas. Tal fato de imediato simplifica muito o desenho óptico.

Já as aberrações esféricas, coma e astigmatismo, sem esquecer a curvatura de campo, devem ser estudadas com cuidado. As aberrações esféricas, coma e o astigmatismo influem na qualidade do "spot" formado sobre o sensor.

Alguns sensores como os Fotodiodos de Efeito Lateral possuem a propriedade interessante de "integrar" o "spot", gerando sinais elétricos que são equivalentes àqueles produzidos por um ponto luminoso localizado no "centro de massa" do "spot". Assim, aberrações simétricas como a esférica e o astigmatismo não são de todo nocivas. No entanto, a aberração Coma por sua característica assimétrica do ponto de vista de formação de "spot" pode induzir os erros. Também nos sensores discretos, como CCD ou Fotodiodo de Quadrante, "Spots" distorcidos podem causar erros na posição estimada.

Como as aberrações dependem fortemente da abertura da lente de captação, esta deve ser desenhada com as menores dimensões possíveis. Algumas vezes a abertura é determinada por fatores radiométricos, ou seja, visando obter potência óptica suficiente para produzir um sinal elétrico manipulável. Contudo, sempre que houver a possibilidade de uso de um Laser mais potente, mantendo a óptica de captação pequena, é recomendável que assim se proceda por vários motivos, entre eles:

- Aumentando a potência do Laser se eleva o contraste entre este e a iluminação ambiente, tornando o sistema mais imune aos ruídos ópticos.
- Mantendo a óptica de captação pequena, além das aberrações diminuírem, também diminuem as áreas ópticas passíveis de serem atingidas por choques ou sujeiras, principalmente quando o medidor trabalha em áreas agressivas.
- Óptica de captação com abertura pequena normalmente significa um número menor de lentes para atingir o mesmo nível de aberrações críticas. Lentes pequenas e em quantidades reduzidas permitem o desenho mecânico mais compacto.

Por outro lado, nem sempre é possível aumentar a potência do Laser. Mesmo desprezando alguns fatores como o custo, existem normas de segurança que limitam a potência máxima de um sistema Laser. Vide referência FDA (1985).

Um fator importante a ser destacado é que os sistemas ópticos trabalhando com magnificação próxima a unitária, apresentam características ótimas quanto a várias aberrações. Trabalhar na magnificação unitária significa que a distância entre o objeto alvo e a lente de captação é igual a distância entre a lente e a imagem sobre o sensor. Tal situação denomina-se Conjugado Finito Unitário.

Neste caso, o perfil da lente pode ser trabalhado com a finalidade de diminuir a aberração esférica, e como consequência do conjugado unitário, o sistema passa a ser simétrico, eliminando as aberrações Coma, Astigmatismo, e Distorção. Portanto, como regra geral, os sistemas ópticos de captação devem ser projetados com conjugados próximos ao unitário e com aberturas menores possíveis.

Infelizmente, nos medidores de distância, normalmente os campos angulares de captação são grandes, gerando aberrações indesejáveis. Muitas delas, como a distorção, não são eliminadas. Nestes casos a solução se resume a conviver com estes

erros, e minimizar seus efeitos através de procedimentos de calibração. Em outras palavras, os erros são mapeados e armazenados, sendo seus desvios descontados no momento da apresentação do resultado.

Embora a abertura deva ser pequena, não se pode esquecer que a resolução limite de um sistema óptico também depende desta abertura, e tende a piorar a medida em que esta diminui. Desse modo, uma solução de compromisso, às vezes, é necessária.

3.2.10 Desenho de Lentes Destinadas a Medidores de Distância

Apresentadas as principais estratégias de correção de aberrações, o próximo passo é desenhar um conjunto óptico visando sua aplicação num medidor. A seguir são apresentadas as principais linhas de raciocínio. A discussão se limitará aos meios e processos mais comuns, deixando o projeto em si para ser discutido no capítulo 4, onde o Medidor MD50 é discutido em detalhes.

Com a disponibilidade atual de programas para cálculos ópticos, o trabalho de se projetar uma lente com características desejadas se tornou muito mais prático. Um tratamento teórico detalhado raramente se justifica, quando confrontado com a facilidade e rapidez oferecidas por um programa de cálculo óptico.

Assim, hoje em dia, dependendo do projeto é mais prático e objetivo se basear em projetos clássicos e modificá-los, via "Software", para cada aplicação específica.

Como já foi visto, para um medidor de distância, as seguintes condições de contorno se apresentam:

- Razões de conjugado finito normalmente próximo da unidade.
- Aberturas devem ser pequenas.
- O sistema não deve possuir aberrações esféricas, coma e astigmatismo, e as menores distorções e curvaturas de campo.
- Aberrações cromáticas são desprezadas.

Com base nestas condições, é possível procurar em alguns compêndios de projetos ópticos, tais como a referência LAINKIN (1990), e então escolher algum projeto base.

Os projetos mais comuns, usados nos Medidores de Distância são os Doubletos ou Tripletos "Aplanáticos", ou seja livres de aberração esférica e coma. Na referência KINGSLAKE (1989) são descritos alguns projetos detalhadamente, mostrando as condições geométricas e ópticas necessárias para um bom desempenho.

Os Doubletos são os projetos clássicos, onde se obtém boa correção de aberrações esféricas. Impondo a condição de conjugado finito pode-se obter a diminuição do Coma, e o efeito da distorção e curvatura de campo podem ser minimizadas através do uso de aberturas pequenas.

Os tripletos podem ser do tipo Steinhel ou mesmo uma combinação de Doubleto e um menisco corretor. O tripleto de Steinhel, para conjugados finitos variando do unitário até 5, permitem boas correções. Os tripletos discretos, separados, compostos por um doubleto e um menisco permitem, em certos casos, obter bons conjuntos. Na Figura 3.2-13 são indicados os aspectos desses conjuntos.

Figura 3.2-13) Aspecto de Algumas Geometrias de Lentes Típicas

Para o projeto de uma lente captadora é necessário conhecer, já de antemão, as posições relativas desejadas entre o campo de medida, a lente captadora, e o sensor de imagem. Para isso, as equações já explanadas no capítulo 2 são suficientes. Como produto daquelas equações é possível obter um esboço da geometria do medidor. Deve-se observar que, naquelas equações, somente a distância focal f é dada como parâmetro de definição da lente.

Um projeto de doubleto ou tripleto normalmente é usado como estimativa preliminar. Para se atingir a distância focal preliminar f , o sistema é escalado (multiplica-se todos os raios e espessuras por uma constante). Uma tabela relacionando os pontos de medição com as respectivas imagens sobre o sensor deve ser levantada com o auxílio do desenho mecânico preliminar. Esta tabela corresponderá, portanto, às posições do objeto e imagem desejadas para o sistema óptico que está sendo projetado.

Com o auxílio de programas de cálculo óptico, como o SODA, CODE V, ou GENNI II, o projetista introduz tais tabelas e geometrias preliminares. Feito isso, instrui-se o sistema para minimizar as aberrações e fornecer as previsões de "Spot" sobre o sensor, bem como o passeio da imagem sobre este.

A princípio, quanto menor o "spot" sobre o sensor, melhor será o desempenho deste. No entanto, nem sempre um "spot" pequeno é possível, e assim, deve-se buscar uma solução onde este seja bem definido, com fronteiras bem acentuadas, objetivando aumentar o contraste sobre o sensor. É importante lembrar que o ponto iluminado pelo Laser no alvo, possui dimensões não desprezíveis. "Spots" ao redor de 0,2mm são comuns e portanto são "projetados" sobre o sensor, de acordo com a magnificação do sistema.

Correções são efetuadas nas lentes e nos posicionamentos relativos. Algumas vezes, correções mecânicas são necessárias. Conclui-se, portanto, que o desenho da óptica é um processo iterativo, não possuindo solução única, permitindo margens de aplicação de critérios práticos.

3.3 Sensores Ópticos

Neste item são descritos os sensores ópticos mais utilizados nos medidores de distância, principalmente aqueles usados no método de triangulação. Não são realizados estudos aprofundados relativos aos princípios físicos em que tais dispositivos se baseiam. A ênfase é dada ao aspecto de utilização e às consequências da adoção de um modelo no desenho geral de um medidor de distância.

Os principais tipos de sensores são os fotodiodos de silício, sensores de quadrantes, sensores discretos tipo CCD e os sensores por efeito lateral.

Válvulas Fotomultiplicadoras, "Vidicons" e outros sensores usados no passado não são aqui descritos, recomendando-se as referências HOBSON (1978) e ROSS (1979) para uma abordagem mais detalhada.

3.3.1 Os Fotodetectores de Silício, ou Fotodiodos

Os fotodiodos são transdutores usados para converter energia luminosa em energia elétrica. A maioria dos fotodiodos funcionam baseados no princípio de que quando a junção semicondutora é iluminada, uma corrente elétrica é produzida internamente como produto da absorção dos fótons e a consequente criação de "pares - elétrons - buracos". Na junção, os elétrons assim criados caminham para o lado "N", e os buracos para o lado "P".

Existem diversos tipos de estruturas internas para os fotodiodos e várias técnicas de construção e utilização. Para um estudo mais detalhado recomenda-se as referências BHARDWAJ (1982), ROSS (1979).

Nos medidores de distância, no entanto, as arquiteturas por "Difusão Planar" e "Barreira de Schottky" são mais comuns. Na Figura 3.3-1 é esquematizado o modelo por Difusão planar.

Estes tipos de dispositivos são construídos basicamente pela difusão de boro (dopante P) e fósforo (dopante N) nos lados opostos de um bloco quase intrínseco de silício. Daí o nome de "Fotodiodo PIN". A região sensível à luz, denominada como área ativa, é definida através de uma máscara de SiO_2 .

Figura 3.3-1) Estrutura Básica de um Fotodiodo por Difusão Planar

A área ativa age como o Anodo, onde é colocada um pequeno contato de alumínio. Do lado oposto, o Catodo, é executada uma camada metalizada também de alumínio, de baixa resistência. Este tipo de construção é comum em sensores de pequenas e médias dimensões, pois são as que apresentam melhores características de ruído e estabilidade.

Devido ao processo de fabricação, sensores de áreas maiores são construídos com base em outra estrutura chamada de "Barreira de Schottky".

Neste dispositivo, uma fina camada de ouro é evaporada sobre um bloco tipo N- de silício. Preliminarmente, um dopante tipo fósforo é difundido no lado oposto para formar uma camada N+. O aspecto do dispositivo é indicado na Figura 3.3-2.

Figura 3.3-2) Estrutura Básica de um Fotodiodo por Barreira de Schottky

Geralmente, sensores de grandes dimensões usam a estrutura acima, no entanto, o ruído gerado é sensivelmente maior.

Quando um fóton de energia suficiente é captado pelo fotodiodo, é criado um par "elétron-buraco". Os elétrons vão para o lado N e os buracos para o lado P, formando assim uma corrente elétrica. A separação dos elétrons-buracos somente ocorre na região do semiconductor, onde existe um campo elétrico. Este campo existe e possui intensidade suficiente na região central do diodo, na junção entre as regiões N e P, chamada de região de deplexão. Assim, os fótons absorvidos nesta região constituem o grosso da corrente elétrica gerada chamada de fotocorrente. Quando os pares "elétrons-buracos" não se separam, são recombinados, fato que ocorre nas regiões fora da área de deplexão.

Para maior desempenho, um fotodiodo deve ser construído de forma a permitir que o maior número possível de fótons sejam absorvidos pela região de deplexão. Isto é, os fótons não devem ser absorvidos enquanto não atingirem a região da deplexão; e também, por outro lado, devem ser absorvidos antes que ultrapassem esta região. A profundidade que o fóton penetra no material, no caso o silício, é função do comprimento de onda.

Comprimentos de onda curtos, na região do ultra-violeta e azul, são absorvidos perto da superfície do material, enquanto que aqueles fótons de comprimentos de onda grandes penetram profundamente no material. Este fenômeno acaba por definir o comportamento de resposta espectral do fotodiodo.

Na Figura 3.3-3 é mostrada a curva normalizada de resposta típica de um sensor de silício.

Figura 3.3-3) Curva de Sensibilidade Espectral Normalizada de Fotodiodos de Silício

A faixa típica vai do 350nm até 1.100nm, com o pico na região de 700 a 900nm. Esta faixa permite o uso com todas as fontes mais comuns de iluminação, desde Diodo Laser, LEDs, Laser de Hélio Neônio e Lâmpadas.

3.3.1.1 Características e Principais Termos

O circuito equivalente para um fotodiodo é representado na Figura 3.3-4:

Figura 3.3-4) Circuito Equivalente a um Fotodiodo

Observando a figura, é fácil concluir que o fotodiodo age como se fosse um gerador de corrente, I_s controlada pela luz. Entretanto, existem outros componentes que ditam suas características reais.

Existem duas resistências equivalentes. A primeira, R_s corresponde à resistência dos contatos e do material semiconductor intrínseco. Normalmente R_s fica entre 10 e 500Ω. A outra resistência R_{sh} , é uma resistência “shunt”, considerada de perda, que faz com que alguns pares “elétrons-buracos” sejam recombinados sem permitir o uso pleno da corrente foto-gerada. Em sensores de boa qualidade R_{sh} se situa entre 10^7 e 10^{11} Ohms.

O capacitor C_j corresponde a um capacitor imaginário formado pela junção ou pela região de depleção. A capacitância C_j aumenta com a temperatura e área ativa, decaindo com tensões de polarização reversa. Valores de 5pF até 500pF são comuns.

A corrente I_d corresponde a uma corrente de fuga presente mesmo quando o fotodiodo está sem iluminação, com polarização reversa. Tal corrente é mais conhecida por “Corrente de Escuro”.

A corrente de fuga “de escuro” provém de vários efeitos intrínsecos dos semicondutores, entre eles os efeitos das correntes de difusão, recombinação e avalanche. Esta corrente aumenta com a temperatura, a tensão reversa e o tamanho do dispositivo. Tipicamente, esta corrente possui valores de 0,1 até 500nA, e dobra seu valor a cada 10°C. A existência desta corrente, determina as vantagens relativas das duas formas possíveis de se trabalhar com o fotodiodo semiconductor, como será visto mais adiante.

A sensibilidade do fotodiodo de silício é definida como sendo a razão entre a corrente gerada pela luz incidente e a potência desta. A sensibilidade máxima ocorre entre 850 e 950nm e normalmente possui o valor de 0,5A/W. Contudo, devido às tolerâncias de fabricação, a sensibilidade pode variar entre 0,3 e 0,6 A/W. Outro fator

importante é a temperatura, que altera as constantes ópticas do silício entre outros fatores.

Para o estudo dos ruídos presentes num fotodiodo, o circuito equivalente assume a versão simplificada correspondente à Figura 3.3-5.

Figura 3.3-5) Circuito Equivalente das Fontes de Ruído num Fotodiodo

A resistência R_L representa a carga aplicada ao Fotodiodo, e normalmente corresponde ao resistor colocado na realimentação do amplificador, como R_f no caso da Figura 3.3-6, mais adiante. Usualmente R_L se encontra entre $1\text{ M}\Omega$ e $100\text{ M}\Omega$.

O ruído num fotodiodo é gerado basicamente devido a duas fontes. O primeiro é conhecido pelo termo "shot noise" e é proveniente da corrente de fuga, ou "corrente de escuro".

$$I_{sh} = \sqrt{2 \cdot q \cdot I_d \cdot \Delta f} \quad (3-8)$$

onde:

q carga do elétron, $1,602 \times 10^{-19}$ Coulombs

I_d "corrente de escuro"

Δf banda de passagem considerada

A segunda fonte corresponde ao ruído térmico ou "Johnson", produzido nos resistores R_{sh} e R_L . Este ruído pode ser estimado pela equação :

$$I_{th} = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f}{R_c}} \quad (3-9)$$

onde:

I_{th} Ruído Johnson total

k Constante de Boltzman, $1,38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$

T temperatura de operação em $^\circ\text{K}$

R_c resistência de carga considerada para o sensor, incluindo-se R_{sh} e R_L .

Neste caso:

$$R_c = \frac{R_l \cdot R_{sh}}{R_l + R_{sh}} \quad (3-10)$$

É importante considerar que geralmente os fotodiodos são amplificados eletronicamente, como será visto mais adiante. Infelizmente, os amplificadores nem sempre possuem comportamento ideal e podem adicionar ruídos. É comum levar-se em conta o efeito dos ruídos oriundos da entrada destes. Por exemplo, um amplificador com entrada FET apresenta entre seus terminais de entrada uma tensão E_n de ruído, (da ordem de alguns micro-Volts/Hz^{-1/2}) que induz uma corrente na carga equivalente à equação abaixo:

$$I_{amp} = \sqrt{\frac{E_n \cdot \Delta f}{R_c}} \quad (3-11)$$

O Ruído total presente na carga R_l pode ser considerada como a soma quadrática de todos aqueles presentes.

$$I_n = \sqrt{I_{th}^2 + I_{sh}^2 + I_{amp}^2} \quad (3-12)$$

Para fotodiodos de boa qualidade R_{sh} é grande quando comparado com R_l , e quando são utilizados amplificadores de baixo ruído, as componentes predominantes são aquelas provenientes de I_{sh} e do ruído térmico de R_l .

Às vezes, é mais fácil interpretar o ruído presente no fotodetector como sendo resultado de uma luz incidente "equivalente de ruído". O termo "NEP" é definido como "Noise Equivalent Power" constituindo a potência luminosa incidente que produz uma corrente similar ao ruído presente. Assim,

$$NEP = \frac{I_n}{R_\lambda} \quad (3-13)$$

onde:

R_λ a sensibilidade do fotodiodo, entre 0,3 e 0,6 A/W

Ao invés de exprimir o NEP em Watts, os fabricantes convencionam para uma banda normalizada de $\sqrt{1\text{Hz}}$, sendo então o NEP expresso em W/ $\sqrt{1\text{Hz}}$.

Normalmente os fotodiodos apresentam NEP variando de 6×10^{-15} até 9×10^{-13} W/(Hz^{-1/2}).

A "faixa dinâmica" de um fotodiodo PIN corresponde à capacidade deste sensor de cobrir uma grande faixa de variação de intensidade luminosa incidente. Normalmente, o limite inferior desta intensidade é limitada pelo ruído presente, como expresso pelo termo NEP . A intensidade máxima está relacionada com a capacidade do material semiconductor de gerar portadores de carga. Para os fotodiodos de silício, em geral a densidade máxima de potência está ao redor de 10mW/cm². Na maioria dos casos, isto corresponde a uma faixa dinâmica ao redor de 10⁶. Este valor é relativamente elevado e representa uma das características notáveis dos fotodiodos. É

importante ressaltar que para se obter efetivamente esta faixa, os circuitos amplificadores devem ser cuidadosamente desenhados, visando evitar efeitos de saturação do sistema. Amplificadores logarítmicos são os mais indicados. LUXON e PARKER (1985).

O tempo de resposta de um fotodiodo se refere ao tempo decorrido entre a aplicação da iluminação sobre a área sensível e a ocorrência da corrente elétrica resultante sobre a carga. Normalmente é dividida em duas partes. A primeira corresponde ao tempo entre a aplicação da luz e a existência da corrente, chamada de "tempo de subida". A segunda corresponde ao tempo decorrido entre a interrupção da luz e a queda da corrente gerada, chamada de "tempo de descida".

Ambas dependem de vários fatores, entre eles o tempo de trânsito dos portadores foto-gerados dentro do Silício, o efeito da capacitância da junção, e o eventual aprisionamento de portadores.

Geralmente o tempo de trânsito varia de 1 a 8ns, dependendo do tamanho do cristal. A capacitância da junção C_j associada à resistência de carga R_l faz surgir um circuito "passa baixa" com constante $T_r \sim 2,2 R_l C_j$. O efeito capacitivo depende acentuadamente da tensão reversa aplicada, sendo um dado normalmente fornecido pelo fabricante. A consequência deste fato é que, dependendo do desempenho desejado em alta frequência, certas configurações de amplificação se tornam mais eficientes.

3.3.1.2 Modos de Operação

Devido às características de ruído e capacitância os fotodiodos podem operar de maneiras distintas. Esse fato incentivou o aparecimento de diversos estudos, que procuraram analisar as vantagens relativas de tais métodos. Para uma abordagem mais aprofundada se recomenda as referências HAMSTRA e WENDLAND (1972) e BURR-BROWN (1994).

O Modo de Operação chamado de Fotocondutivo consiste em aplicar uma polarização reversa ao fotodiodo. Desta forma, a capacitância é diminuída, a região de depleção é aumentada com a consequente diminuição do tempo de resposta, obtendo-se também grande linearidade. Todavia, ocorre um aumento significativo do ruído devido ao surgimento da corrente de "escuro".

Um circuito típico de amplificação é mostrado na Figura 3.3-6.

Figura 3.3-6) Circuito Amplificador de Fotodiodo no Modo Fotocondutivo

A amplificação é dada por:

$$V_o \approx I_p \cdot R_f \quad (3-14)$$

Como a polarização reversa diminui a capacitância da junção por um fator normalmente igual a 10 vezes, ela é muito aplicada em circuitos para altas frequências. Tempos de resposta de até 5ns são obtidos e para frequência maiores que 100kHz a razão sinal/ruído é vantajosa. Nesta montagem, sensibilidades de $5 \times 10^5 \text{ V/W}$ são obtidas à frequência de 100kHz.

O Modo de Operação chamado de Fotovoltaico difere do anterior por não aplicar a polarização reversa ao fotodiodo. Como resultado imediato, não existe a corrente de fuga ou "corrente de escuro", sendo o ruído produzido somente pela agitação térmica. Assim, a sensibilidade é aumentada, permitindo seu uso em baixas intensidades Luminosas.

Entretanto, a resposta em frequência é diminuída, principalmente devido ao efeito capacitivo da junção.

Um circuito típico é apresentado na Figura 3.3-7.

Figura 3.3-7) Circuito Amplificador de Fotodiodo no Modo Fotovoltáico

Esta montagem é conhecida como amplificador de transimpedância por converter a corrente do fotodiodo I_p em uma tensão V_o . A amplificação corresponde a equação (3-14) similar ao modo fotocondutivo. Impondo que R_f seja grande, obtém-se sensibilidade de até 2×10^8 V/W a 1KHz.

3.3.1.3 Uso nos Medidores de Distância

Obviamente, um fotodetector por si próprio não consegue discernir a posição da imagem sobre sua face sensível. No entanto, sua grande sensibilidade à mudanças na intensidade de luz permite sua utilização em diversos medidores de distância.

Seu uso, por exemplo, em Medidores de Distância por Telemetria de Pulso ou Comparação de Fase é notório, podendo ser estudado em detalhe nas referências CHAPPEL(1978) e KINGSTON(1978), não sendo discutido aqui.

Para aplicações industriais, onde as distâncias são menores, o fotodiodo também é encontrado em diversos dispositivos. Como o fotodiodo não informa a posição da imagem, normalmente ele é empregado visando informar se a superfície alvo está presente ou não dentro de uma faixa de distância.

Um dispositivo muito comum é representado na Figura 3.3-8.

Figura 3.3-8) Esquema Típico de um Sensor de Presença

Um LED emite um feixe luminoso, incidindo sobre uma superfície; uma parte desta luz espalhada retorna e é captada pelo fotodiodo.

O sinal do fotodiodo é amplificado e comparado a um nível arbitrário. Assim, a medida que a superfície se aproxima do dispositivo, o sinal captado aumenta até atingir o nível pré-estabelecido. Uma vez montado e ajustado, o sistema é capaz de detectar a presença da superfície móvel com precisão até 0,1mm, na distância até 5mm. Este dispositivo é conhecido por sensor óptico de proximidade e é largamente utilizado em processos industriais. Distâncias de 5mm até 2 metros são comuns, usando LEDS infravermelhos.

Para diminuir a influência da luz ambiente, estes sensores de proximidade possuem um filtro óptico "passa faixa" bem estreito sobre o fotodetector. Outra técnica muito comum consiste em modular a fonte luminosa numa certa frequência e efetuar a amplificação de forma sintonizada.

Apesar de popular, uma desvantagem desta técnica é que a fronteira de detecção, ou seja, a distância que o dispositivo muda de estado (on/off), depende do albedo da superfície e da razão sinal/ruído presente.

Para permitir que o sistema se mantenha menos sensível às variações de albedo, a montagem da Figura 3.3-9 é mais indicada.

Figura 3.3-9) Sensor de Presença Usando Máscara

O esquema se assemelha ao método por triangulação já descrito no capítulo 2, porém, ao invés de se usar um sensor de posição, uma máscara é colocada sobre o fotodiodo.

O tamanho desta máscara bem como seu posicionamento são executados de forma a permitir a incidência das imagens sobre o sensor, somente se provenientes daquelas regiões desejadas. Estas regiões correspondem, pela triangulação, a uma campo de distâncias.

Neste caso, a precisão da fronteira deixa de depender da intensidade do sinal, desde que o mesmo seja amplificado de forma conveniente e que apresente suficiente contraste em relação à luz ambiente e aos ruídos presentes. A fronteira fica definida pelo posicionamento da máscara e pelo tamanho da imagem presente no sensor. Ou seja, a incerteza da fronteira é determinada pelo tamanho da imagem, ou "spot", formado no sensor, como observado na Figura 3.3-10. Quanto menor o "Spot" mais abrupta é a transição do sinal a medida que este se desloca pela máscara.

Figura 3.3-10) Ação da Máscara num Sensor de Presença

Estes sensores são conhecidos por "Chaves Luminosas" ou sensores de presença, pois permitem a detecção precisa de um objeto dentro de um certo campo de distâncias.

Tais sensores são muito usados em máquinas operatrizes, em Robótica, em Máquina de empacotamento, etc. Precisas da ordem de 0,01mm são obtidas em distâncias de até 150mm.

Este método também é aplicado militarmente, principalmente em mísseis anti-aéreos, e em espoletas de proximidade à Laser.

Uma variante deste método, descrito na Figura 3.3-8, consiste em acoplar fibras ópticas tanto no LED emissor quanto no fotodiodo. Assim, duas fibras são necessárias, entretanto por serem de dimensões reduzidas permitem ser alojadas em locais inaccessíveis. Na Figura 3.3-11 é mostrado o princípio. Estes dispositivos formam um "Apalpador Óptico" muito útil na detecção de micro-deslocamentos, ensaios estruturais, nano-usinagem etc. Alcançam campos de até 3.5 mm com não-

*linearidade*⁴ menor que 0,5% em superfícies metálicas. Este esquema é muito usado em sensores de pressão usando diafragmas. DAVIS (1985).

Figura 3.3-11) Apalpador por Fibras Ópticas

3.3.1.4 Os Fototransistores

Um fototransistor é um fotosensor, como o nome indica, baseado no princípio de amplificação de corrente encontrada nos transistores. A luz incidente na junção base-coletor de um transistor bipolar produz uma corrente, que age como se fosse uma corrente de base de um transistor comum.

A resposta espectral é similar aos dos fotodiodos, porém, a sensibilidade é cerca de 1.000 vezes maior. Sensibilidades da ordem de 500A/W até 1.000A/W são comuns.

No entanto, devido a própria geometria e princípio de funcionamento, as velocidades obtidas são reduzidas.. Tempos de "subida" ou "descida" da ordem de milisegundos são comuns.

Sua utilização é muito frequente nos detetores de proximidade ou posicionamento já descritos, e na verdade, devido ao mecanismo interno de amplificação, são os mais baratos por simplificarem a eletrônica necessária para efetuar o comando. Muitos fototransistores são diretamente acoplados a estágios de amplificação "Darlington" ou mesmo em "SCRs", permitindo sensibilidades da ordem de 5.000 A/W, podendo ser usados diretamente como "chaves luminosas". Maiores detalhes podem ser encontrados nas referências CHAPPEL (1978).

⁴ Neste trabalho o termo Linearidade é usado como sendo o máximo desvio existente entre a curva resposta de um instrumento e a reta formada pelos valores aplicados para a calibração, expresso como uma porcentagem do valor de fundo de escala.

3.3.1.5 Fotodiodos de Avalanche

Os fotodiodos de Avalanche são fotodiodos especialmente construídos para suportarem tensões reversas elevadas. Quando a luz atinge a sua superfície sensível, devido ao campo elétrico elevado proveniente da polarização aplicada, os pares elétrons-buracos são acelerados causando um fenômeno de Avalanche. Desta forma, um efeito multiplicativo ocorre, possibilitando um ganho interno de cerca de 1000 vezes, quando comparado ao de um fotodiodo normal. Como a polarização também diminui os efeitos capacitivos, os tempos de resposta são extremamente pequenos, da ordem de 1,0ns.

As tensões reversas utilizadas se encontram entre 100 e 3.000 Volts e as formas de amplificação similares ao modo fotocondutivo. Como o processo de avalanche depende marcadamente da temperatura, o sistema de amplificação deve ser capaz de ajustar esta polarização, visando manter o ganho do sistema constante.

Figura 3.3-12) Amplificação para Fotodiodo de Avalanche

Um inconveniente deste dispositivo é que o ruído também é amplificado, degradando a relação sinal/ruído. No entanto, pela escolha cuidadosa da tensão reversa de polarização é possível obter ganhos significativos, sendo vantajosos principalmente quando se necessita de altas velocidades. Na Figura 3.3-13 é mostrada a curva típica da razão sinal/ruído com relação à tensão reversa aplicada.

Figura 3.3-13) Razão Sinal/Ruído para um Sensor de Avalanche

Os fotodiodos de Avalanche são muito usados quando a intensidade luminosa é pequena ou quando altas velocidades são requeridas. São muito utilizados em medidores por telemetria de pulsos, como já descritos. Todavia, devido ao seu alto custo e à necessidade de se dispor de uma fonte de alta tensão com grande estabilidade e baixo ruído, seu uso industrial em medidores por triangulação ainda é restrito.

3.3.2 Os Sensores de Quadrante

Os sensores de quadrante nada mais são que 2 ou 4 fotodiodos alojados no mesmo encapsulamento e que apresentam uma pequena distância entre si.

Na Figura 3.3-14 são representados os aspectos mais comuns:

Figura 3.3-14) Sensores de Quadrante

A distância de separação normalmente se situa entre 2 μ m e 0,1mm, dependendo da aplicação. O processo de fabricação é o mesmo dos fotodiodos "PIN", com a justaposição de 2 ou 4 sensores no mesmo substrato, formando um "catodo" comum.

Os "Anodos" correspondem as áreas ativas e são individualmente conectados aos pinos de saída. Assim, as características de ruído, sensibilidade, faixa dinâmica e forma de amplificação são similares aos de um fotodiodo PIN.

Se um "spot" de luz incide somente sobre um elemento, ou "quadrante", o sinal elétrico resultante aparece somente no contato elétrico correspondente.

Se, entretanto, este "spot" é transladado sobre a fronteira entre estes quadrantes, a energia luminosa é distribuída entre os elementos adjacentes. Assim, a diferença entre a corrente gerada em cada elemento pode definir a posição relativa deste "spot".

A posição de um "spot" circular e perfeitamente definido pode ser analiticamente obtida pelas seguintes expressões

$$X = K \cdot \left(\frac{(I_b + I_d) - (I_a + I_c)}{I_a + I_b + I_c + I_d} \right) \quad (3-15)$$

$$Y = K \cdot \left(\frac{(I_a + I_b) - (I_c + I_d)}{I_a + I_b + I_c + I_d} \right) \quad (3-16)$$

onde:

K = cte de proporcionalidade (calibração)

I_a, I_b, I_c, I_d = intensidades das correntes em cada quadrante

Similarmente para um sensor de 2 hemisférios (quadrantes):

$$X = K \cdot \left(\frac{I_b - I_a}{I_a + I_b} \right) \quad (3-17)$$

Deve-se atentar para o fato de que a forma e dimensão do "spot" podem influenciar as curvas-resposta.

Na Figura 3.3-15 é mostrado uma curva-resposta de um sensor de 2 hemisférios típico. A abscissa corresponde ao movimento no eixo X do "spot" circular, e na ordenada o sinal correspondente à equação acima.

Figura 3.3-15) Curva-Resposta de um Sensor de 2 Hemisférios, ao Movimento de um Foco Incidente de Luz ("spot") de 0,1 polegadas

A primeira conclusão importante é que o sensor somente gera uma informação proveniente da posição do "spot" durante uma distância de aproximadamente 2 vezes o tamanho do "spot" presente; ou em outras palavras, até que a borda do "spot" atinja a fronteira inter-quadrante. Fora desta faixa, a informação presente se resume a "qual" quadrante está e não "onde". Paradoxalmente portanto, muitas vezes é interessante produzir "spots" grandes ou desfocados visando obter um campo de medida maior.

Outro fato importante a ser notado é que a função resposta para um "spot" circular não é linear, principalmente devido ao fato de que um deslocamento linear num eixo de um círculo não produz uma variação linear da área do círculo remanescente entre os quadrantes vizinhos.

Uma alternativa para contornar este problema é alterar o formato do "spot" convenientemente, produzindo uma linha por exemplo. No entanto, muitas vezes este artifício é de difícil execução. De qualquer maneira, é importante frisar que o "spot" deve possuir distribuição de intensidade simétrica ou no mínimo conhecida.

Devido a esta não linearidade, geralmente estes sensores não são usados para detectar deslocamentos lineares, e sim como detectores de anulamento ou centralização, ou seja, quando o sinal entre quadrantes vizinhos se apresenta igual, fato que somente ocorre quando o "spot" está precisamente centrado. Precisão da ordem de $0,1\mu\text{m}$ são obtidas desta forma.

Um circuito típico de amplificação e processamento da posição é indicado na Figura 3.3-16, para um sensor de 2 hemisférios.

Figura 3.3-16) Circuito Típico de Amplificação e Determinação da Posição

Na saída do sensor existem dois amplificadores ligados no modo de transimpedância. Cada um amplifica a corrente correspondente ao seu quadrante. A seguir são colocados dois outros, sendo o primeiro responsável por gerar a diferença $(A-B)$ e o segundo a soma $(A+B)$.

Ambos são introduzidos num circuito divisor analógico que efetua a divisão $(A-B)/(A+B)$ desejada.

A divisão pela soma do sinal é necessária para anular o efeito da variação do sinal captado. Habitualmente estes divisores são circuitos integrados já prontos que executam a operação $10 \cdot X/Y$. Um exemplo comum é o AD533 da Analog Devices.

3.3.2.1 Uso nos Medidores de Distância

Devido às características do sensor, o seu uso é indicado para a detecção de condições de anulamento, ou seja, quando o "spot" está igualmente distribuído entre os quadrantes.

Num medidor de distância por triangulação este fato permite a detecção precisa da presença do objeto num ponto determinado. Neste caso particular, o medidor passa a se chamar de "Apalpador Óptico".

Na Figura 3.3-17 é mostrado o esquema básico:

Figura 3.3-17) Esquema de um Apalpador Óptico

Pelo esquema já conhecido da triangulação, o “spot” atinge o sensor de dois quadrantes determinando assim a posição exata da superfície que está sendo medida. Como a precisão obtida pelo sensor é grande, a posição da superfície também é.

Estes dispositivos são usados em máquinas copiadoras de perfil devido à precisão obtida, da ordem de 0,01 a 0,1 μm . TANWAR e KUNZMANN (1984).

Quando se aliar a precisão da detecção de anulamento do sensor com a capacidade de medição de distâncias, será possível utilizar o esquema de medidor por triangulação por feixe móvel, já descrito no capítulo 2. Uma variante desse esquema é apresentada na Figura 3.3-18.

Um defletor acústico-óptico produz uma varredura de um feixe Laser sobre o campo de medição no plano de triangulação. O padrão de deflexão é controlado com precisão.

Figura 3.3-18) Medidor de Distância por Deflexão de Feixe

A imagem captada é projetada sobre o sensor de 2 hemisférios. Quando a imagem se movimenta passando sobre o sensor, o sinal amplificado controla um relógio de tempo que relaciona a posição do feixe. Através do tempo decorrido se encontra a distância desejada. Como a precisão de detecção do sensor de 2 hemisférios é alta e a deflexão é bem controlada, alguns autores sustentam que esta configuração é a que maior precisão gera, dentre os medidores por triangulação: MAILLET (1985), KOEBNER (1984), BODLAJ e KLEMENT (1976). Precisoões da ordem de 1 mm em distâncias de 1 a 2 m são obtidas.

3.3.3 Sensores de Posição Lineares, ou Fotodiodos de Efeito Lateral

O chamado "efeito Lateral" presente em fotodiodos foi descoberto na década de 30, contudo sua utilização somente foi compreendida durante a popularização dos diodos e outros elementos semicondutores no início da década de 60, pelo trabalho de WALLMARK (1957).

A diferença mais evidente entre este tipo de sensor e os outros até agora descritos se refere à sua forma construtiva. Na Figura 3.3-19 são esquematizadas duas formas típicas para nas quais este sensor se apresenta.

Figura 3.3-19) Estruturas Típicas dos Fotodiodos de Efeito Lateral

O sensor de efeito Lateral consiste em um fotodiodo PIN como já descrito ou como um fotodiodo Schottky, porém com os contatos do substrato inferior colocados convenientemente nas extremidades opostas. A medida que um fóton atinge a superfície superior, os portadores de carga produzidos são separados na região de depleção, onde os "buracos" são recombinados na superfície.

Os elétrons, no entanto, agora possuem trajetórias alternativas para seu fluxo, devido aos dois contatos existentes. A distribuição desta corrente se dá pela lei de Ohm, visto que o substrato N age como se fosse um resistor. Assim, a corrente presente nos contatos é proporcional tanto à intensidade quanto à posição relativa entre os contatos laterais e o ponto em que o "spot" luminoso atinge a superfície sensível.

Seguindo o diagrama da Figura 3.3-19 a corrente no contato (1) pode ser dada por:

$$I_s = I_0 \cdot \frac{\sinh(\alpha (L - S))}{\sinh(\alpha L)} \quad (3-18)$$

onde:

I_0 é a corrente total fotoinduzida

α parâmetro de decaimento característico da região N, chamado de parâmetro de Lucovsky

$$\alpha = \sqrt{\frac{\rho_n \cdot J_d \cdot q}{W_n \cdot K \cdot T}} \quad (3-19)$$

ρ_n resistividade do material N

K constante de Boltzman

J_d densidade de corrente do diodo

T temperatura em ° Kelvin

W_n espessura da região N

L, S dimensões relativas do fotodiodo e da posição do feixe incidente

Para dispositivos desenhados apropriadamente, α tende a zero, transformando a equação (3-18) na aproximação seguinte:

$$I_s = I_0 \left(1 - \frac{S}{L} \right) \quad (3-20)$$

$$I_{s-l} = I_0 \cdot \frac{S}{L} \quad (3-21)$$

Assim, para um sensor "ideal", a corrente que flui nos contatos é função linear da distância entre o "spot" luminoso e o respectivo contato.

Nos dispositivos "reais" todavia, esta função não é perfeitamente linear. A maioria dos sensores deste tipo apresentam linearidade de $\pm 0,5\%$ somente numa região centrada, que corresponde a $\pm 25\%$ do tamanho total. Desta região até cerca de $\pm 75\%$ do tamanho total, a linearidade vai para $\pm 3,0\%$, chegando nas extremidades a atingir $\pm 5,0\%$. A razão principal deste fato é a não uniformidade da resistividade ρ_n do material.

Na Figura 3.3-20 são mostradas algumas curvas típicas das correntes parciais I_s e I_{s-l} e os desvios típicos de linearidade para um detector HAMAMATSU S3274:

Figura 3.3-20) Correntes Laterais e Erro de Detecção de um Sensor Hamamatsu S3274

Resoluções típicas da ordem de $\pm 2,5\mu\text{m}$ podem ser obtidas com esses sensores, como será visto mais adiante.

No entanto, a característica mais destacável deste tipo de dispositivo é sua capacidade de fornecer a informação da posição, independentemente do perfil ou qualidade do "spot" incidente.

A corrente foto-gerada que flui pela camada resistiva pode ser interpretada como sendo a somatória das contribuições "individuais" de cada parte deste "spot", baseada na sua intensidade e posição na área ativa do sensor. Como a corrente total é o resultado da integração na área, em outras palavras, as correntes resultantes nos contatos informam a posição do "centróide" de intensidade média do "spot" incidente.

Em alguns casos, esta característica permite simplificações ópticas e mecânicas significativas. É possível por exemplo, trabalhar com "spot" fora de foco. Assim, a inclinação do sensor com relação ao feixe da imagem pode ser aproximada visando obter alguma simplificação mecânica.

3.3.3.1 Características Elétricas

Existem fotodiodos de efeito lateral de diversos formatos e configurações, porém podem ser subdivididos em dois tipos principais: aqueles de uma dimensão e aqueles de duas dimensões. Aqueles de uma dimensão são os mais utilizados nos medidores de distância e servem para detetar o "spot" num eixo linear do dispositivo. Aqueles de duas dimensões possuem a capacidade de localizar na área deste a posição do "spot", fornecendo duas coordenadas. São mais utilizados em sistemas de aferição de alinhamento, guias em máquinas operatrizes e em alguns equipamentos oftálmicos. Estes modelos de 2 coordenadas não serão detalhados aqui, recomendado-se as referências KELLY e NEMHAUSER (1973), LIGHT (1982), SCHUDA (1983).

Na Figura 3.3-21 é mostrado o circuito equivalente de um sensor unidimensional:

Figura 3.3-21) Circuito Equivalente a um Sensor por Efeito Lateral

Analogamente ao que foi descrito para o fotodiodo PIN, I_p é o gerador de fotocorrente; C_j é a capacitância da junção; R_{sh} é a resistência de perda e D um diodo ideal. O resistor R_p corresponde a um divisor de corrente. Devido a R_p tais dispositivos são também conhecidos como sendo "potenciômetros" resistivos controlado por luz.

Os valores de sensibilidade radiante são próximos aos dos fotodiodos PIN bem como os valores típicos de R_{sh} e C_j , principalmente para os dispositivos de grande área sensível. Assim, se pode concluir que os tempos de resposta do sensor são relativamente grandes.

A grande diferença eletrônica que existe entre os sensores de efeito lateral e seus parentes PIN se refere ao nível de ruído presente.

O circuito equivalente para análise do ruído passa a ser o seguinte:

Figura 3.3-22) Circuito Equivalente para Estimativa de Ruído

A maior diferença em relação aos fotodiodos PIN corresponde a existência da camada resistiva R_p . Esta camada costuma apresentar valores de resistência baixos, devido a problemas construtivos relativos à necessidade de se manter linearidade de resposta de posição.

A contribuição de ruído devido a camada R_p pode ser somada à contribuição de R_{sh} e R_l e pode ser dada por:

$$I_{th} = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f}{R_c}} \quad (3-22)$$

onde:

I_{th} ruído Johnson total

k Constante de Boltzman

T temperatura de operação em °K

Δf banda considerada de frequência

R_c resistência presente entre os contatos de saída
equivalente a :

$$R_c = \left(\frac{1}{R_{sh}} + \frac{1}{R_l} + \frac{1}{R_p} \right)^{-1} \quad (3-23)$$

As outras contribuições são as mesmas consideradas anteriormente para os diodos PIN, como por exemplo a proveniente da “corrente de escuro”

$$I_{sh} = \sqrt{2 \cdot q \cdot I_d \cdot \Delta f} \quad (3-24)$$

onde:

q carga do elétron

I_d "corrente de escuro"

E aqui fica evidente a maior desvantagem que os fotodiodos do efeito lateral apresentam com relação aos outros sensores. Visando obter grande linearidade, a resistência inter-contatos R_p deve ter o menor valor possível, fazendo com que o ruído térmico proveniente deste seja o predominante. Os valores típicos de R_p variam de $1K\Omega$ até $200 K\Omega$. Comparado com os valores de R_{sh} de 10^7 a $10^{11} \Omega$ típico dos diodos PIN ou detetores de quadrante, e os valores de R_l entre 1 e $100M\Omega$, fica evidente que o gerador de ruído predominante passa a ser R_p .

O parâmetro NEP dos fotodiodos de efeito lateral costuma ser portanto, cerca de 10 a 1.000 vezes maior que o parâmetro NEP dos fotodiodos PIN. NEPs da ordem de 10^{11} a $10^{13} W/(Hz^{-1/2})$ são típicos.

Como os ruídos presentes são maiores, a faixa dinâmica de utilização também se reduz quando comparada a fotodiodos PIN. Tipicamente esta apresenta valores da ordem de 10^4 a 10^5 .

A consequência direta é que devido a este ruído, e devido ao efeito da luz ambiente, criarem componentes perturbadoras, normalmente as potências de iluminação são maiores nos detetores de distância que usam tal sensor.

Mesmo apresentando um nível de ruído elevado, o sensor de efeito lateral possui grande sensibilidade às variações de posição do "spot".

Para estimar o mínimo deslocamento detectável através da equação(3-21), se deve calcular a variação de corrente causada por um deslocamento Δs .

$$\Delta I = \frac{2 \cdot I_o \cdot \Delta s}{L} \quad (3-25)$$

O mínimo deslocamento detectável Δs corresponde àquele em que a variação ΔI de corrente ocorrida nos extremos do sensor for igual aos ruídos presentes.

$$\Delta I \approx I_r \quad (3-26)$$

como a razão sinal/ruído (S/R) pode ser considerada I_o/I_r tem-se que:

$$\Delta s \approx \frac{L}{2 \cdot S / R} \quad (3-27)$$

Como exemplo, considerando a sensibilidade do fotodiodo ao redor $0,6 \text{ A/W}$, um sensor LSC-30D da UDT possui: $L=30\text{mm}$, $R_p=20\text{K}\Omega$, $NEP=5 \times 10^{-13} \text{ W}/(\text{Hz}^{-1/2})$. Submetendo o sensor a uma amplificação sintonizada com banda estreita ao redor de 200Hz , e um “spot” de potência incidente típica de $1 \mu\text{W}$, obtém-se como resolução máxima $\sim 0,1 \mu\text{m}$.

Este valor corresponde a resolução máxima que o dispositivo é capaz de fornecer, dado a potência óptica disponível e uma determinada forma de amplificação que limite a banda de ruído presente. Indica o menor deslocamento que pode ser detectado de um “spot” luminoso incidente sobre a superfície sensível deste. Como já comentado, este valor não é função do tamanho do “spot” em si, mas do tamanho do sensor, do ruído presente tanto no sensor quanto na eletrônica de pré-amplificação, e assim dependente da banda de frequência desejada e do nível de sinal presente.

Normalmente os fabricantes determinam algumas condições típicas ou ideais de uso. Na tabela seguinte são mostrados alguns valores típicos para sensores da HAMAMATSU.

Sensor	Tamanho (mm)	Resolução Máxima (μm)	Erro Posição (μm)
S1543	3 x 1	0,2	± 15
S1544	6 x 1	0,3	± 30
S1545	12 x 1	0,3	± 60
S1352	33 x 2.5	7	± 125

Tabela 3.3-1) Desempenho Típico de alguns Fotodiodos de Efeito Lateral da HAMAMATSU

Os valores foram obtidos considerando um “spot” de $0,20\text{mm}$ a 900nm e $2 \mu\text{W}$ de potência óptica incidente, e principalmente o circuito recomendado de amplificação com banda de 10kHz . Estes valores são típicos nos medidores de distância, usando o circuito de amplificação esquematizado na Figura 3.3-24.

É importante notar que a precisão de uma medida nem sempre é expressa pela resolução máxima. Nos sensores de posição por efeito lateral o termo “Erro de detecção de posição” exprime os valores práticos obtidos, dando uma idéia da precisão do sensor. O “erro de detecção de posição” é medido usando também o circuito da Figura 3.3-24. Um ensaio é realizado incidindo-se um sinal luminoso sobre a superfície do sensor, e os sinais de posição extraídos são registrados. Usualmente a posição real do ponto luminoso é plotado no eixo Y e os sinais captados no eixo X conforme representado na Figura 3.3-23. O centro do sensor corresponde à abscissa “O”.

Figura 3.3-23) Erro de Linearidade num Fotodiodo de Efeito Lateral

Uma linha de referência é ajustada de forma a unir o ponto *B* correspondente à posição a 1/3 entre a do comprimento máximo e a origem.

O termo “Erro de posição” corresponde à diferença máxima entre o sinal de posição *Y* e o valor de *X* determinado pela curva de referência, na Figura 3.3-23 o termo corresponde ao segmento “*E*”. Nas especificações de sensores o desvio máximo “*E*” é representado para uma faixa de até 75% do comprimento do sensor, a partir do centro deste.

É ainda importante notar que:

- a resolução máxima depende de uma série de fatores entre eles a potência de iluminação, o ruído nos amplificadores, a banda de passagem etc. Assim, muitas vezes é possível melhorar estes valores apelando para esquemas mais sofisticados de amplificação e redução de ruído.
- o erro de posicionamento depende de características construtivas do dispositivo e com frequência pode ser reduzido pelo artifício de se efetuar um procedimento de calibração, armazenando e compensando o erro através de tabelas ou funções corretoras.

3.3.3.2 Formas de Amplificação

Os fotodiodos de efeito lateral, por serem dispositivos essencialmente “analógicos”, necessitam de circuitos que possibilitem a manipulação dos sinais produzidos de forma conveniente.

Os circuitos já descritos para o fotodiodos comuns bem como para os fotodiodos de quadrante são os mais simples e candidatos naturais à utilização. Como os sensores de efeito lateral possuem grandes dimensões, e portanto, capacitâncias elevadas, o modo fotocondutivo é usado para obter ganhos de velocidade.

Na Figura 3.3-24 é mostrado um circuito típico:

Figura 3.3-24) Circuito Básico de Amplificação de um Sensor de Posição

Os amplificadores $U1$ e $U2$ agem como amplificadores de “trans-impedância” gerando tensões proporcionais às correntes “laterais” do fotodiodo. Os amplificadores $U3$ e $U5$ produzem a somatória ΣI . O amplificador $U4$ calcula a diferença ΔI . Ambas são direcionadas para o circuito $U6$, divisor $\Delta I / \Sigma I$. A principal razão para esta disposição está relacionada com a necessidade de que a posição obtida seja independente da potência luminosa captada. Outra forma de anular a influência de variações da intensidade captada é a utilização do sinal ΣI como regulador de ganho dos amplificadores $U1$ e $U2$, fazendo que ΣI seja sempre constante.

O circuito da Figura 3.3-24 é o mais comum nos medidores de baixo custo. A precisão do equipamento se baseia no aumento da razão sinal/ruído, e na cuidadosa escolha do sensor e circuitos adjacentes. Normalmente, o fotodiodo trabalha no modo fotocondutivo, aumentando o ruído presente.

Infelizmente tal circuito sofre severas desvantagens. Por ser um circuito de acoplamento DC, a banda de passagem geralmente é grande, visando permitir que o equipamento apresente velocidade de resposta adequada. Devido a este acoplamento, significativas amplificações das tensões de “offset” na entrada dos amplificadores também ocorrem. Para complicar ainda mais, estas tensões variam com a temperatura. Estas tensões agem como poderosas fontes de ruídos fazendo com que a precisão global do circuito decaia.

Para compensar este efeito, uma solução popular é o aumento da potência de iluminação. Precisasões da ordem de 5% do fundo de escala são obtidas desse modo.

Uma outra forma de minimizar o problema é pulsar a iluminação, descontando o ruído produzido quando ela está desligada. Este método é muito comum quando se utiliza Lasers pulsados. Um circuito típico é representado na Figura 3.3-25:

Figura 3.3-25) Circuito de Amplificação de um Sensor de Posição Linear, Usando Fonte Luminosa Pulsada

O coração do circuito corresponde ao “restaurador de nível” DC. Este age como um amostrador sincronizado.

Figura 3.3-26) Ação do Circuito Amostrador Síncrono

O circuito amostrador “A”, é disparado pelo sinal F1, que é sincronizado com o disparo do Laser. Assim, uma medida do sinal proveniente da iluminação é registrada. O Laser então é desligado e o sinal F2 dispara a captação de uma amostra do sinal “B” “no escuro”. Este sinal “escuro” contém os componentes ruidosos presentes no circuito e até mesmo aqueles provenientes da interferência da luz ambiente. Os sinais amostrados são subtraídos, resultando num valor que, a princípio, somente depende da iluminação aplicada pelo Laser. Desta forma, o circuito fica muito estável e preciso, sendo o método utilizado em alguns medidores KEYENCE e MITUTOYO. Precisão da ordem de 0,1 a 0,3 % de fundo de escala são obtidas.

O esquema de amplificação da Figura 3.3-25 é muito popular, sendo que alguns fabricantes de fotodiodos de efeito lateral comercializam módulos ou circuitos prontos seguindo estas arquiteturas para determinadas aplicações. A HAMAMATSU por exemplo, lançou em 1994 um circuito integrado, H2476-01, que engloba todos os blocos anteriores bem como alguns acessórios num mesmo encapsulamento.

O circuito da Figura 3.3-25 constitui um avanço significativo, porém, por trabalhar no regime pulsado, a banda de amplificação é larga, não explorando o limite de resolução do sensor. Melhores resultados são obtidos quando o Laser é modulado numa certa frequência e os amplificadores sintonizados em banda estreita. Na Figura 3.3-27 é mostrado o diagrama de blocos típico.

Devido a amplificação sintonizada, através dos amplificadores A1 e A2, bem como ao uso do retificador síncrono, a banda de passagem deste tipo de amplificador é extremamente pequena. O limite da banda é fixado tendo em vista a velocidade de resposta desejada para o sistema, tipicamente ao redor de 200Hz. Assim, precisões de até 0,03% de fundo de escala são obtidas. Infelizmente as frequências devem ser baixas devido aos atrasos diferenciados que as fotocorrentes laterais possuem, dificultando o trabalho do retificador síncrono.

Figura 3.3-27) Amplificação com Retificação Síncrona

Uma possibilidade curiosa deste circuito é utilização de várias fontes luminosas para o mesmo sensor. Cada fonte é modulada em uma frequência exclusiva. Através da seleção da frequência no retificador síncrono, é possível determinar as posições de cada "spot" presente no sensor.

3.3.3.3 Uso nos Medidores de Distância

O fotodiodo de efeito lateral é sem dúvida o sensor mais popular nos medidores de distância. Sensores de precisões da ordem de 5% são baratos, com dimensões que variam de 3 a 6mm. Com precisões maiores, em torno de 0,5%, e/ou comprimentos da ordem de 20 a 30mm, os sensores são caros, e exigem esquemas de amplificação mais sofisticados devido principalmente aos grandes ruídos presentes.

Nos medidores de distância os sensores de efeito lateral são usados, principalmente nos esquemas clássicos de triangulação tais como aqueles representados nas Figuras 2.3-3, 2.3-4 e 2.3-5 do capítulo 2.

3.3.4 Rede de Detectores, Sensores CCD

As redes ou matrizes de detectores, como o próprio nome indica, são vastos conjuntos de sensores discretos organizados em linha ou superfície, com mecanismos que permitem a extração da carga fotogerada de cada sensor individualmente. Existem vários tipos, sendo as mais comuns as “Matrizes de Fotodiodo” e os CCDs, da sigla inglesa correspondente a “dispositivos acoplados por carga”.

Aparentemente complexos e de baixa resolução, estes sensores têm, nos últimos anos, obtido ganhos de escala baixando sensivelmente seus custos. Esses ganhos são provenientes da popularização das máquinas de FAX e câmaras de vídeo doméstico. Com os ganhos de escala e o surgimento de circuitos dedicados de suporte, bem como o aumento da resolução, a literatura especializada tem especulado o seu uso em medidores de distância.

No próximo item são apresentadas as características mais importantes, sem efetuar, entretanto, um aprofundamento teórico. A discussão é limitada aos sensores unidimensionais por serem os mais úteis para os medidores de distância. Uma discussão aprofundada do assunto pode ser encontrada nas referências HOBSON (1978) e ROSS (1979).

3.3.4.1 Princípio de Funcionamento

As matrizes de fotodiodos em geral são compostas por uma série de fotodiodos ligados a uma saída comum. Na Figura 3.3-28 é apresentado o circuito básico:

Figura 3.3-28) Estrutura Típica de um Sensor à Rede de Fotodiodos

A luz é captada pelos fotodiodos " Ph_i ", e a carga eletrônica resultante é armazenada no capacitores " C_i ". Os fotodiodos são, normalmente, em número de 64 até 10.000 com dimensões de até $2,5\mu\text{m}$ cada. Cada elemento fotosensível é chamado de "pixel". Um circuito digital, correspondente a um registrador de deslocamento, liga os transistores " FET_i " individualmente, fazendo com que a carga contida em " C_i " escoie pela saída comum.

A medida que os pulsos de “clock” são fornecidos ao registrador de deslocamento, sucessivamente as cargas dos fotodiodos são colocadas na saída. Um pulso de “Start” reinicia o processo pelo primeiro.

O tempo de carga dos capacitores é, portanto, dependente do tempo decorrido durante uma “varredura” completa de todos os elementos. Este período é chamado de tempo de integração. Assim, quanto maior o tempo de “varredura”, mais carga é acumulada, permitindo que níveis luminosos bem pequenos sejam registrados.

Com o intuito de simplificar a estrutura do dispositivo e aproveitar certas propriedades de aprisionamento de cargas, surgiram em 1970 os dispositivos “acoplados por cargas”, CCD.

Na Figura 3.3-29 é mostrada a estrutura fundamental deste dispositivo:

Figura 3.3-29) Estrutura Básica de um Dispositivo Acoplado por Carga, CCD

Basicamente, a estrutura corresponde a um capacitor “MOS”, de “Metal Oxide Semiconductor”. Um eletrodo metálico é colocado sobre uma camada isolante produzida sobre um bloco semicondutor. Quando uma voltagem é aplicada entre o eletrodo e o substrato, uma região de deplexão é formada na vizinhança da região isolante, criando uma barreira de potencial. Esta barreira aprisiona as cargas temporariamente. A partir deste princípio, é possível entender o funcionamento do registrador de deslocamento por carga acoplada.

No bloco semicondutor da Figura 3.3-30 são colocados vários eletrodos, sendo que eletricamente são conectados em três sinais distintos.

Figura 3.3-30) Esquema de Funcionamento de um CCD

De forma simplificada, o processo é o seguinte: quando o sinal $\phi 1$ está ligado sozinho, a carga se concentra sobre o eletrodo 1. Em seguida, a medida que $\phi 2$ também é acionado, a carga aprisionada se distribui entre os dois eletrodos 1 e 2. A medida que o sinal $\phi 1$ decresce, a carga remanescente é empurrada para o eletrodo 2, onde, ao final do ciclo, toda a carga que anteriormente estava sobre o eletrodo 1 se transfere para o eletrodo 2. O mesmo ocorre ao eletrodo 3 a medida que o sinal $\phi 3$ atua.

Desta forma, o CCD age como se fosse um “registrador de deslocamento analógico”. Com a adequada escolha dos materiais, as células MOS podem ser iluminadas, gerando a carga proporcional à intensidade luminosa presente no local. Através do deslocamento, as cargas são sucessivamente transferidas à saída.

Assim, pode-se concluir que um sensor CCD de imagem transforma um padrão espacial de distribuição luminosa, num padrão temporal sucessivo de cargas elétricas.

3.3.4.2 O Sensor de Imagem CCD

Um sensor de imagem CCD é constituído usualmente de três regiões distintas: a região foto-sensível, a região de transferência e o circuito de saída.

A região foto-sensível converte a energia luminosa em carga temporariamente armazenada nas barreiras de potencial, determinadas pela geometria e materiais da célula. O circuito equivalente corresponde ao circuito da Figura 3.3-31:

Figura 3.3-31) Circuito Equivalente da Região Fotosensível de um Sensor de Imagem CCD

A região corresponde, aproximadamente, a um fotodiodo acoplado a um capacitor MOS e uma chave. A energia luminosa é convertida em carga e armazenada no capacitor até o momento em que um sinal de comando fecha a chave, escoando a carga acumulada para a região de transferência CCD. A sensibilidade dos fotodiodos de um sensor CCD é similar àquela de um fotodiodo normal. No entanto, devido a estrutura interna e aos materiais adotados na região foto-sensível do dispositivo, normalmente os sensores CCD apresentam resposta espectral diferente dos fotodiodos PIN. Na Figura 3.3-32 é indicada a resposta espectral do sensor TCD142D

É importante frisar que a conversão dos fótons em pares elétrons-buracos ocorre no material a uma profundidade proporcional ao seu comprimento de onda. À medida que o comprimento de onda aumenta, mais profundamente o fóton penetra, antes de ser convertido e capturado pelas células discretas. Assim, este par gerado por fótons de comprimento de onda grande, podem deixar de ser capturados, transformando-se em elementos perturbadores, ou ruídos. Portanto, expor um CCD a intensos fluxos luminosos na região do infra-vermelho, mesmo não sendo sensível a esta faixa, não é recomendável, pela diminuição da razão sinal/ruído resultante.

Figura 3.3-32) Sensibilidade Espectral de um CCD, TCD142D

A região de transferência tem a função de transmitir em sequência as cargas provenientes da região foto-sensível, até a saída. Ao invés de 3 fases, normalmente são usadas apenas duas, devido a convenientes estruturas auxiliares construídas na região de transferência, de forma que o fluxo da carga tenha uma direção preferencial HOBSON (1978), LUXON e PARKER (1985). O esquema simplificado do conjunto está apresentado na Figura 3.3-33:

Figura 3.3-33) Estrutura do CCD e seus Sinais de Comandos Básicos

O estágio de saída do CCD contém o circuito equivalente da Figura 3.3-34:

Figura 3.3-34) Estágio de Saída de um Sensor CCD

A proporção que as cargas são deslocadas do CCD até a saída, o “output gate” é acionado, carregando o capacitor “ Q ”. Este capacitor excita um circuito amplificador, montado na configuração de “seguidor”. Esta configuração se resume em isolar o capacitor da saída de baixa impedância. Para que este capacitor seja capaz de amostrar o próximo sinal proveniente do CCD, é necessário “esvaziá-lo” através do “reset gate”, pelo sinal “ RS ” aplicado. A finalidade do resistor “ R ” na saída é transformar o sinal de carga presente no capacitor “ Q ” em sinal de voltagem.

Na Figura 3.3-35 está representada a sequência típica:

Figura 3.3-35) Diagrama Temporal de Controle Típico de um CCD

Observar que os sinais de saída e o esvaziamento do capacitor ocorrem a cada pixel.

3.3.4.3 Características do Sensor de Imagem CCD

Por ser um componente híbrido, contendo além das partes foto-sensíveis, circuitos de transferência e pré-amplificação, o sensor de imagem CCD exige cuidadoso estudo de suas características.

A sensibilidade luminosa do CCD, corresponde a capacidade de gerar cargas elétricas para uma dada intensidade luminosa. Como normalmente os CCDs são usados para captar imagem, as unidades apresentadas correspondem às usadas em fotometria, ao invés de unidades Radiométricas. Na Figura 3.3-36 é mostrada a característica de sensibilidade ao iluminamento (lux) do CCD TCD142D da Toshiba, e também uma curva de conversão para a unidade de irradiância $\mu\text{W}/\text{cm}^2$.

Figura 3.3-36) Sensibilidade de um Sensor CCD

Observar que a sensibilidade depende do tempo de integração, ou tempo de varredura utilizado.

Como a intensidade do sinal corresponde àquela na saída do pré-amplificador, normalmente é expressada em Volts. Daí se conclui outra característica importante: a capacidade máxima de irradiância que produz a saturação na saída. A Figura 3.3-37 mostra uma curva típica para determinado tempo de integração.

Observar que a inclinação da curva corresponde à sensibilidade para um determinado tempo de integração. O valor “B” corresponde à tensão presente quando da ausência do sinal luminoso, correspondendo ao sinal equivalente ao “escuro”. Ao atingir um valor “ $V_{máx}$ ” a tensão de saída passa a ser constante, e chamada de tensão de saturação.

Figura 3.3-37) Aspecto da Curva-Resposta Típica de um CCD, Tensão de Saída versus Irradiância Aplicada

É importante frisar que apesar da saída estar saturada, a foto-conversão permanece, e se a irradiância continuar aumentando, pode chegar a um ponto em os capacitores que armazenam a carga não mais suportem, “vazando” para os vizinhos.

Esta carga excedente uma vez espalhada pelo dispositivo não é eliminada imediatamente, mesmo que a irradiância volte a níveis ideais. Assim, uma vez saturado, o sensor não mais informa de modo confiável a condição de irradiância presente.

O nível de irradiância, portanto, deve ser cuidadosamente escolhido, bem como os tempos de varredura ou integração de forma a evitar os efeitos de saturação. Alguns CCDs, no entanto, possuem dispositivos auxiliares de “anti-ofuscamento”, que diminuem estes, e outros efeitos nocivos, às expensas de custo. O controle da irradiância pode ser realizado, como já visto, pelo controle da potência de iluminação, ajuste da abertura da lente captadora e, no caso, variação do tempo de integração.

O ponto “B” na curva da Figura 3.3-37 corresponde ao sinal presente na saída quando o dispositivo não recebe nenhuma irradiação, ou seja, quando está no escuro. Este sinal é chamado de “dark signal” e possui duas fontes, a primeira corresponde ao sinal de ruído gerado no fotodiodo e capacitor de armazenamento; o segundo ocorrendo na região de transferência do CCD. Ambos dependem da temperatura e mais importante, do tempo de integração adotado. A Figura 3.3-38 mostra a tensão correspondente no sinal do escuro, presente na saída para um determinado tempo de integração. Observar a tendência de dobrar o sinal de escuro, a cada aumento de 8°C na temperatura.

Figura 3.3-38) O Sinal de Escuro e seu Comportamento Térmico

O gráfico da Figura 3.3-39 mostra a razão entre o máximo sinal de saída e o sinal de escuro, em função do tempo de integração e da temperatura.

Figura 3.3-39) Relação entre o Sinal de Escuro e o Tempo de Integração

Este gráfico contém uma informação muito importante para utilização eficiente dos sensores CCDs. A medida que o tempo de integração diminui, a capacidade do sensor de lidar com uma imagem com grandes variações de intensidade aumenta; visto que o limite inferior corresponde ao nível do sinal de escuro, e o superior ao nível de saturação.

A faixa dinâmica do CCD é definida como sendo a razão entre o máximo valor da tensão de "saturação", V_{sat} , e o mínimo valor da tensão "sinal de escuro", V_{dark} , estando geralmente entre 600 e 1.500.

Os máximos valores da faixa dinâmica são obtidos para os menores tempos de integração, que por sua vez impõem um nível de irradiância conveniente para utilização. Assim, novamente se verifica a necessidade de escolher um ponto ideal de utilização do sensor, dependendo das condições de contorno presentes.

Conforme um sinal luminoso é transferido do fotodiodo para o registrador de deslocamento, e a partir daí, sendo deslocado até a saída, perdas podem ocorrer, deixando nas células vizinhas "restos de carga". Normalmente, o termo "eficiência do deslocamento" se refere à perda que um sinal sofre ao percorrer todo o registrador, sendo também uma medida do "rastros" de carga deixado nas células imediatamente anteriores. Valores típicos se encontram ao redor de 92% para 2.048 células.

Figura 3.3-40) Eficiência de Transferência entre Células de um CCD

Outro fator importante, em certas aplicações, se refere à uniformidade de resposta dos fotodetectores. Devido às dispersões e tolerâncias de fabricação, habitualmente os fotosensores não possuem respostas iguais. O termo PRNU de “Photo Response Non-Uniformity” é uma medida desta não uniformidade. Variações em torno de até 10% podem ocorrer em caso extremos, devido às imperfeições do material, riscos nas janelas etc.

A Resolução de um sensor CCD corresponde à capacidade dele discernir detalhes ou variações locais de intensidade presentes. Cada fotosensor, ou pixel, por ser fisicamente separado do vizinho, impõe a condição de que a máxima resolução obtenível corresponde a esta separação. Infelizmente, devido a dispersão de elétrons dentro do material foto-sensível e outros fatores construtivos, dificilmente um pixel atinge extremo contraste com relação ao seu vizinho.

Figura 3.3-41) Contraste do Sinal em Função do Contraste da Imagem

Na Figura 3.3-41 é esquematizado este efeito. Os padrões (a), (b) e (c) são projetados sobre o sensor. O sinal de saída é mostrado. A medida que o padrão de imagem afina, ou seja, aumenta sua frequência espacial, menor é o contraste obtido pelo sensor de imagem.

O termo MTF, de “Modulation Transfer Function” mede a razão segundo a qual um sinal de controle “branco e preto” é representado na saída do dispositivo. É uma medida da frequência espacial atingível com certo contraste.

É importante notar que o MTF de um sistema corresponde ao MTF do sensor, bem como ao MTF da lente captadora conjugada.

Se, por exemplo, a imagem original possui a distribuição retangular, após passar pela lente captadora sofre uma distorção “ou filtragem” e depois dessa atinge o sensor, onde novamente é atenuada.

Figura 3.3-42) Efeito do MTF no Sinal de Saída

O MTF de um sensor CCD é dependente do comprimento de onda da luz incidente. A proporção que o comprimento de onda aumenta, mais profundamente o fóton penetra na matéria antes de ser convertido em elétron, aumentando assim a probabilidade de se dispersar nos pixels vizinhos.

Na Figura 3.3-43 é apresentado o MTF de um sensor Toshiba TCD142D.

Figura 3.3-43) Curva MTF de um Sensor CCD TCD142D da Toshiba

Note que na frequência máxima, que corresponde à separação inter-pixels, o máximo contraste obtenível é cerca de 60%.

3.3.4.4 *Uso nos Medidores de Distância*

O uso dos CCDs nos medidores de distâncias é recente. Por muito tempo a resolução máxima e o custo destes dispositivos não os tornavam interessantes, principalmente quando comparados aos fotodiodos de efeito lateral.

Todavia, nos últimos anos, devido à popularização de “scanners”, máquinas de Fac-Símile e câmaras de vídeo domésticas, seus custos baixaram significativamente.

Atualmente são encontrados sensores de 2.048, 5.000 e até 10.000 pontos, com pixels de até 2.5μm, sendo disponíveis a preços menores que os fotodiodos de efeito lateral de dimensões próximas.

Sua utilização nos medidores é extremamente simples. Na saída do CCD são colocados um amplificador e um comparador de nível arbitrário. Um gerador de padrão temporal produz as ondas necessárias à condução da lógica do Registrador de Deslocamento do CCD. Estes geradores podem ser constituídos por circuitos dedicados, também fornecidos pelo fabricante do sensor, ou mesmo através de uma memória onde o padrão é gravado.

Um contador mede o número de pixels decorrido entre o início de uma varredura e a ocorrência da imagem de intensidade acima da selecionada, proveniente do "Spot". O número captado corresponde ao número do primeiro pixel iluminado pelo "spot". Obtém-se desse modo a posição da imagem que, por triangulação, indicará a posição do objeto. Toda esta eletrônica é simples e por ser eminentemente "digital", simplifica a concepção geral do conjunto. A existência de Circuitos Integrados dedicados, que incluem a eletrônica de amplificação e controle do CCD, todos agrupados num mesmo encapsulamento, contribui para que este tipo de sensor seja considerado no desenho de um medidor.

Outra importante característica deste sensor é a capacidade de operar com vários "spots" incidentes sobre o mesmo sensor. Esta característica é essencial, por exemplo, para medir a espessura de materiais transparentes como o vidro.

Através de processamento é possível aplicar rotinas de tratamento de imagens captadas pelo sensor. Tal fato permite que este tratamento filtre interferências, falsas imagens, possibilitando seu uso quando o ambiente contém luz de grande intensidade.

No capítulo 4 é apresentado um desenho de medidor usando este tipo de sensor.

3.3.5 Comparação entre Sensores

Foram discutidos os principais tipos de sensores utilizados nos Medidores de Distância por Triangulação. Ficou evidente que a escolha de um determinado tipo, deve ser baseada em algumas características que sejam próprias para o medidor que está sendo desenhado.

Caso o Medidor de Distância seja utilizado somente na detecção da presença de uma superfície, dentro de uma faixa de distâncias, o sensor mais indicado é o Fotodiodo comum. Este sensor pode ser usado com ou sem máscara e seus circuitos são simples e eficazes.

Caso o medidor necessite detectar a presença da superfície somente num determinado ponto e com grande precisão, o uso de sensores de 2 hemisférios (ou quadrantes) é o mais recomendado. Os chamados “Apalpadores Ópticos” apresentam precisões na ordem de $0,1\mu\text{m}$ em distâncias de 100mm.

Já para os Medidores de Distância onde é necessária a medição de deslocamentos ou posições absolutas, a escolha do tipo de sensor depende de mais alguns fatores. A decisão de uso entre Fotodiodos de Efeito Lateral (FEL) e os sensores discretos tipo CCD, deve ser tomada com base nas vantagens relativas que se apresentam para um modelo específico de medidor. Na Tabela 3.3-2 seguinte são mostradas as características principais entre 2 FELs e 2 CCDs, extraídas dos catálogos dos fabricantes.

Sensor	Toshiba TCD142D	Toshiba TCD1500C	Hamamatsu S1352	Hamamatsu S3932
Tipo	CCD	CCD	FEL	FEL
Comprimento da Área Sensível	28,6mm (2048x14 μm)	37,4mm (5340x7 μm)	34,0mm	12,0mm
Resolução Máxima	14 μm (2048 pontos)	7 μm (5340 pontos)	7 μm (~ 4857 pontos)	0.3 μm (~ 40000 pontos)
Erro de Linearidade	<14 μm (<0,05%)	<7 μm (<0,02%)	125 μm (tip.) 500 μm (max.) (0,3% ~1,4%)	60 μm (tip.) 240 μm (max.) (0,5%~2,0%)
Faixa Dinâmica	1.500	1.500	$10^4 \sim 10^5$	$10^4 \sim 10^5$

Tabela 3.3-2) Comparação entre Sensores CCDs e Fotodiodos de Efeito Lateral na Utilização em Medidores de Distância

Os valores das resoluções máximas, no caso dos CCDs, correspondem ao tamanho do sensor discreto ou “pixel”. Já as resoluções dos FELs correspondem ao limite teórico, baseado nos níveis de ruído típicos e com potências de iluminação ideais, bem como no método de amplificação recomendado. Como esperado as resoluções dos FELs são melhores que as resoluções dos CCDs, e também são melhores quanto menores são as áreas sensíveis.

No erro de linearidade ocorre o oposto. Como os CCDs são produzidos usando as técnicas de Foto-Litografia utilizadas na construção de Circuitos Integrados, os erros de Linearidade são extremamente pequenos. As células fotosensíveis ou “pixels”, são precisamente gravados no bloco de silício, sendo a única manifestação de não-linearidade aquela devido à diferença de sensibilidade. Assim, a princípio, se pode assumir que o erro de linearidade máximo corresponde à resolução máxima.

Já os FELs são prejudicados neste aspecto, devido às tolerâncias e variações das camadas fotocondutoras e resistivas. Os erros de linearidade chegam a ser grandes comprometendo seriamente os ganhos obtidos pela resolução superior deste dispositivo. Tal fato obriga o “mapeamento” dos erros em cada unidade utilizada, através de um cuidadoso processo de calibração. Este mapa de erro deve ser gravado no equipamento para ser usado como variável de compensação. Infelizmente, tais desvios sofrem variações com a temperatura, complicando a execução desta compensação.

A faixa dinâmica dos CCDs são menores que a faixa dos FELs, obrigando o uso de controladores de potência de iluminação mais acurados.

Como consequência de todos estes fatores, a escolha entre CCDs e FELs pode ser resumida como a seguir:

- Quando a precisão requerida não é grande, os FELs são indicados. Quando a correção de linearidade não é necessária, é possível a obtenção de um sinal analógico proporcional à distância com relativa facilidade. Esta estratégia é comum em medidores de baixo custo, com precisão entre 5% e 0,5% de fundo de escala, na medição de deslocamentos de até 10mm.
- Quando se requer precisões maiores, em pequenos deslocamentos, a correção da linearidade é necessária, obrigando o uso de sistemas eletrônicos de processamento mais sofisticados. O uso de microprocessadores e sistemas numéricos para armazenamento e correção de tais erros são comuns. Para que esta estratégia seja vantajosa, FELs de pequenas dimensões são recomendados, explorando as resoluções superiores destes. Porém, como será discutido nos capítulos seguintes, as lentes captadoras podem induzir a erros adicionais. Para minimizar tais erros, recomenda-se que as lentes sejam desenhadas para serem utilizadas em “conjugados finitos”. Este termo significa aproximadamente, que a distância entre o objeto e a lente seja similar a distância da lente e o sensor de imagem. Assim, como o sensor possui pequenas dimensões, o campo de medição também será pequeno. Resumindo, quando se deseja medir pequenos deslocamentos com precisão, os FELs de dimensões reduzidas são os indicados. Precisas típicas de 0,5% até 0,05% de fundo de escala podem ser obtidas.

- Quando se necessita de campos de medição grandes e com precisão elevada, os CCDs levam vantagem. A Resolução máxima, bem como a Linearidade elevada simplificam o processamento eletrônico e também a calibração. Precisões de 0,2% até 0,01% de Fundo de Escala podem ser obtidas. Notar que mesmo que se use ópticas com magnificações elevadas visando “comprimir” um campo grande sobre e um sensor FEL de pequenas dimensões, não se atinge facilmente a linearidade dos CCDs. Magnificações elevadas significam normalmente aberrações ópticas também consideráveis, e assim perda de resolução e erros de linearidade a serem corrigidos.

3.4 Radiometria e Influências das Superfícies

A maioria dos Medidores de Distância até agora descritos partem do princípio de iluminar o alvo através de luz Laser ou outras fontes luminosas adequadas. A luz refletida pelo alvo é captada, para daí ser extraída a informação da distância desejada. Para que esta informação tenha confiabilidade, o sinal proveniente da iluminação do alvo deve possuir intensidade suficiente para permitir uma manipulação conveniente.

É importante diferenciar a Radiometria da Fotometria. A Radiometria se refere à medida da radiação luminosa. A Fotometria também se refere à medida da radiação luminosa, porém para o caso particular em que o olho humano é o detector. Fica assim implícito que existe uma curva-resposta de sensibilidade aplicada. Por exemplo 1 Watt (fluxo radiométrico) a 555nm equivale a 680 lúmens (fluxo fotométrico); 1 Watt a 670nm equivale a 68 lúmens devido a curva de sensibilidade típica do olho humano. O'SHEA (1985).

Na discussão que se segue são expostos os principais conceitos necessários à previsão da quantidade de luz disponível para a detecção da distância de um alvo.

3.4.1 Noções Básicas

A maioria dos métodos apresentados para a medição de distância segue o diagrama esquemático indicado na Figura 3.4-1 a seguir.

Figura 3.4-1) Diagrama Radiométrico dos Medidores de Distância

Uma fonte luminosa, comumente um Laser, produz um feixe luminoso colimado através do conjunto de lentes apropriadas. O feixe incide sobre o alvo produzindo um ponto luminoso que espalha a luz, sendo uma parte desta coletada pelo conjunto de lentes captadoras. Este conjunto de lentes condensa a radiação captada sobre o sensor de imagem adotado.

A forma que a energia luminosa incidente é espalhada pela superfície é motivo de estudos detalhados. As superfícies possuem as mais variadas características de refletância. Superfícies como metais polidos ou vidros possuem refletância predominantemente “especular”, obedecendo às leis de reflexão, como representado na Figura 3.4-2.

Figura 3.4-2) Reflexão Especular

Outras superfícies, como papel, não possuem reflexão especular, sendo a refletância predominantemente difusa, espalhando a luz incidente sobre o hemisfério de incidência.

Figura 3.4-3) Refletância Difusa

Algumas superfícies tais como metais laminados e plásticos, possuem refletância de características "mistas", apresentando comportamento tanto difuso quanto especular, combinados.

Figura 3.4-4) Refletância Mista

Uma freqüente hipótese adotada para os casos de refletância eminentemente difusa é considerar a superfície como possuindo característica "Lambertiana".

Uma superfície "Lambertiana" apresenta a seguinte característica: o fluxo luminoso refletido por unidade de ângulo sólido é proporcional ao cosseno do ângulo entre a direção de interesse e a normal à superfície.

Figura 3.4-5) Modelo de Superfície Lambertiana

Uma superfície dita "Lambertiana" corresponde a um difusor ideal, chamado de "Isotrópico". Uma superfície Lambertiana possui uma série de características destacáveis, entre elas a propriedade de apresentar o "brilho" ou "radiância" constante, independentemente do ângulo de observação. O'SHEA (1985). Apesar de algumas superfícies tais como papel, neve, areia, etc exibirem comportamento "quase" Lambertiano, a maioria das superfícies apresentam comportamento próprio, sendo difícil a sua previsão teórica. No entanto, o uso do conceito de superfície Lambertiana é útil para se encontrar a "equação de ligação". Esta equação relaciona a potência óptica disponível, dada a potência emitida sobre o alvo, e as características geométricas do conjunto. Esta equação permite prever a energia luminosa necessária, ou mesmo a energia disponível para um sensor de imagem trabalhar eficientemente numa configuração de medidor de distância.

3.4.2 A Equação de Ligação

Para encontrar a equação que exprime a radiometria do sistema será adotado o esquema da Figura 3.4-6.

Figura 3.4-6) Estudo Radiométrico de um Medidor de Distância

O feixe Laser de potência P incide sobre o alvo formando sobre este numa área iluminada A_i . O ângulo de incidência com relação à normal da superfície é θ_i .

Considerando que a iluminação é efetuada na normal à superfície, então $\theta_i = 0$.

A irradiância, fluxo incidente por unidade de área, é dado por:

$$E = \frac{P_i}{A_i} \quad (W/m^2) \quad (3-28)$$

Assumindo, por simplificação, que a superfície é Lambertiana, a radiância L (fluxo espalhado por unidade de área da fonte por unidade de ângulo sólido) pode se expressa por:

$$L = \frac{\rho}{\pi} \cdot E = \frac{\rho}{\pi} \cdot \frac{P_i}{A_i} \quad (3-29)$$

O termo ρ/π é resultante da propriedade de uma superfície Lambertiana, que assume que a radiância independe do ângulo de observação. O fator ρ corresponde a um índice de "perda", entre 0 e 1, com relação a uma superfície ideal.

Uma interpretação para o termo ρ/π é que o fluxo incidente é espalhado por um semi-hemisfério de π estéreo-radianos. (Obs.: se não for Lambertiano 2π).

Dado um sensor colocado num ângulo de observação θ_r , e que este eixo de observação está contido no mesmo plano do feixe de incidência, podemos considerar que a intensidade (fluxo por unidade de ângulo sólido) é igual a radiância vezes a área projetada de emissão.

$$I = L \cdot A_i \cdot \cos \theta_r \quad (3-30)$$

$$I = \frac{\rho}{\pi} \cdot P_i \cdot \cos \theta_r \quad (W/sr) \quad (3-31)$$

A equação (3-31) é mais conhecida por "Lei de Lambert". Assim, o sinal presente no sensor é proporcional ao ângulo sólido de captação.

$$P_r = \frac{A_r}{d^2} \cdot \frac{\rho}{\pi} \cdot P_i \cdot \cos \theta_r \quad (3-32)$$

onde:

A_r área da pupila de entrada da lente de captação.

d distância entre o ponto iluminado e a lente de captação.

A equação (3-32) pode ser reescrita e ampliada para a seguinte:

$$P_r = P_i \cdot \tau_i \cdot \frac{A_r}{d^2} \cdot \tau_r \cdot r_d \quad (3-33)$$

onde:

τ_i fator perda da óptica do colimador.

τ_r fator perda da óptica do captador

A_r/d^2 Ângulo sólido da óptica de captação

r_d Fator refletância direcional difusa da superfície, sendo que para uma superfície Lambertiana:

$$r_d = \frac{\rho}{\pi} \cdot \cos \theta_r \quad (3-34)$$

Assim, dada uma potência de emissão e a geometria da óptica de captação é possível prever a energia captada, e portanto, o desenho das etapas eletrônicas de amplificação e controle.

O fator τ_i estima a perda de potência causada pela óptica de colimação do feixe Laser. Para Laser de HeNe, com óptica de boa qualidade, o fator τ_i fica ao redor de 0,99. Para Lasers semicondutores, devido a necessária correção de sua grande divergência, fatores τ_i ao redor de 0,70 são comuns, atingindo cerca de 0,90 para colimadores de boa qualidade e grande abertura.

O fator τ_r estima a perda que ocorre nas lentes captadoras. Normalmente sobre a lente são colocados filtros ópticos com o objetivo de bloquear a luz captada que não pertença ao Laser emissor. Para isto são usados filtros "passa faixa" ópticos. Infelizmente tais filtros possuem uma perda na faixa de passagem que não é desprezível. As perdas tanto devido a este filtro quanto às lentes captadoras, somadas, imprimem ao termo τ_r valores ao redor de 0,7~0,8. Deve-se sempre colocar filmes anti-refletores sobre as lentes.

O fator r_d , refletância direcional, é uma maneira de descrever a forma que a luz é espalhada pela superfície que está sendo iluminada. Este fator leva em conta a perda ρ , e o formato da distribuição $\cos\theta/\pi$. Infelizmente, poucas superfícies apresentam estas características sendo assim difícil a previsão teórica da refletância para um material específico. Portanto, a forma mais prática de se resolver a questão é o levantamento empírico dessas características.

3.4.3 A Refletância Direcional de Algumas Superfícies Típicas

Visto que uma superfície de características Lambertianas, é de difícil ocorrência natural, torna-se indispensável determinar um método para se estimar a refletância direcional da superfície, visando obter o equilíbrio radiométrico necessário ao bom funcionamento do medidor de distância.

As superfícies mais comuns no emprego dos medidores de distância geralmente apresentam comportamento "misto", ou seja, apresentam comportamento difuso misturado a um especular, tais como os metais. Outras superfícies apresentam comportamento "quase" Lambertiano, divergindo somente em alguns ângulos de visada, como por exemplo, o papel branco.

Um equacionamento teórico que cubra todos estes comportamentos seria de difícil concepção, e pouco prático.

Assim, normalmente, definida a superfície sobre a qual o medidor irá trabalhar, executa-se um ensaio incidindo sobre esta superfície um Laser conhecido, no ângulo e distância desejada, medindo-se então a potência de retorno. Este processo empírico é rápido e pode fornecer uma boa estimativa radiométrica.

Com o intuito de auxiliar o desenho de um medidor, várias superfícies foram estudadas através de um "refleto-goniômetro", como descrito a seguir. Na Figura 3.4-7 é indicado o dispositivo.

Figura 3.4-7) O Refleto-Goniômetro usado nos Ensaio de Refletância Direcional

Um Laser de potência conhecida é ajustado de forma a incidir um feixe na normal à superfície que está sendo estudada. Um "fluxímetro" luminoso é colocado em um dispositivo mecânico, sendo capaz de cobrir ângulos de 0° a 90° com relação à normal a superfície.

Conhecendo-se a distância d , a área da captação A_r , o ângulo de visada θ_r , e a potência útil de emissão P , pode-se levantar uma curva de R em função de θ_r , através da equação (3-33).

Para estimar os fatores de perda τ_i e τ_r e ao mesmo tempo calibrar o fluxímetro no sistema da Figura 3.4-7, foi utilizado um material padronizado como referência. Este material foi preparado segundo a norma ASTM E259. Resumidamente, consta de procedimentos para a confecção de pastilhas de sulfato de bário, que apresentam o coeficiente de refletância ρ igual a 1, ou seja um material Lambertiano ideal.

O refletô-goniômetro da Figura 3.4-7 foi submetido a esta referência e o resultado está apresentado no Apêndice III. Com o sistema calibrado, diversos materiais foram ensaiados. As curvas obtidas para alguns materiais estão indicadas na Figura 3.4-8.

Estas curvas podem ser utilizadas para o desenho de um medidor. Sabendo-se o ângulo do eixo óptico de captação θ_r , e de posse das curvas características da refletância, é possível estimar de potência óptica coletada. Um exemplo prático é descrito no capítulo 4.

Figura 3.4-8) Refletância Direcional de Alguns Materiais

No Apêndice IV é apresentada uma série de curvas de refletância para vários materiais de uso industrial. Pelas curvas apresentadas se observa que as refletâncias variam bastante de acordo com o tipo e condição do material. Assim, algumas conclusões podem ser obtidas:

- Dentre os vários materiais estudados observa-se que a refletância apresenta uma faixa de variação da ordem de aproximadamente 10^4 . Portanto, o circuito eletrônico de amplificação e processamento deve ser capaz de cobrir esta faixa ou possuir alguma forma de ajuste visando a sua adequação à superfície escolhida.

- Em certos materiais, a variação de refletância com ângulo de visada é grande. Isso pode causar problemas quando o material sofre vibrações, ou quando não é perfeitamente "plano" ou fixo. Nestes casos, as variações bruscas de refletância podem "cegar" momentaneamente o sensor.
- Em alguns materiais, são observadas "anisotropias", ou seja a refletância também depende da orientação da amostra. Este fenômeno é facilmente visível, por exemplo, em chapas metálicas laminadas a frio. Neste caso, um eixo preferencial deve ser escolhido para o alinhamento do sensor de imagem.
- Alguns materiais também apresentam dispersão de valores obtidos. Materiais como chapas metálicas, possuem manchas causadas por ferrugem, aquecimento localizado, manchas de óleo, etc. Estes fatores alteram significativamente a características de refletância.
- Uma implicação prática importante relacionada ao efeito da dispersão surge quando o medidor de distância está posicionado de forma a medir alvos que se movem, como por exemplo, em medidas de espessuras de chapas metálicas. As chapas metálicas em movimento, além de apresentarem problemas causados pela vibração, são cobertas de manchas de ferrugem e óleo. Estas chapas em movimento produzem uma oscilação das características refletivas, que o medidor deve ser capaz de filtrar. Como as chapas andam em velocidades elevadas, o medidor enxerga um sinal "médio" que nem sempre é igual ao obtido quando uma chapa está parada em algum ponto específico. Assim, conclui-se pela necessidade de prover aos medidores de distâncias, artifícios eletrônicos que minimizem tais efeitos.

3.4.4 O Efeito do Granulado Óptico e da Rugosidade Superficial

O efeito do Granulado Óptico é facilmente observável quando se ilumina uma superfície rugosa através de uma fonte de luz coerente. É muito comum, por exemplo, quando se observa o "spot" de um Laser de HeNe irradiado sobre papel ou superfícies metálicas. O padrão de pontos claros e escuros é chamado de granulado óptico, ou ainda "Speckle". Na Figura 3.4-9 é mostrado o aspecto comum para um granulado ótico.

Figura 3.4-9) Aspecto Ampliado do Efeito do Granulado Óptico numa Superfície Rugosa

A origem deste padrão é consequência da iluminação desta superfície com luz coerente, de maneira que os diversos pontos na superfície rugosa ajam como se fossem fontes "secundárias", surgindo assim a interferência entre elas.

Figura 3.4-10) Origem do Efeito do Granulado em um Sistema Óptico.

Como as fases dessas ondas "secundárias" estão distribuídas aleatoriamente, devido a rugosidade da superfície, o que se observa é um granulado de tamanho e aspecto com uma distribuição também aleatória. Apesar disto, no entanto, o "Speckle" contém várias propriedades interessantes que permitem a obtenção de diversas informações da superfície iluminada, e a detecção de pequenos deslocamentos desta. Um estudo teórico detalhado do fenômeno do "Speckle" é de complexidade elevada, e não será tratado aqui, recomendando-se a referência DAINTY (1975).

Algumas conclusões podem ser usadas para o caso dos medidores de distância. Resumindo, o perfil e o contraste do granulado óptico observado depende da geometria óptica do sistema de captação, da coerência da luz usada para iluminação e da rugosidade da superfície alvo.

O perfil do granulado pode ser caracterizado pelo "tamanho médio do grão". Como o padrão de granulado óptico é o produto da superposição do padrão de interferência formado pela luz espalhada de inúmeros pontos da superfície, pode-se deduzir que este "tamanho médio" é baseado na diferença de caminho óptico dos raios espalhados. Seguindo este raciocínio e considerando o caso de captação do padrão do "Speckle" por óptica coletora típica de uma configuração de medidores de distância, obtém-se o seguinte resultado:

$$\langle \delta \rangle \approx 1,2 \cdot \lambda \cdot \frac{L}{A_r} \quad (3-35)$$

onde:

$\langle \delta \rangle$ tamanho médio dos "grãos" do granulado

λ comprimento de onda da fonte iluminadora

L distância entre a lente captadora e a imagem desta

A_r diâmetro da pupila de entrada da lente captadora

Na Figura 3.4-11 está indicada a situação apresentada:

Figura 3.4-11) Determinantes do Tamanho do Granulado Óptico

O tamanho do grão, portanto, só depende da óptica captadora, expressando de outra forma, só depende do limite de resolução que a óptica permite obter. DAINTY (1975)

Entretanto, o granulado óptico também apresenta algumas características dependentes exclusivamente da coerência e da rugosidade do material.

A influência da rugosidade e da coerência da luz utilizada no granulado é motivo de grande interesse. Diversos estudos foram realizados visando obter equacionamentos que permitam, por exemplo, extrair uma indicação da rugosidade superficial através da observação do granulado óptico. VORBURGER e TEAGUE (1981), DAINTY (1975). Na referência PEIPONEN (1992) é descrito um equipamento com esta finalidade.

No caso dos medidores de distância o interesse é diferente. Como o contraste do granulado, aliado ao tamanho do grão, podem influir na imagem do “spot” que está sendo captado, é possível que o sistema seja enganado devido a esta influência. Assim, a título de ilustração são indicados algumas conclusões obtidas por VORBURGER e TEAGUE (1981).

Definindo-se o constraste V como sendo:

$$V = \frac{\sigma_i}{\langle I_r \rangle} = \sqrt{\frac{\langle I_r^2 \rangle - \langle I_r \rangle^2}{\langle I_r \rangle^2}} \quad (3-36)$$

onde

σ_i	desvio padrão da variação de intensidade luminosa captada de um granulado
$\langle I(r) \rangle$	média de intensidade captada no ponto r, integrado sobre um número suficiente de medidas.

A relação encontrada entre o constraste V , a rugosidade $R_q(\text{rms})$ e o comprimento de coerência L_c da luz utilizada é esquematizada na Figura 3.4-12, extraída da referência VORBURGER e TEAGUE (1981).

Figura 3.4-12) Relação entre a Rugosidade, Coerência da Iluminação e o Constraste do Granulado Óptico

É interessante notar que para uma fonte luminosa de grande coerência, o granulado exibe contraste máximo, e é praticamente independente da rugosidade superficial. Para fontes não perfeitamente coerentes, o contraste atinge um máximo quando a rugosidade equivale a $\lambda/2$, decrescendo à medida que atinge o comprimento de coerência.

Uma curva levantada através de um ensaio realizado por SPRAGUE apud DAINTY (1975) é mostrada na Figura 3.4-13.

Como conclusão, se uma superfície possuir rugosidade e sofrer uma iluminação coerente, o granulado pode atingir um contraste suficiente para que um "grão" seja discernível. Este "grão" pode causar uma falsa percepção da posição da imagem sobre o sensor de posição, num medidor de distância. Esta falsa posição devido à triangulação pode sugerir que a superfície está a uma distância diferente da real.

Figura 3.4-13) Relação entre a Variação do Contraste do Padrão de Speckle e a Rugosidade de uma Amostra Metálica, Iluminada por Fonte de Coerência $\sim 0,0015\text{mm}$, $\lambda=500\text{nm}$, segundo SPRAGUE apud DAINITY (1975)

Como exemplo, considerando o caso descrito no capítulo 4, o medidor MD50 possui as seguintes características.

$L \sim 86\text{mm}$ (no final do campo de medição)

$\lambda \sim 670\text{nm}$

$A_r \sim 6\text{mm}$

Usando a equação (3-35), obtém-se para o tamanho "médio" do grão observado no sensor.

$$\langle \delta \rangle \approx 1,2 \cdot \lambda \cdot \frac{L}{A_r}$$

$$\langle \delta \rangle \sim 11\mu\text{m}$$

Supondo que o contraste seja suficiente, pode-se considerar a possibilidade de que a posição do "spot" no sensor de imagem seja perturbada, em no mínimo, tal tamanho de grão. Como resultado da equação de triangulação na distância máxima, um deslocamento de $14\mu\text{m}$ da imagem no sensor, representa uma variação de distância de $47\mu\text{m}$. (Veja Apêndice II). Avalia-se que uma variação de $11\mu\text{m}$ na

posição “spot”, causa um erro de estimativa de distância da ordem de $\pm 0,04\text{mm}$. No caso do sensor CCD esta variação pode ser encoberta pela natureza do sensor, que “integra” a imagem resultante num pixel. Já no caso do fotodiodo de efeito lateral esta variação pode causar o desvio estimado.

A medida que a rugosidade vai aumentando, o contraste do “Speckle” observado vai diminuindo, tornando a influência deste menor. Contudo, a rugosidade por si só, também pode induzir a erros.

Se a rugosidade for grande, comparável à precisão do equipamento, começam a surgir problemas no discernimento entre o que realmente seja um desvio da “média” da superfície ou algum “defeito” localizado. Para tanto, é necessário obter alguma forma de reduzir tanto o efeito do “Speckle” quanto da rugosidade superficial excessiva.

3.4.5 Algumas Técnicas de Redução do Efeito “Speckle” e da Rugosidade Superficial

Considerável esforço tem sido dispensado na investigação de métodos para reduzir o efeito do “Speckle”. Estes estudos têm sido realizados principalmente nas áreas de Holografia e Astronomia. DAINTY (1975). Algumas técnicas, como era de se esperar, estão relacionadas a aplicações específicas dessas áreas e portanto, não são adequadas para o caso dos Medidores de Distância.

Outros métodos, no entanto, são candidatos naturais à aplicação. O primeiro se refere a tentativa de reduzir o “Speckle” via diminuição da coerência da luz utilizada. Como já visto no capítulo anterior, o contraste aparente observado de um “Speckle” é inversamente proporcional à coerência da luz utilizada. Neste caso, para os medidores de distância, fontes de baixa coerência como LEDs ou lâmpadas incandescentes seriam as mais indicadas. Todavia, a dificuldade de colimação e produção de um “spot” bem definido por estas fontes, limitam sua aplicação a sistemas de baixa precisão e baixo custo. Alguns medidores da OMRON e KEYENCE são exemplos. Na Tabela 2 do capítulo 3 foram apresentados os comprimentos de coerência típicos para várias fontes.

Um segundo método propõe reduzir o “Speckle” via observação da imagem integrada no tempo, através de abertura móvel. Este método é detalhadamente descrito na referência MCKECHNIE apud DAINTY (1975), e é esquematicamente mostrado na Figura 3.4-14.

Neste método, sob a lente captadora é colocada uma abertura móvel, e o sinal resultante no sensor é produto da integração durante o período do movimento. É uma técnica utilizada em alguns sistemas para Holografia. Apesar deste método possibilitar uma diminuição considerável do contraste do “Speckle”, ocorre também uma limitação da resolução da imagem. MCKECHNIE apud DAINTY (1975). Sua utilização nos Medidores de Distância não foi noticiada

Figura 3.4-14) Integração do Speckle via Abertura Móvel

Uma variante desta técnica consiste em introduzir no feixe iluminador uma pequena oscilação. Dessa forma, mudanças significativas ocorrem no padrão de interferência, causadas pelas irregularidades superficiais. A imagem é captada e integrada durante um certo tempo. Este método além de reduzir o efeito do "Speckle" também "integra" a superfície quando a rugosidade é excessiva. O medidor MITUTOYO L548 se utiliza deste artifício, esquematizado na Figura 3.4-15.

Figura 3.4-15) Integrador de Speckle e Rugosidade no Medidor Mitutoyo L548

O feixe Laser é enviado a um pequeno espelho, ligado a um braço oscilante. O feixe refletido é enviado à superfície e captado pela óptica de colimação. O braço oscilante é dirigido eletricamente, de acordo com a necessidade. A oscilação produz uma variação de aproximadamente 1mm na posição do feixe iluminador. Segundo o fabricante, este artifício permite que a precisão aumente em até 5 vezes.

O uso de sensores tipo CCD também permite uma diminuição do efeito do "Speckle". Ao contrário dos sensores lineares, os CCDs são compostos de inúmeros sensores discretos, os "pixels". Assim, um sensor "integra" o padrão do granulado resultante sobre ele. Através de artifício eletrônico, é possível conjugar o efeito de sensores discretos vizinhos. Através desta conjugação a imagem é "filtrada",

atenuando os efeitos do ruído no contraste produzido pelo granulado. Esta filtragem pode ser efetuada seguindo os métodos de filtração digital de imagem, mais conhecidos por "filtros passa baixa". JÄHNE (1993). O método mais simples é o de "somar" a intensidade de um grupo de "pixels" vizinhos ao pixel de interesse, e atribuir o valor "médio" a este.

Uma variante simplificada deste método é apresentada no capítulo 4. Resumindo, trata-se de passar a sequência de pulsos da imagem dos pixels num circuito amostrador, que também efetua a função de um circuito passa baixa conjugado. O artifício tem apresentado bons resultados, como será mostrado mais adiante.

Figura 3.4-16) Artifício de Filtragem da Imagem Captada por um Sensor CCD

4. Projeto de Medidores de Distância por Triangulação

Nos capítulos anteriores foram descritas as principais configurações que os Medidores de Distância podem apresentar, principalmente aqueles que utilizam o Método de Triangulação. Foram descritos também os principais constituintes de um sistema e as suas vantagens e consequências no projeto global. A seguir são descritos alguns projetos desenvolvidos pelo autor, visando algumas aplicações específicas.

Os projetos são descritos, bem como os resultados obtidos e algumas conclusões relevantes.

4.1 Projeto de um Medidor : O MD50

4.1.1 Introdução

O termo MD50 provém de Medidor de Distância, campo de 50mm. Este medidor foi concebido para uma aplicação específica, a ser descrita mais adiante. Para esta aplicação uma série de requisitos foram impostos, as quais ilustram um projeto típico.

Os principais requisitos podem ser resumidos em:

- Campo de medição 50mm, sendo de 60 a 110mm a partir da face de referência.
- Precisão: $\pm 0,05\text{mm}$.
- Velocidade: 2 resultados/s.
- Superfícies a serem medidas: Longarinas de aço 1010 a 1045 com acabamento bruto ou jateado.
- Superfície podendo conter manchas de óleo, pó e focos de ferrugem.

O Laser a ser utilizado corresponde ao Diodo semiconductor, operando em 670nm, com potência máxima de 4mW útil. A justificativa para a escolha se relaciona à necessidade do usuário conhecer com precisão o ponto que está sendo medido, através de visualização direta.

4.1.2 Projeto da Cabeça Medidora

De posse das especificações, é necessário esboçar o projeto do sistema Óptico Mecânico da Cabeça Medidora.

Como já foi visto nos capítulos anteriores, a equação básica do Medidor por Triangulação por feixe normal pode ser expressa como:

$$d = \frac{A \cdot x}{(B - x)} \quad (4-1)$$

sendo

$$A = \frac{d_o - f \cdot \cos \theta}{\cos^2 \theta} \quad (4-2)$$

$$B = \frac{f \cdot \tan \theta}{\sin \alpha} \quad (4-3)$$

onde:

- x medida do deslocamento captado pelo sensor
- θ ângulo primário de triangulação, formado entre o feixe Laser, (normal à superfície) e o eixo do sistema óptico de captação
- α ângulo formado pelo sensor para manter a imagem no foco, com relação ao eixo do sistema óptico
- d distância estimada, medida a partir de uma distância d_o
- f distância focal da lente captadora

A primeira condição de projeto a ser respeitado é a da distância da origem d_o . Normalmente esta característica é importante devido a presença de elementos móveis, áreas com risco de impacto, etc. No caso da aplicação aqui descrita, d_o foi especificado ao redor de 60mm devido a presença da garra tracionadora do eixo "X" da punçoneira. Veja Figura 4.32.

A segunda condição importante é o campo de medida. O medidor deve possuir campo de 50mm como especificado.

Usando então a equação (4-1)

$$\Delta d = R = \frac{A \cdot x_{max}}{B - x_{max}} \quad (4-4)$$

onde:

- R campo desejado de medida ~ 50mm

$x_{m\acute{a}x}$ posição aparente da imagem captada no sensor de imagem
correspondente à distância $d_{m\acute{a}x} = d_0 + R$

Foi adotado um sensor CCD de 2.048 pontos, com comprimento de área sensível de 29mm. Cada elemento deste sensor possui comprimento de 14 μm . Para garantir uma faixa segura de medição foi adotado que $x_{m\acute{a}x} \sim 28\text{mm}$, permitindo campo para ajustes e a presença de "spots" com mais de 0,5mm. O sensor adotado foi um Toshiba TCD142D, utilizado em máquinas de fac-símile.

A precisão mínima foi especificada em $\pm 0,05\text{mm}$ para o medidor Laser. Isto impõe a necessidade de que, o menor deslocamento mensurável Δx , no sensor de imagem, seja capaz de produzir um $\Delta d < 0,05\text{mm}$. Portanto, pode-se concluir que:

$$\Delta d = P = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\frac{A \cdot x}{B - x} \right) \cdot \partial x \approx \frac{B \cdot A}{(B - x)^2} \cdot \Delta x \quad (4-5)$$

onde:

P precisão requerida, $\pm 0,05\text{mm}$

Δx mínimo deslocamento mensurável no sensor

Como a precisão requerida é a mínima, esta condição deve ser satisfeita para o pior caso, quando o sensor está vendo a distância $d_{m\acute{a}x} = d_0 + R$, correspondendo à imagem em $x = x_{m\acute{a}x}$. Como a menor variação do sensor é $\Delta x = 14\mu\text{m}$, tem-se assim a seguinte condição:

$$\frac{B \cdot A}{(B - x_{m\acute{a}x})^2} \cdot \Delta x \leq 0.05\text{mm} \quad (4-6)$$

O termo α da equação (4-3) corresponde à inclinação que o sensor deve apresentar com relação ao eixo óptico para manter o foco da imagem sob sua superfície. Novamente se referenciando à Figura 2.3.3 pode-se assumir que:

$$\tan \alpha \approx \frac{\Delta h'}{\Delta s'} \quad (4-7)$$

Usando as equações (2.4), (2.5) e (2.8), pode-se escrever que :

$$\Delta h' = \frac{f \cdot d \cdot \sin \theta}{\left(\frac{d_0}{\cos \theta} + d \cdot \cos \theta - f \right)} \quad (4-8)$$

e

$$\Delta s' = \frac{(s_o + R \cdot \cos \theta) \cdot f}{\left(\frac{d_o}{\cos \theta} + R \cdot \cos \theta - f\right)} - \frac{s_o \cdot f}{\left(\frac{d_o}{\cos \theta} - f\right)} \quad (4-9)$$

desprezando o sinal devido a orientação de x , resulta que

$$\tan \alpha = \tan \theta \cdot \frac{\left(\frac{d_o}{\cos \theta} - f\right)}{f} \quad (4-10)$$

Observando as equações (4-5), (4-6) e (4-10) conclui-se que, felizmente, não existe uma solução única. Isto permite que o projetista use outros parâmetros, principalmente aqueles de ordem prática, para encontrar uma solução mais conveniente.

Os impedimentos práticos mais comuns são referentes ao tamanho da cabeça, ângulo de incidência de feixe, forma e posição da imagem sobre o sensor, abertura da lente captadora etc.

Se o ângulo θ por exemplo for muito pequeno, ocorre uma diminuição do tamanho da cabeça, mas isto impõe que o sensor tenha um ângulo muito raso em relação ao feixe da imagem. O ângulo θ grande, por outro lado, aumenta o tamanho da cabeça devido as restrições com $d\theta$. No caso aqui discutido, existe a necessidade do feixe incidir na normal à superfície para discriminar com precisão o ponto que está sendo medido.

Outra limitação do ângulo θ se refere ao material e tipo de superfície que está sendo medida. Como já visto anteriormente, certos materiais apresentam comportamento especular, o que significa que os ângulos θ pequenos podem refletir o feixe incidente para o sensor. No caso do metal usado nas longarinas e no estado que se apresenta, as faixas de θ podem variar de 15° a 60° , com pouca variação no índice de reflexão difusa (ver discussão mais adiante).

A escolha de f também, muitas vezes, pode influenciar no projeto. A existência de lente com projeto já conhecido, e matrizes ou padrões prontos e em produção seriada, pode ser um forte argumento para utilização de determinado conjunto óptico. Nestes casos, adequa-se θ para se atingir as condições de contorno e funcionamento adequado.

Como não existe uma solução única, a forma recomendada para se “fechar” uma configuração, é a colocação das fórmulas (4-5), (4-6) e (4-10), bem como das equações (4-8), (4-9), (4-1), (4-2) e (4-3) numa planilha de cálculo, tal como MATHCAD, e ir adequando os valores. No Apêndice I é apresentado uma listagem do programa MATHCAD deste exemplo.

Para o caso aqui descrito, os seguintes valores foram adotados inicialmente.

$$\theta = 45,5^\circ$$

$$f = 42mm$$

$$\alpha = 44,8^\circ$$

$$\text{para } x=0, s'=85,00mm, h'=0$$

$$\text{para } x=x_{\text{máx}}, s'=65,14mm, h'=19,73mm$$

$$d_0 = 60mm$$

$$R = 50mm$$

$$\text{resolução estimada para } x=x_{\text{máx}} : P = 0,047mm$$

As fórmulas (4-1), (4-2) e (4-3) são válidas para lentes finas, ideais, sem aberrações. Executado o anteprojeto, é necessário se levar em conta as condições ópticas reais.

O primeiro ponto que deve ser considerado é que a lente é espessa e que os termos s' e h' não representam, necessariamente, a posição da imagem no sensor. Como já visto em capítulos anteriores, é necessário a locação do sensor e da lente de captação levando-se em conta os "pontos principais" do conjunto óptico.

O segundo ponto importante se refere a abertura da lente. A abertura define a quantidade de energia luminosa que a lente é capaz de coletar e direcionar para o sensor. Como já foi discutido no capítulo 3 item 3.2, a abertura influencia nas aberrações ópticas das lentes. Assim, visando definir qual seria a abertura mínima, deve-se escolher o ponto de operação do sensor de imagem e o Laser a ser utilizado.

Como o sensor a ser utilizado é um CCD da Toshiba TCD142D, o ponto de operação depende de vários fatores, principalmente o chamado Tempo de Integração. Este tempo corresponde ao período em que o sensor percorre e "descarrega" todos os seus 2.048 pontos sensíveis. Caso este tempo seja longo, facilmente o sensor satura, apresentando pequena faixa dinâmica de intensidades, além da razão sinal/ruído se tornar desfavorável. Caso este tempo seja muito curto, obtém-se um ganho na faixa dinâmica e razão sinal/ruído, porém o sistema eletrônico de processamento precisa ser rápido, encarecendo o conjunto. Como solução de compromisso, visando baixo custo, foi adotado para este tempo o valor de 10ms, ou seja 100 varreduras/s.

Pela curva de sensibilidade apresentada no capítulo 3, na descrição do sensor CCD, a curva da Figura 3.3-36 relaciona o tempo de integração, o nível do sinal de saída e a iluminância necessária. Adotando um sinal confortável de 200mV, e 100 varreduras por segundo, se obtém que a iluminância deve ficar ao redor de 5 lux.

Notar que a unidade de iluminância corresponde a uma unidade fotométrica, e não radiométrica. Ou seja, a curva resposta de sensibilidade do olho humano está implícita. Como normalmente as potências dos Lasers são expressas em Watts, unidade radiométrica de fluxo luminoso, é necessária a conversão. Primeiramente é preciso estimar o fluxo fotométrico necessário. Sabendo-se que um lux (iluminância) corresponde a um fluxo fotométrico de 1 lumem numa área de $1 m^2$, e estimando que

o “spot” da imagem sobre o sensor possui diâmetro de 0,25mm, ou seja $5 \times 10^{-8} \text{ m}^2$, obtém-se que o fluxo presente é de $2,5 \times 10^{-7}$ lumens.

Para converter a curva-resposta usada para o levantamento da sensibilidade do CCD de unidades fotométricas para radiométricas, é necessário estabelecer em que comprimento de onda o sistema iluminador irá operar. O Laser adotado, por diversas razões já descritas, seria o Laser semiconductor visível, operando a 670nm. Neste comprimento de onda, 1 Watt corresponde a cerca de 68 lumens.

Assim, conclui-se que o fluxo radiométrico necessário é cerca de $3,7 \times 10^{-9}$ Watts. Para estimar o tamanho da abertura, é necessário usar a equação de ligação radiométrica já exposta no capítulo 3, item 3.4.2.

A equação de ligação definida é a seguinte:.

$$P_r = P_i \cdot \tau_i \cdot \frac{A_r}{d^2} \cdot \tau_r \cdot r_d \quad (4-11)$$

onde:

- τ_i fator perda da óptica do colimador, neste caso estimado em 0,7;
- τ_r fator perda da óptica do captador, estimado em 0,99, desde que as lentes possuam filmes antirefletores;
- A_r/d^2 ângulo sólido da óptica de captação, onde A_r é a área da abertura desejada, e d a distância máxima entre o alvo e a lente;
- r_d fator refletância direcional difusa da superfície do alvo, que neste caso corresponde às chapas de aço 1020, cujo ensaio de refletância direcional é mostrado na Figura 4.1-1;

Adotando o ângulo de captação ao redor de 45° , se obtém $r_d \sim 0.008 \text{ sr}^{-1}$.

Estimando a potência de emissão P_i ao redor de 1 mW, e impondo a condição de fluxo mínimo P_r de $3,7 \times 10^{-9}$ Watts, na distância máxima de 110mm, se obtém que o diâmetro da abertura mínima deve ser de 3mm. Visando permitir versatilidade com relação aos materiais, bem como prever diminuição do fluxo captado devido ao envelhecimento do Laser e sujeiras acumuladas sobre a lente, normalmente costuma-se adotar o diâmetro útil maior que o calculado, ao redor de 2 vezes, obtendo-se então o valor mínimo de 6mm.

Figura 4.1-1) Refletância Direcional do Material Usado nas Longarinas

De posse da estimativa da abertura mínima, e também da geometria preliminar do sistema óptico, é necessário que este seja estudado, levando-se em conta as características reais das lentes utilizadas. A lente utilizada com $f = 42mm$, possui as características geométricas indicadas na Figura 4.1-2.

Figura 4.1-2) Lente Captadora Adotada para o Medidor MD50

Para este levantamento, o mais conveniente é introduzir o sistema num programa de cálculo óptico, tal como SODA, GENII-PC ou CODE-V. Para tanto é necessário introduzir a geometria do sistema preliminar, no sistema de coordenadas usado pelo programa. Na Figura 4.1-3 é esquematizada a situação.

Figura 4.1-3) Geometria do Sistema a ser Analisado pelo Programa CODE-V de Cálculo Óptico

Como pode ser observado na figura, o campo angular de captação corresponde ao ângulo que cobre a faixa de distâncias desejadas, cerca de $16,9^\circ$, de acordo com a geometria do sistema. Observar que o “objeto” corresponde a esta trajetória. O sensor de imagem está posicionado no ângulo estimado. A lente é orientada de forma que seu eixo principal divida o campo angular de captação ao meio, no caso cerca de $8,4^\circ$. As distâncias são consideradas, preliminarmente, como se partissem do “centro” da lente.

Efetuada esta transformação de coordenadas, o programa facilmente obtém as características do conjunto de lentes adotado, e até sugere pequenas correções objetivando diminuir os efeitos de “Coma” e aberrações esféricas. Automaticamente, as posições relativas são alteradas com relação às superfícies e “pontos principais”. É importante ressaltar que é necessário especificar sobre quais parâmetros o programa está livre para atuar, e quais devem ser fixados, visando não fugir demasiadamente das condições geométricas requeridas pelo método da triangulação. No Apêndice V está indicado o levantamento das características ópticas do sistema com o auxílio do programa CODE-V. Uma informação muito útil é o diagrama de “spot”. Neste caso, corresponde à imagem que será projetada sobre o sensor de posição. Como regra geral, estes “spots” devem ser os menores possíveis, porém nem sempre isto é alcançável. Assim, deve-se procurar uma solução onde estes sejam bem definidos. Na Figura 4.1-4 é mostrado o resultado previsto.

Figura 4.1-4) Estimativa do “Spot” sobre o Sensor de Imagem, como Previsto pelo Programa CODE-V.

Baseado nas estimativas fornecidas e verificadas no programa de cálculo óptico, já é possível um esboço detalhado da configuração mecânica da cabeça medidora.

Figura 4.1-5) Esboço da Cabeça Medidora MD50

As principais partes podem ser assim descritas, de acordo com a Figura 4.1-5. O Colimador do Laser “1”, é destinado a focalizar o feixe Laser na região de interesse. Foi utilizado o colimador descrito no capítulo 3, item 3.1.1. O colimador possui um ajuste mecânico de forma a permitir o posicionamento da região de melhor foco, dentro do campo de medição. Geralmente, o melhor foco é colocado no meio do campo de medição. Neste ponto o “Spot” foi medido, apresentando aproximadamente 0,15mm. A mecânica, bem como a óptica, foi desenhada para enviar o feixe com emergência normal à superfície “2”, chamada de superfície de referência.

Esta face “2” é a referência a partir da qual são aferidas as distâncias e executada a calibração do equipamento. Infelizmente, devido a problemas mecânicos como as tolerâncias de fabricação, tolerâncias das lentes de colimação, etc, ocorrem desvios que podem fazer com que o feixe colimado não saia normal à esta superfície. Erros de até 2 graus são comuns, tanto nos planos “xy” quanto nos “yz”. Através de cuidadoso estudo do processo de fabricação, é possível que tais erros sejam minimizados, porém eles sempre existirão.

Além destes, outros erros também são possíveis. A lente de captação “3” pode sofrer pequenos desvios e por isso possui um mecanismo de ajuste de foco, via posicionamento do conjunto em relação ao sensor. Caso a imagem sobre o sensor não esteja boa, um ajuste de foco “D” é previsto, na lente captadora.

Para o sensor “4”, devido às tolerâncias de fabricação mecânica do suporte, bem como às tolerâncias de fabricação do próprio sensor, há também a obrigatoriedade da utilização de mecanismos de ajustes. Com o intuito de efetuar o ajuste do sensor, ele é colocado numa mesa posicionadora “11”, como descrito na Figura 4.1-6.

Figura 4.1-6) Mesa Posicionadora de Sensor de Imagem

O sensor é colocado numa base metálica que possui ajuste de posicionamento nos eixos "A", "B", "C". Caso, por exemplo, um colimador Laser produza um desvio de ângulo no plano "yz", o ajuste "C" não será igual ao ajuste "B". Para tanto, um alvo é colocado no começo do campo de medição e o ajuste "B" é realizado até que a imagem do objeto incida sobre a região sensível. Isto pode ser executado tanto por observação direta, quanto por acompanhamento do sinal eletrônico. Em seguida o alvo é colocado no fim do campo de medição e o ajuste "C" é efetuado de maneira similar. O ajuste "A" é realizado com o objetivo de centrar o campo sensível do detector na região de medida.

Na carcaça da cabeça são colocados canais para "o-rings" visando a vedação do conjunto. Na saída do feixe iluminador é colocada uma janela de vidro com filme antirefletor "5", que também é presa por "o-ring" circular. A finalidade destes é tornar a cabeça medidora totalmente vedada à entrada de fluidos e sujeira.

No orifício da lente captadora também é colocada uma janela antirefletora coladas a filtros ópticos, o que permite somente a entrada da luz Laser, "6". O uso dos filtros se justifica pelo objetivo de evitar a entrada de luz ambiente, que possa influir na captação do sinal óptico.

Ao redor da carcaça da cabeça são colocados uma série de pontos de fixação, com furos "cegos", "7", visando fixar o equipamento, evitando desse modo a entrada de sujeira através destes. Foi previsto ainda, o uso de ar comprimido para evitar o acúmulo de pó nas lentes e janelas. No ponto "12" é colocado o alimentador de ar. Através de uma canalização, este ar é conduzido sobre as janelas onde são colocados sopradores opcionais.

Em "8" é colocada a eletrônica de controle de potência do Laser. Ao ser colocada bem próxima ao Laser, evita-se a ocorrência de ruídos ou oscilações parasitas que possam degradá-lo. Em "9" é colocado o pré-amplificador do sensor CCD. A transmissão é efetuada através do conector "10" em sinais diferenciais. Isto ajuda a cancelar os ruídos elétricos, porventura captados.

4.1.3 Projeto Eletrônico

O sensor adotado foi escolhido com base, principalmente, no fator custo e nas boas características de resolução e comprimento. Como é necessário um campo grande de medição, foi adotado um sensor CCD Toshiba TCD142D, com 2.048 pontos, com cada ponto possuindo área quadrada de aresta $14\mu\text{m}$. Este sensor foi desenvolvido para uso em máquinas de fac-símile, possuindo preço baixo e boas características de sensibilidade.

Figura 4.1-7) Aspecto do Sensor Toshiba TCD142D, Utilizado no MD50

A escolha do tipo de sensor define a arquitetura eletrônica do equipamento. O diagrama de blocos adotado é mostrado na Figura 4.1-8.

Figura 4.1-8) Diagrama de Blocos do Sistema Eletrônico do Medidor MD50

O bloco “controle do CCD” destina-se a gerar padrões de onda de chaveamento, necessários para comandar o sensor óptico. O sinal de controle é enviado à cabeça medidora chegando ao CCD. Na cabeça o sinal óptico é captado e o sinal de saída do sensor é pré-amplificado diferencialmente. O sinal diferencial é conduzido ao “Amplificador” e ao “Filtro/comparador”, entregando ao Processador a posição da imagem, como será descrito adiante. O Processador calcula a posição, efetua os cálculos de medição e filtragem apresentando o resultado.

O bloco de controle do CCD pode ser detalhado como a seguir.

Figura 4.1-9) Diagrama em Blocos do Sistema de Controle do CCD

O relógio central produz a base de tempo necessária para a geração do padrão de ondas para o controle do CCD. Este padrão é armazenado numa memória EPROM, cujo conteúdo é gravado de acordo com o tipo de CCD que está sendo utilizado. Alguns sinais, chamados de sinais de controle do CCD, são fortalecidos de forma a aumentar sua capacidade de satisfazer os requisitos elétricos do sensor. Outros sinais são enviados para o Computador para uso durante o processamento. É interessante notar que o padrão de ondas é gravado na memória EPROM de forma sequencial, sendo que o “Divisor” produz os endereçamentos necessários. O padrão gravado corresponde a um ciclo completo de aquisição e deslocamento da imagem no CCD. No fim do ciclo, um pulso de “reinício” é enviado ao divisor/contador, zerando a contagem dos endereços. O circuito eletrônico é apresentado no Diagrama EPCCD010 parte 1 no Apêndice VI.

O CCD utilizado TCD142D, como já visto anteriormente, necessita de 4 canais principais de comando, SH , ϕA , ϕB , RS mostrados na Figura 4.1-10. Os sinais de saída da imagem são dois: OS , DOS .

Figura 4.1-10) Diagrama de Tempo e Controle do CCD Toshiba TCD142D

Além destes sinais são gerados também outros dois, chamados de *VALID* e *DOT*. Estes últimos, por sua vez, são destinados a sincronizar o Processador Central com os sinais da imagem captada. O sinal do *VALID* indica os pontos válidos para captação luminosa, indicando também o início e fim da região sensível. O sinal *DOT* assume o padrão de um pulso a cada ponto sensível, indicando assim, através de sua contagem, qual o "pixel" que está presente na saída do sensor.

Figura 4.1-11) Os sinais VALID e DOT

Os blocos do Sensor e da Amplificação podem ser melhor descritos da seguinte forma:

Figura 4.1-12) Diagrama em Blocos do Sistema Amplificador

O CCD produz os sinais *OS* e *DOS*. O primeiro corresponde ao sinal de "vídeo". O segundo corresponde a uma saída compensadora, destinada a cancelar os ruídos presentes em *OS*, devido ao mecanismo de chaveamento interno de comando do CCD. Na Figura 4.1-13 estão representados os detalhes.

Figura 4.1-13) Sinais de Comando e Imagem do CCD

O circuito eletrônico de comando do CCD na Cabeça Medidora corresponde ao Diagrama EPMC9132 no Apêndice VI.

Os sinais ϕA , ϕB são encarregados de deslocar a "carga" resultante dos sensores ópticos. O sinal RS "limpa" a carga após esta ser amostrada pelo sinal $SAMPLE$. Os sinais da imagem, ou "vídeo" são obtidos em *OS* e *DOS*. Através de amplificação diferencial entre *OS* e *DOS* é possível cancelar os ruídos de chaveamento. Outra vantagem de se utilizar a amplificação diferencial é o cancelamento dos ruídos elétricos espúrios captados pelo cabo de ligação.

Os sinais são então amplificados, sendo que no primeiro estágio é implantado um ajuste de ganho. Em seguida é efetuado também um ajuste de "nível de fundo", para acertar as faixas de amplificação, visto que, por problemas térmicos, nem sempre OS e DOS possuem nível DC equivalente.

A seguir o sinal resultante é então dividido entre dois blocos amostradores. Como já discutido anteriormente, o sinal resultante de um sensor CCD não é uma onda "plana" ou contínua com relação ao sinal luminoso presente, e sim uma série de pulsos, cuja amplitude é proporcional ao acúmulo de carga produzido pela presença de luz. Assim, o sinal resultante tem o aspecto esquematizado na Figura 4.1-14.

Figura 4.1-14) Forma do Sinal de Saída do CCD

Para a transformação desses pulsos, é usado o artifício eletrônico de amostragem e retenção síncrona, mais conhecido por "sample-and hold". O sinal "SAMPLE" da Figura 4.1-13 comanda uma chave analógica que armazena o sinal de pulso de vídeo num amplificador/acumulador conforme esquema da Figura 4.1-15.

Figura 4.1-15) Amostragem e Retenção do Sinal Pulsado de Vídeo

Um segundo Amostrador, comandado pelo sinal "Light Shield" serve para armazenar o sinal proveniente de alguns "pixels" cegos, presentes no início da área sensível do CCD. Estes "pixel cegos" servem para dar uma amostra do sinal de ruído térmico presente, mais conhecido por "dark signal". Este valor é armazenado e "subtraído" de todos os "pixels" não cegos subsequentes, através do amplificador diferencial final.

O sinal resultante é antes submetido a um comparador. O sinal do comparador, digital, é enviado ao micro-processador, junto com o sinal *VALID*.

O circuito eletrônico da Placa de Amplificação é apresentado no Diagrama EPCCD010 parte 2 no Apêndice VI.

Como artifício para minimizar o efeito da rugosidade do material, e também o efeito do granulado óptico ou "Speckle", foi adotado o circuito de "amaciamento", ou suavização da imagem. Adotou-se o esquema de se ajustar o conjunto RC do Amostrador da Figura 4.1-15. Através deste ajuste, é possível prover uma pequena "integração" do sinal óptico atenuando os efeitos nocivos da rugosidade. Na Figura 4.1-16 é apresentado o resultado.

Figura 4.1-16) Filtragem do Sinal Amostrado para Diminuição do Efeito da Rugosidade

O valor da filtragem "passa-baixa", $\tau = RC$, foi escolhido empiricamente, em ensaios práticos tendo como objetivo a diminuição do efeito observável devido a rugosidade. A importância deste artifício será discutido mais adiante.

Devido às variações do índice de refletância que ocorrem no material que está sendo medido, como já visto no capítulo 3, item 3.4.3, foi previsto o uso de um dispositivo de controle de potência do Laser. A escolha da estratégia de variar a potência de emissão ao invés de controlar o ganho do amplificador, se justifica pela pequena faixa dinâmica da intensidade luminosa do CCD. Como já visto, certos tipos de CCD saturam facilmente, e desta forma, controles posteriores de amplificação são inúteis.

O controle de potência é diagramado na Figura 4.1-17.

Figura 4.1-17) Diagrama em Blocos do Controle de Potência do Laser

O esquema eletrônico de controle da Potência do Diodo Laser é mostrado no Diagrama EPDL020 no Apêndice VI. O esquema do D/A 12 bits é mostrado no Diagrama EPA0200.

O micro-processador envia um sinal analógico indicando a potência desejada; este sinal é comparado com a potência captada pelo fotodiodo monitor de potência, alojado internamente ao Diodo Laser. Um circuito de ajuste de corrente efetua a correção da potência aplicada ao Laser, compensando a potência captada pelo sensor de imagem.

A decisão de variar a potência é executada pelo programa de controle, a partir da medida do sinal captado pelo CCD. Tanto o ajuste de potência quanto o processamento matemático, são efetuados no processamento interno como será discutido a seguir.

4.1.4 Programa de Controle

O processador adotado foi um 8031 da Intel, devido a sua simplicidade e baixo custo. O circuito do microprocessador central é representado nos Diagramas EMP3111 e EMP3111b no Apêndice VI.

Para a discriminação da posição da imagem no sensor foi usado o seguinte método. O sinal *VALID*, como já discutido, informa o início/fim do período de varredura do CCD. O sinal *DOT*, contém pulsos sincronizados com o sinal de saída do CCD, indicando assim qual o "pixel" que está sendo apresentado na saída do circuito amostrador/condicionador.

Para melhor compreender o processo basta observar a Figura 4.1-18.

Figura 4.1-18) Método de Captação da Posição da Imagem

A medida da posição é realizada da seguinte forma: o sinal *VALID* é ligado a uma interrupção do micro-processador (*INT0*). Esta interrupção é programada para zerar um contador (*T0*) interno. Este contador é programado para armazenar o número de pulsos *DOT*. Assim, sempre que uma varredura é iniciada o contador é zerado, fornecendo dessa maneira, uma medida ou escala de posição dentro da varredura.

O sinal *DIG* é ligado a outra interrupção (*INT1*). Sempre que houver sinal de imagem de intensidade conveniente, surgirá um sinal *DIG*. Neste instante, um segundo contador, (*T1*), é ligado visando contar o número de pulsos *DOT* presentes dentro do sinal. Este contador então mantém um número proporcional à largura da imagem.

Ao mesmo tempo é captado a posição atual, através do contador (*T0*), na borda de descida da imagem.

Figura 4.1-19) Captação da Largura da Imagem

A largura da imagem captada em (*T1*) é dividida por 2, e subtraída da contagem captada em (*T0*). Obtém-se, assim, a posição aproximada do centro da imagem captada. Esta posição corresponde ao “número mágico” a ser usado no processo de calibração. Caso a imagem captada seja resultante de superfície muito rugosa, o perfil desta raramente se apresenta na forma indicada na Figura 4.1-19. Neste caso, múltiplos sinais *DIG* estão presentes, como está representado na Figura 4.1-20.

Figura 4.1-20) Efeito da Rugosidade na Imagem Captada

Para contornar este problema, e ainda assim, obter a posição do "centro" da imagem é efetuado um cálculo de "centro de massa" do pulso. No exemplo da Figura 4.1-20:

$$x_{medio} = \frac{x_0 \cdot n_0 + x_1 \cdot n_1 + x_2 \cdot n_2}{n_0 + n_1 + n_2} \quad (4-12)$$

Devido ao fenômeno do granulado óptico, o número de transições em DIG para uma imagem pode ser grande, tornando o conjunto lento devido aos cálculos necessários. Para evitar isso, foi adotado o esquema de "filtragem" ou "suavização" da imagem captada, através do "passa baixa" colocado no circuito amostrador do sinal, como descrito anteriormente na Figura 4.1-16. A escolha do tempo de amortecimento τ , foi executada empiricamente através da visualização de uma série de amostras de superfícies, a qual o aparelho será submetido.

No final da varredura, a posição do centro x_{medio} e a largura l_{medio} são armazenadas numa pilha. Esta pilha tem tamanho determinado pelo número, escolhido pelo usuário, de captações a ser considerado para o cálculo da posição média. Este número de captações pode ser adotado entre os valores 4, 8, 12, 16, 32, 64, 128.

Dado o número de captações desejado, é montado um banco de posições. Dentro deste banco, antes de ser efetuado o cálculo da média, uma seleção é realizada visando retirar valores discrepantes. Dado um número de média n , são captados na realidade $n+4$. Dentro deste banco são descontados os 2 resultados maiores e os 2 menores. O número de descartes foi obtido experimentalmente, pela observação do conteúdo típico desses bancos.

O resultado deste artifício é o anulamento dos ruídos provenientes do movimentação da peça, vibrações, ruídos luminosos intermitentes, etc.

Efetuada o cálculo de média, o resultado é enviado para a função transferência calibradora. Esta equação transforma a posição média captada no sensor, na posição do objeto alvo. Esta calibração será descrita mais adiante.

Como o cálculo da média bem como o processamento da função transferência calibradora são lentos, adotou-se o seguinte artifício: são criados 2 bancos de captação; enquanto se calcula a média e o resultado para um banco, o segundo está sendo preenchido pelas captações provenientes das interrupções. Ou seja, enquanto se calcula o resultado de um banco, o outro está sendo atualizado para cálculo posterior.

No momento em que o cálculo é finalizado e o resultado é apresentado, e caso o banco alternativo esteja completo com o número de aquisições desejadas, os bancos são intercambiados e o cálculo se reinicia.

Este procedimento se justifica porque durante a maior parte do tempo de uma varredura, o sistema entra no estado de espera, aguardando ser interrompido. Usando o esquema dos bancos alternantes, este tempo ocioso pode ser aproveitado.

Caso durante alguma captação, não exista alvo ou não haja presença do sinal *DIG*, a varredura é desprezada. Caso a situação persista por um número determinado de varreduras seguidas, o sistema interpreta que o alvo está fora do campo de medição, sinalizando condição de erro.

O controle de potência do Laser é executado da seguinte forma: a largura da imagem captada, l_{medio} , é comparada com o valor usado na calibração; caso esteja maior, informa o processamento para diminuir a potência óptica permitida; caso esteja menor ou ausente, informa para aumentar a potência. Assim, o controle de potência age visando sempre manter a largura captada ao redor do valor usado na calibração. Isto permite que o sistema se adapte automaticamente, às variações de refletância da superfície que está sendo medida.

Figura 4.1-21) Monitoramento da Potência Óptica Captada

Sempre que a potência atinge o valor máximo, e mesmo assim, não se obtém a captação do pulso *DIG* da imagem, a potência é zerada por alguns segundos. Este procedimento é necessário para evitar o efeito de saturação do CCD. Ao se saturar o sensor, ele deixa de enviar sinais proporcionais à iluminação presente, simulando uma situação de "sem alvo". Neste caso, o controle de potência aumentaria ainda mais a potência emitida, agravando a situação. Ao se atingir a potência máxima, o sistema zera a potência emitida visando tirar o sensor do estado de saturação. A listagem do programa de controle está no Apêndice VII.

4.1.5 Processo de Calibração

O processo de calibração é uma etapa fundamental para o bom funcionamento do equipamento. Como já observado, as equações teóricas são aproximadas, não levando em consideração uma série de fatores, além principalmente, dos erros de fabricação.

O método mais utilizado é percorrer o campo de medição em intervalos conhecidos e registrar os valores da posição da imagem captada. Com esses dados, é possível prever a posição do alvo tendo por base a posição da imagem captada.

Ao invés de manter uma "tabela" na memória do sistema processador, o método descrito a seguir é mais econômico. Sabe-se que a equação aproximada que rege o medidor por triangulação é a seguinte:

$$d = \frac{A \cdot x}{(B - x)} + C \quad (4-13)$$

onde:

- x medida do deslocamento captado pelo sensor;
- d distância total, medida a partir da face de referência;
- $C = d_0$ distância do início do campo de medição, para $x=0$;
- A, B constantes geométricas do sistema.

Dado um conjunto de pares (d_i, x_i) obtidos pelo ensaio de calibração, se deseja encontrar as constantes A, B, C da equação (4-13), que melhor satisfaçam o conjunto obtido. Para isso, o uso do método dos "Mínimos Quadrados" é o mais indicado. Preliminarmente, é necessário transformar a equação (4-14) em uma equação equivalente de parâmetros lineares.

$$d_i = \frac{A \cdot x_i}{(B - x_i)} + C \quad (4-14)$$

$$d_i \cdot (B - x_i) = A \cdot x_i + B \cdot C - C \cdot x_i \quad (4-15)$$

$$d_i = \left(\frac{A - C}{B} \right) \cdot x_i + \left(\frac{d_i}{B} \right) \cdot x_i + C \quad (4-16)$$

que pode ser escrita como:

$$d_i = coef_0 \cdot x_i + coef_1 \cdot x_i \cdot d_i + coef_2 \quad (4-17)$$

Assim, fornecido um número n de pares (d_i, x_i) , deve-se encontrar os parâmetros $coef_0, coef_1$ e $coef_2$ que melhor satisfaçam a equação (4-17). Usando-se o método dos mínimos quadrados, obtém-se os coeficientes que podem ser utilizados para o cálculo das constantes A, B e C .

$$A = \frac{coef_0}{coef_1} + coef_2 \quad (4-18)$$

$$B = \frac{1}{coef_1} \quad (4-19)$$

$$C = coef_2 \quad (4-20)$$

No Apêndice II é apresentado um programa MATHCAD que faz a interpolação da equação (4-17), pelo método dos mínimos quadrados, para um exemplo prático: a cabeça medidora MD50 deste projeto, número de série 014.

O levantamento dos pontos (d_i , x_i) foi realizado do seguinte modo: foi construído um suporte que posiciona um parafuso micrométrico no campo de medida desejado, como indicado na Figura 4.1-22. O parafuso inicialmente adotado foi um Mitutoyo com campo de 50mm e *acurácia*⁵ certificada de $\pm 0,01\text{mm}$.

Figura 4.1-22) Dispositivo de Calibração da Cabeça Medidora MD50

Os procedimentos seguidos foram:

- Primeiramente é efetuado um ajuste do colimador Laser, visando colocar a região de melhor “spot” dentro do campo de medida. Na Figura 4.1-23 , abaixo é mostrado o perfil resultante usando alguns colimadores comerciais. A cintura foi medida por intermédio de uma fenda giratória (“*slit*”) de 0.01mm.

⁵ Segundo Dicionário AURÉLIO ELETRÔNICO, versão 1.3 de julho 1994., o termo Acurácia corresponde à propriedade de uma medida de uma grandeza física que foi obtida por instrumentos e processos isentos de erros sistemáticos. É definida como a conformidade de uma medida com relação a um valor aceito como padrão. Por exemplo: 3,14159 é um valor mais acurado de π do que 3,14160.

Figura 4.1-23) Cintura do Feixe Laser ao longo do campo de medida , usando Colimador Asférico AP4545 da DIVERSE OPTICS INC , e também um Tripleto Esférico de baixo custo, 06GLC002 da MELLES GRIOT .

- A seguir o posicionamento do CCD é ajustado, com o objetivo de obter uma boa captação em todo o trecho de medida. Este ajuste deve ser feito cautelosamente, de preferência em ambiente escuro, visualizando-se a imagem do “spot” iluminado do alvo incidente sobre a região sensível do sensor de imagem. Para facilitar o processo, toma-se o auxílio de um osciloscópio ligado nos sinais de *VALID*, *DIG* e *ANA*.

Figura 4.1-24) Verificação dos Sinais VALID, ANA no Alinhamento do Sensor de Imagem

- Com uma amostra do material alvo, são reguladas as faixas de potência do emissor Laser, ganho da placa amplificadora e fator de amortecimento ou filtro de imagem. Estes ajustes permitem a adequação do funcionamento do aparelho para uma determinada superfície. A desvantagem é que esses parâmetros podem alterar o comportamento do conjunto no aspecto de calibração. Assim, uma vez calibrado para um tipo de superfície, a substituição desta pode causar desvios.
- Efetuado o ajuste do colimador, das faixas de potência e dos filtros de suavização da imagem, a calibração propriamente dita pode ser então realizada. Através de um bloco padrão, de 60mm no caso, se ajusta a posição inicial do parafuso micrométrico.

Figura 4.1-25) Ajuste da Origem do Campo de Medição

- A partir daí, se coloca o medidor no "Modo Calibração". Este modo de operação está contido no Software residente, e consiste em fornecer a posição da imagem x_i sobre o sensor. Esta posição corresponde a um "número mágico", que varia linearmente entre 0 e $x_{máx}$, e corresponde ao número do "pixel" central da imagem.
- Em seguida é levantada uma tabela (d_i, x_i) sendo d_i o valor expresso no parafuso micrométrico e x_i o valor de pixel fornecido pelo programa de controle. Procura-se dar voltas inteiras e sempre movimentar o parafuso num mesmo sentido, para evitar a influência de folgas ou outros erros sistemáticos.
- Executada a tabela de calibração, utiliza-se os dados obtidos como entrada para o programa MATHCAD já descrito, que efetua a interpolação da curva prática usando a curva teórica como base.
- As constantes encontradas são colocadas no equipamento, via software, que passa a utilizá-las para transformar o "número mágico" x_i nas distâncias estimadas d_i . O cálculo é efetuado usando notação em ponto fixo, o que permite que todas as rotinas internas trabalhem somente com aritmética inteira. Uma unidade adotada corresponde a 0,01mm. Erros de truncamento são evitados através do cuidadoso estudo da sequência das operações matemáticas, e também do uso de aritmética inteira de 32 bits.

4.1.6 Resultados Obtidos

4.1.6.1 Acurácia, Linearidade e Repetibilidade

Na Figura 4.1-26 a seguir, é ilustrada a curva de erro típica para uma cabeça medidora MD50, como projetada.

Figura 4.1-26) Curva de Calibração do Medidor MD50 n° de série 014, Usando Parafuso Micrométrico com Acurácia Melhor que $\pm 0,01\text{mm}$ e Superfície Branca Fosca.

A abscissa correspondente à distância da superfície, é lida no parafuso micrométrico de calibração. A ordenada corresponde ao erro encontrado entre a leitura do medidor e a posição considerada pelo parafuso micrométrico. O sistema usou as constantes de calibração encontradas pelo programa interpolador. Veja Apêndice II.

Considerando-se que a curva de calibração permite ao sistema anular os erros sistemáticos, o erro restante corresponde àquele que resulta da “imprecisão” do equipamento. Adotando-se um intervalo de confiança de 95%, obteve-se uma acurácia de $2\sigma = \pm 0,021\text{mm}$ (σ = desvio padrão).

Alguns fabricantes costumam informar a “imprecisão” do equipamento pelo termo “linearidade”. Neste caso, a linearidade é definida como a razão entre o máximo valor obtido pela curva de calibração para a diferença entre a medida lida e a medida real, e o máximo valor possível de medida (Fundo de Escala). Para um campo de medida de 50mm, obteve-se que a linearidade correspondente a $\pm 0,064\%$ do Fundo de Escala. (Obs: Este valor foi obtido sem descorrelacionar a acurácia média do parafuso micrométrico usado como referência).

Uma outra forma de se estimar a acurácia do equipamento é efetuar o seguinte ensaio, após a calibração já descrita. Usando-se novamente um parafuso micrométrico como alvo, este é fixado e zerado com relação à superfície de referência, na cabeça medidora. Para isso se usa o bloco padrão, como mostrado na Figura 4.1-25. Uma série de valores arbitrários são colocados no parafuso e então comparado com o valor fornecido pelo medidor. Na Figura 4.1-27 seguinte ilustra-se o resultado, obtido para 10 medidas em cada ponto. A curva de erro mostrada apresenta um erro médio de $\pm 0,016\text{mm}$. Esta componente corresponde ao erro sistemático ocorrido durante o processo, e pode ser atribuído a um desvio de posicionamento do parafuso micrométrico com relação à face de referência. A curva de erro apresenta também um erro de acurácia $2\sigma = \pm 0,025\text{mm}$, para um intervalo de confiança de 95%.

Figura 4.1-27) Curva Resultado da Acurácia Média

O ensaio de *repetibilidade*⁶ é executado colocando-se o parafuso n vezes numa determinada medida e verificando-se a *variação* da leitura obtida. Na Figura 4.1-27 está sobreposto em cada ponto de medição a “*repetibilidade 2 sigma*”, obtida para 10 leituras cada. O valor médio obtido em todo o campo de medição corresponde a uma repetibilidade $2\sigma = \pm 0,014\text{mm}$, para um intervalo de confiança de 95% .

Foram construídos até o momento (julho de 95) cerca de 20 unidades do Medidor MD50. A acurácia média obtida foi de $2\sigma = \pm 0,044\text{mm}$; o erro de linearidade médio foi de 0,055mm ou 0,11% do Fundo de Escala. Estes valores levam em conta os resultados obtidos em alguns medidores que não atingiram precisões melhores que 0,050mm, caso das primeiras unidades construídas. Na Figura 4.1-28 é apresentada a curva de calibração de um desses medidores, considerado “ruim”.

Figura 4.1-28) Curva de Calibração do Medidor MD50 série 005, considerado “ruim” devido a problemas construtivos ocorridos na óptica de captação.

⁶ Apesar de não constar em dicionários, o neologismo Repetibilidade é usado aqui com o mesmo sentido da palavra inglesa *repeatability*, como sendo o grau de concordância entre um número de medições consecutivas, feitas por um instrumento sob as mesmas condições de operação.

Este medidor “ruim” apresentou problemas construtivos principalmente nas lentes de captação, que não possuía as características ópticas previstas. Algumas vezes, o desvio óptico era grande a ponto do comportamento do sistema fugir do previsto teoricamente. O desvio de acurácia usando a curva prevista teóricamente foi de $2\sigma = \pm 0,085\text{mm}$. Como o comportamento fugiu do previsto, tentou-se substituir tal curva por um polinômio interpolador de grau 5. Calculando-se os seus coeficientes pelo método dos mínimos quadrados, se obteve acurácia de $2\sigma = \pm 0,028\text{mm}$.

Figura 4.1-29) O mesmo medidor “ruim”, MD50 número de série 005 , calibrado segundo um polinômio interpolador de Grau 5

À primeira vista pode parecer uma solução interessante utilizar um polinômio, ao invés de uma curva teórica, como base de interpolação na procura dos coeficientes de calibração. No entanto, é necessário salientar que seria preciso a implementação de rotinas matemáticas de ponto flutuante ou outros artifícios computacionais mais sofisticados, no programa de controle do medidor. Como se pode observar a curva teórica consome somente 1 soma, 1 multiplicação e 1 divisão, sendo de fácil realização em aritmética de ponto fixo. Como, na maioria das vezes, a substituição das lentes de captação era suficiente para corrigir o sistema, optou-se por manter a equação teórica.

Uma conclusão importante é que as constantes de calibração obtidas (Apêndice II) apresentam diferenças significativas com relação àquelas previstas teoricamente (Apêndice I). Erros na estrutura mecânica, nas lentes, no colimador do Laser, na eletrônica etc, contribuem para estes desvios. O processo de calibração é indispensável para o bom desempenho do conjunto.

4.1.6.2 Efeito da Rugosidade e do Granulado Óptico

A título de verificação, foi estudada a ação do “filtro suavizador”, destinado a atenuar as influências da rugosidade superficial e o efeito do “Speckle”. Realizadas com o medidor MD50 número de série 014.

Figura 4.1-30) Acurácia do Equipamento, com o Filtro Suavizador **Ligado**, Medindo uma Manta de Borracha Fosca. Média de 5 calibrações.

Figura 4.1-31) Acurácia do Equipamento, com o Filtro Suavizador **Desligado**, Medindo uma Manta de Borracha Fosca. Média de 5 calibrações.

As curvas da Figura 4.1-30 e da Figura 4.1-31 foram obtidas, usando como superfície alvo, uma manta de borracha vulcanizada fosca. Com o filtro ligado a curva obtida corresponde a uma acurácia de $2\sigma = \pm 0,043\text{mm}$. Com o filtro desligado $2\sigma = \pm 0,098\text{mm}$. Como pode se observar, o filtro possibilita uma melhoria na acurácia do equipamento.

Para verificar se esse ganho se repete com outros materiais ou rugosidades foi efetuado o ensaio seguinte. Uma série de materiais tiveram suas rugosidades levantadas por um rugosímetro "Taylor Robson Surtronic 3P". As rugosidades R_a (média aritmética) e R_{max} (valor de pico) foram registradas, como resultado da média de 5 leituras.

A acurácia do Medidor foi levantada para 10 pontos com o filtro suavizador ligado. O mesmo foi realizado com o filtro desligado. Os resultados são apresentados na tabela seguinte. Para a maioria das superfícies, o filtro suavizador possibilita ganhos significativos na acurácia, principalmente as superfícies rugosas e foscas como borracha vulcanizadas e lixa 600. Para outras, no entanto, o ganho não é tão significativo, notadamente para superfícies brilhantes como o alumínio. Esse comportamento sugere que nas superfícies brilhantes os contrastes são mais destacados, diminuindo o efeito do filtro. Estudos mais detalhados a respeito são sugeridos.

Material	Acurácia com Filtro (mm)	Acurácia sem Filtro (mm)	R_a (μm)	R_{max} (μm)
bloco cerâmico polido brilhante	0,032	0,049	0,64	8,02
bloco cerâmico 800 fosco	0,019	0,021	0,84	9,14
bloco cerâmico 400 fosco	0,035	0,038	0,96	10,91
chapa de aço 1020 laminada	0,046	0,064	0,98	7,7
chapa de alumínio	0,090	0,099	1,11	3,4
bloco cerâmico 240 fosco	0,021	0,040	1,76	27,9
bloco cerâmico 120 fosco	0,024	0,041	3,85	39,15
chapa de aço 1020 jateada	0,073	0,086	5,24	42,31
borracha preta vulcanizada	0,040	0,096	6,25	37,87
manta de celulose branca	0,067	0,073	16,75	127,45
lixa 600	0,069	0,112	50,42	281,25

Tabela 4.1-1) Acurácia com e sem Filtro Suavizador para Diferentes Tipos de Superfície , em ordem crescente de Rugosidade R_a

4.1.7 Descrição da Aplicação

Este medidor foi especialmente desenhado para fazer parte de uma máquina chamada Puncionadeira CNC. O projeto foi utilizado por um dos maiores fabricantes mundiais de longarinas de caminhões. As longarinas são estruturas, mais conhecidas por "chassis", sobre as quais são montadas as carrocerias e outros elementos motrizes dos caminhões, ou outros tipos de veículos de carga. As longarinas são compostas geralmente de vigas de perfil "I" ou "U", de comprimento variando de 3,5 a 12m.

Normalmente, com a finalidade de fixar elementos construtivos tais como suspensões, molas, motores, cabinas, etc são executados furos para os pontos de fixação diretamente na alma dos perfis. Uma longarina comum contém de 100 até 250 furos.

Quando a longarina pertence a algum modelo de série, os furos são feitos durante a estampagem progressiva em prensas, que a partir de uma chapa plana, cortam, dobram o perfil e efetuam os furos. Estas prensas são enormes (20.000

toneladas) e são muito custosas no aspecto de preparação, sendo somente viáveis quando a produção é elevada.

Para pequenas produções, normalmente o perfil é cortado e dobrado em prensas menores e os furos são feitos manualmente, em furadeiras de gabaritos, o que torna a produção lenta e sujeita a erros.

Com a intenção de aumentar a flexibilidade e rapidez na produção de pequenos lotes, foi projetada uma máquina chamada "Puncionadeira CNC". Esta máquina se constitui basicamente numa "Prensa de Punções", sendo que a coordenada do puncionamento é controlada no CNC. Um programa informa quais as posições onde os furos devem ser executados; a máquina posiciona a peça e o punção convenientemente, e então o furo é efetuado. O processo é repetido para todos os furos. A Figura 4.1-32 esquematiza o processo.

Figura 4.1-32) Esquema de uma Puncionadeira CNC para Fabricação de Longarinas de Caminhões

Aparentemente simples, na verdade o processo é complexo devido a uma série de fatores:

- Ao contrário do que se imagina, a longarina não é rígida. Devido as suas dimensões, ela sofre deformações não repetitivas, produzidas pelo manuseio, estocagem, pequenas deformações durante a prensagem da aba e furos anteriores.
- Os furos geralmente são agrupados de acordo com a sua finalidade. Por exemplo, existem grupos de furos destinados a prender a suspensão, a carroceria, a cabina, o motor etc. Esses grupos são, portanto, referenciados a algum ponto especial na longarina, normalmente na aba. Como a longarina é "mole", se faz necessário "corrigir" a posição dos furos a serem executados, com base na posição "real" que a aba de referência apresenta. Daí surgiu a necessidade de medir a posição da aba para cada grupo, no instante do puncionamento.

- Pela necessária viabilidade econômica, o sistema inteiro deveria ser capaz de efetuar um furo a cada 2 segundos, incluindo-se o tempo de posicionamento da peça, medição, posicionamento do punção e prensagem.
- Para efetuar a medição se especulou várias alternativas, entre elas o uso de sensores de contato LVDT, roletes de referência, apalpadores mecânicos, etc. Nenhum deles reuniu o conjunto de qualidades que cumprisse os requisitos principais de precisão, velocidade e robustez.

Foi solicitado então o desenvolvimento de Sensores a Laser com as seguintes características:

- Campo de medição 50mm, sendo de 60 a 110mm a partir da face de referência;
- Precisão $\pm 0,05\text{mm}$;
- Velocidade 2 resultados/s;
- 4 medidores ligados em rede à uma estação central;
- Estação Central se comunicando com CNC Altus 8100 em rede ALNET;
- Superfícies a serem medidas: Longarinas de aço 1010 a 1045 com acabamento bruto ou jateado;
- Superfícies podendo conter manchas de óleo, pó e focos de ferrugem.

Os sensores seriam colocados um pouco atrás dos pontos de furação, e teriam por função medir continuamente a posição das abas, como mostrado na Figura 4.1-33.

Figura 4.1-33) Posicionamento dos Medidores de Distância na Punçoneira CNC e seu Uso na Detecção das Deformações das Longarinas

A concepção do funcionamento seria a seguinte: os Medidores de Distância determinariam a posição da aba. A posição de cada aba é enviada ao CNC. Este por sua vez, calcula a correção necessária ao posicionamento da ferramenta para que o furo resultante esteja dentro da tolerância global ($\pm 0,3\text{mm}$). Se as medidas estiverem confiáveis e dentro dos campos possíveis, a prensa é acionada.

Normalmente as longarinas são executadas em pares, às vezes simétricas ou anti- simétricas. Assim, a Puncionadeira fabrica 2 peças simultaneamente a "esquerda" e "direita". No entanto, como as peças podem apresentar desvios distintos, as correções são exclusivas. Por isso, são necessários 4 medidores. As cabeças devem informar ao controle da Máquina Puncionadeira as medidas encontradas, para que o CNC efetue as correções necessárias.

Para tanto, foi implantado uma rede de comunicação usando o protocolo CAN (Controler Area Network) ISO9141. Este protocolo é destinado especificamente para implementar redes para controle de processos ou máquinas, sendo inclusive utilizado em automóveis. SAE (1991). Ele difere daqueles de uso "comercial", por garantir o tempo de latência mínimo e conhecido. Ou seja, o tempo para um determinado dado ser distribuído entre as estações que possuem interesse é deterministicamente fixado.

Outro fato a destacar é que a topologia da rede não é realizada por "estação", e sim por "variáveis", ou seja, as requisições e comandos têm como fonte ou destino variáveis globais, tais como "temperatura", "medida x", "medida y", etc; não se importando com a localização física da "estação" ou "nó". Uma estação pode gerenciar inúmeras variáveis. Maiores detalhes podem ser encontrados nas referências SAE (1991) e INTEL (1991).

Fisicamente, a rede foi implementada usando "loop de corrente" de 4 a 20mA, sendo todas as estações isoladas galvanicamente. O esquema da rede é apresentado na Figura 4.1-34.

Figura 4.1-34) Diagrama Físico da Rede de Medidores

A estação central destina-se a converter as medidas e os sinais de controle para o protocolo ALNET, usado pelo CNC 8100. Este protocolo é privado.

No aspecto lógico, as variáveis de controle podem ser expressas como:

Comandos

Medida C1 Status C1

Medida C2 Status C2

Medida C3 Status C3

Medida C4 Status C4

Os comandos são ordens enviadas pela Estação Central às cabeças medidoras, visando especificar parâmetros de controle. As variáveis *Medida CX* são os resultados de cada cabeça medidora. As variáveis *Status CX* indicam se uma cabeça não está funcionando ou se a medida disponível não é confiável.

O funcionamento é o seguinte: O CNC requisita à Estação Central, via rede ALNET, um lote de medidas. A Estação Central efetua a requisição de cada medida, via Rede CAN. Ao recebê-las monta um "pacote" que é reenviado ao CNC, dentro do protocolo ALNET. Todo o processo leva em torno de 0,1s a 0,5s, dependendo do número de leituras especificado para o cálculo da média.

Todos os módulos de processamento foram acondicionados em caixas padrão IP54 para uso industrial, como mostrado na Figura 4.1-35.

Figura 4.1-35) Caixas IP54 do Medidor MD50

As cabeças foram posicionadas na máquina Puncionadeira, dentro de um recinto protegido por "pára-choques", visando impedir sua destruição por falhas de posicionamento das longarinas.

4.1.8 Conclusões

A precisão global atingida pelos medidores na aplicação descrita foi de $2\sigma = \pm 0,04\text{mm}$, em funcionamento contínuo. As maiores dificuldades encontradas foram as sujeiras que frequentemente aderiam à superfície da longarina, que em alguns casos alteram as medidas obtidas. Certa ocasião uma pelota de graxa, com aproximadamente 1cm de altura, estava "precisamente" posicionada, de forma que a interpretação dada pelo CNC, quase gerou um acidente. Para evitar tais ocorrências, o processo de fabricação foi alterado, prevendo-se uma etapa de preparação anterior, efetuando um tipo de "limpeza". Outras medidas de segurança foram tomadas, dentre elas, a execução de um cálculo de verificação, sempre que o punção está sendo ativado, com o objetivo de verificar se este atingiria as abas ou furaria em regiões "proibidas" pelo tipo de longarina que está em processo.

Um programa de monitoramento dos resultados provenientes das cabeças medidoras foi implantado, visando verificar a ocorrência de grandes dispersões durante o processo, informando a ocorrência de "medidas suspeitas" ao operador, que nesse caso é consultado.

O maior problema encontrado, entretanto, foi a presença de fortes impactos e vibrações constantes que afrouxavam a fixação das lentes da cabeça, provocando a perda do ajuste e da calibração frequentemente. Por esta razão, os desenhos mecânicos da fixação das lentes e do colimador Laser foram modificados, adotando-se também a prática de colagem de todos os parafusos e ajustes. Após uma calibração, todos os parafusos, roscas e apertos são generosamente "travados" com colas "trava-roscas".

O último problema encontrado foi a ocorrência de fortes ruídos elétricos e "falhas de terra". Devido às altas potências envolvidas, a impedância do aterramento não parecia suportar os transientes, causando queimas e "perdas de memória" em circuitos mais sensíveis. Nas cabeças medidoras todas as partes foram isoladas de ligações diretas na carcaça, principalmente o Laser Semicondutor. Adotou-se também o esquema de aterramento somente em um ponto. Um cuidadoso reestudo das ligação de terra foi efetuado na máquina CNC, objetivando criar caminhos de terra diferenciados para as fontes de potência.

O equipamento já está em funcionamento contínuo desde de abril de 93, com sucesso. Esse mesmo tipo de Medidor foi usado em outras aplicações tais como medição de Manta de Borracha, Espessura de Bimetal, também com sucesso.

4.2 Projeto de um Medidor: O MD250

4.2.1 Introdução e Requisitos

O Termo Medidor MD250, significando campo de medição de 250mm, nasceu da necessidade de se construir um medidor de distância com campo grande, ao redor de 300mm, mesmo que para isso a precisão fosse prejudicada.

A primeira aplicação desse medidor impôs alguns requisitos geométricos e funcionais que determinaram sua arquitetura óptica e eletrônica. Necessitava-se medir o nível de enchimento em caixas de sabão em pó, durante o processo, com as caixas em movimento.

Geralmente, os sabões em pó são encontrados em caixas de papelão medindo 20cm ou 32cm. O enchimento é realizado numa máquina conhecida por "carrossel" onde, através do tempo de exposição (rotação), se determina a quantidade de pó que cai na caixa, e assim, o seu nível.

Como a mistura de sabão é altamente higroscópica, dependendo das condições reinantes no ambiente, ou mesmo pela ocorrência de "pelotas", ou ainda por falhas no carrossel, algumas caixas podem sair menos cheias que outras. Para evitar que estas caixas vazias ou não completas cheguem às mãos de algum consumidor, foi solicitado um sistema que detectasse a falha.

Sensores de peso dinâmico, sensores capacitivos, etc não deram resultado satisfatório, pois o sabão possui densidade variável. Mais que o peso em si, é importante que o nível esteja dentro de limites toleráveis, para evitar que haja aborrecimentos por parte dos consumidores, ao encontrarem caixas "pela metade", apesar do peso estar dentro do especificado.

Era necessário, portanto, um sensor óptico que medisse o nível médio do sabão presente na caixa de papelão, logo após o enchimento. Estudando a geometria das máquinas "carrossel" bem como o tamanho das caixas de sabão obteve-se os seguintes requisitos:

- Campo de medição de 100 até 350mm da face referência.
- Velocidade: até 6 caixas por segundo.
- Precisão: melhor que 2mm
- Ponto de medição distante do ponto de expulsão.
- Ângulo: o eixo óptico menor que 35 graus

O ponto de medição se situava logo após o carrossel, e caso a caixa fosse rejeitada, o sistema deveria expulsá-la. Porém, o ponto de expulsão se situava a várias "caixas" de distância devido à geometria das máquina. Portanto, o sistema deveria efetuar também um controle de "fila".

Figura 4.2-1) Uso do Medidor MD250 no Controle de Nível de Sabão em Pó

A limitação do ângulo do eixo óptico se justifica pela necessidade de não obstruir a lente objetiva captadora da cabeça, nos casos em que a medida está próxima dos extremos.

Figura 4.2-2) Posicionamento da Cabeça Medidora com Relação à Caixa

A distância entre a cabeça e a caixa de sabão foi especificada como estando em torno de 100mm, visando impedir choque da tampa da caixa com a cabeça medidora.

Para garantir o sincronismo se fez necessário o uso de 2 sensores de presença fotoelétricos: o primeiro seria colocado para acionar a medição; o segundo para acionar o ejetor de caixas rejeitadas.

4.2.2 Projeto da Cabeça Medidora

Seguindo o mesmo procedimento usado no item 4.1.2 anterior, tem-se as seguintes condições de contorno.

$R = 250\text{mm}$, campo de medição (de 100 até 550mm)

$P < 2\text{mm}$, precisão desejada

$d_0 = 100\text{mm}$, da face de referência

$\theta < 35^\circ$, devido às dimensões da caixa

$x_{\text{máx}} = 28\text{mm}$ sensor CCD, TCD142D

velocidade de 6 resultados por segundo

Usando o mesmo procedimento descrito para o MD50 se chegou aos seguintes resultados:

$\theta = 29^\circ$

$f = 43\text{mm}$

$\alpha = 43^\circ$

$s' = 68,58$ e $h' = 0$ para $x = 0$

$s' = 49,75$ e $h' = 17,92$ para $x = x_{\text{máx}}$

$d_0 = 103\text{mm}$

$R = 250\text{mm}$

$P_{\text{obtido}} = 0,06\text{mm}$

A configuração mecânica segue aproximadamente o esquema da Figura 4.1-5, porém, seguindo os ângulos e posições relativas descritas acima. A lente segue o esboço apresentado na Figura 4.2-3.

Figura 4.2-3) Lente Captadora Adotada para o Medidor MD250

4.2.3 Projeto Eletrônico

O sistema eletrônico também segue o mesmo diagrama esquematizado da Figura 4.1-12 anterior. No entanto, por motivo de velocidade, o processamento foi dividido em dois microprocessadores. O primeiro é responsável pela medição propriamente dita; o segundo efetua o controle de fila.

Figura 4.2-4) Diagrama de Controle do Medidor através de 2 Processadores

O programa de controle e Medição é similar ao descrito no item 4.1.4 para o MD50. O número de captações para efetuar a média é escolhido experimentalmente, com o objetivo de levantar a topografia média da superfície do pó dentro da caixa.

Figura 4.2-5) Levantamento da Topografia Média

O programa fica esperando o disparo do sensor de sincronismo. Ao se receber o disparo, um certo número de captações são feitas em sequência. A seguir a média é calculada, obtendo-se assim um nível médio. O número de captações para média é escolhida experimentalmente, dependendo da velocidade ajustada na máquina.

O tempo de medição está disponível num conector no painel traseiro do equipamento e por um sinal luminoso no painel, visando permitir o ajuste fino e evitar que se meça a tampa da caixa ou mesmo a borda desta. O circuito eletrônico foi ajustado para 140 captações por segundo. O esquema de "filtragem" de valores muito

discrepantes foi implementado, bem como o esquema de 2 bancos alternantes, com a finalidade de permitir as rotinas de captação e cálculo simultâneos.

Efetuada o disparo e captado o número correspondente para média e filtragem, o resultado é comparado com valores pré-ajustados, via painel. A verificação é realizada e o veredicto é enviado para o outro processador, controlador de fila.

O programa de controle de fila é simples, constituído por uma estrutura FIFO com 2 "ponteiros". O primeiro "ponteiro" é acionado pelo disparo proveniente do cálculo da medida do primeiro processador. O valor do "veredicto" é armazenado numa célula do FIFO. Um outro ponteiro é deslocado pela presença do sinal de sincronismo do ejetor. Neste ponto é verificado o "veredicto" da célula de saída e o ejetor é acionado correspondentemente. O tamanho do FIFO, corresponde ao número de "caixas" entre o ponto de medição e o ponto de ejeção.

4.2.4 Resultados obtidos e conclusões

O procedimento de calibração é idêntico ao descrito no item 4.1.5 do medidor MD50. Todavia, ao invés de um parafuso micrométrico foi usada uma régua óptica de posicionamento com precisão de 0,01mm. A curva erro de calibração é indicada na Figura 4.2-6.

Figura 4.2-6) Curva de Calibração Obtida para o MD250, nº 22, Usando Régua Micrométrica com Acurácia Melhor que 0,01mm, em Superfície Branca Fosca

O valor obtido de acurácia, para um intervalo de confiabilidade de 95% corresponde a $2\sigma = \pm 0,40\text{mm}$ (σ desvio padrão). O erro de "linearidade" obtido foi de 0,588mm, que no caso corresponde a cerca de $\pm 0,23\%$ do Fundo de Escala.

O sistema atingiu a velocidade de 6 caixas por segundo e em ensaios de bancada até 10/s.

Foram construídas até o momento (julho 95) 23 cabeças medidoras MD250. A acurácia média obtida foi $2\sigma = \pm 0,44\text{mm}$, o erro de linearidade foi de 0,52mm correspondendo a 0,208% do Fundo de Escala.

O maior problema encontrado, no entanto, foi a presença de vapores químicos e pó espalhados pela movimentação da máquina. Depois de um tempo de uso as lentes ficavam sujas e o sinal óptico ficava fraco e distorcido. Um procedimento de limpeza periódico, efetuado junto com a manutenção preventiva do "carrossel", resolveu o problema. Cinco medidores estão em funcionamento desde janeiro de 93.

Este medidor se mostrou muito versátil, principalmente em aplicações onde a maior necessidade é realizar uma medida sem contato físico a uma distância grande. Este medidor vem sendo utilizado com sucesso na indústria de Borracha, de Pneus e Siderurgia.

4.3 Comparação com alguns medidores Comerciais

Na Tabela 4.3-1 abaixo , são resumidas as características de alguns Medidores por Triangulação a Laser. São mostrados dados de vários fabricantes , e comparados com os MD50 e MD250 aqui projetados. Os dados são provenientes dos catálogos dos próprios fabricantes.

Fabricante	Distância Origem	Campo de Medição	Acurácia	Resolução	Velocidade	Tipo de Sensor	Laser
AROMAT ANL1451AC	40mm	±10mm	±0,2%FE (I) ±0,5%FE (II)	0,005mm	10Hz	FEL	780nm, 5mW pulsado 80KHz
AROMAT ANL1751AC	75mm	±25mm	±0,2%FE (I) ±0,5%FE (II)	0,02mm	10Hz	FEL	780nm, 5mW pulsado 80KHz
KEYENCE LG81	80mm	±20mm	±0,1mm	0.1mm	25Hz	FEL	670nm 3mW pulsado
KEYENCE LC2220	30mm	±3mm	±0,1%FE	0,0002mm	16KHz	FEL	670nm 3mW pulsado 40KHz
KEYENCE LC2320	50mm	±8mm	±0,1%FE	0,0005mm	16KHz	FEL	670nm 3mW pulsado 40KHz
MITUTOYO L548-101	46mm	±4mm	±0,006mm ±0,2%FE (III)	0,0001mm	480Hz	FEL	780nm 5mW pulsado
MITUTOYO L548-102	62mm	±10mm	±0,015mm ±0,2%FE (III)	0,0001mm	480Hz	FEL	780nm 5mW pulsado
OPTO MD50	60mm (V)	50mm	±0,11%FE	0,01mm	100Hz	CCD	670nm 4mW CW
OPTO MD250	100mm (V)	250mm	±0,2%FE	0,1mm	100Hz	CCD	670nm 4mW CW
SELCOM SLS5000-3	50mm	±3mm	±0,2%FE	0,0015mm	2KHz / 10Hz (IV)	FEL	780nm 20mW pulsado 16KHz
SELCOM SLS5000-100	300mm	±100mm	±0,2%FE	0,05mm	2KHz / 10Hz (IV)	FEL	780nm 20mW pulsado 16KHz
Observações: -(I) Acurácia no centro do campo de medição , relativamente ao valor de Fundo de Escala. -(II) Acurácia a pontos situados a 75% do campo de medição , relativamente ao valor de Fundo de Escala. -(III) A Acurácia final corresponde ao maior valor . -(IV) A Velocidade mais baixa é a usada na obtenção da Acurácia descrita. -(V) Posição do Início do campo de Medição -Todas as Acurácias relatadas usando material branco fosco . -Salvo menção contrária , todas as Posições do Início do Campo de medição correspondem ao centro deste.							

Tabela 4.3-1) Comparativo entre alguns medidores por Triangulação Laser , segundo catálogos do fabricantes.

É necessária muita cautela na comparação pois os parâmetros relevantes não seguem o mesmo método de avaliação. Parâmetros tais como acurácia, linearidade e velocidade de medida são expressos em formas próprias, não padronizadas. Outra questão importante se refere ao custo do equipamento, por depender de fatores nem sempre controláveis, tais como o mercado, legislação, políticas ou estratégias de vendas, engenharia de suporte etc. Assim a comparação entre diversos tipos e fabricantes devem ser feita cautelosamente.

A primeira observação se refere ao tipo de sensor utilizado. A maioria dos medidores usam os Fotodiodos de Efeito Lateral (FEL), com campo de medição relativamente pequenos. Isto reflete o fato de que os sensores CCD de baixo custo e alta resolução serem relativamente recentes, e os FEL de grandes dimensões serem relativamente ruidosos e de baixa precisão.

As acurácias são expressas de diversas formas, umas com relação ao fundo de escala, outras em termos absolutos. Os medidores da OPTO, MITUTOYO e SELCOM exprimem a acurácia num intervalo de confiança de 95% (2 sigma). Os demais não esclarecem a obtenção do parâmetro. Curiosamente todos indicam a superfície do material como sendo “branca e fosca”.

Mesmo dentre os medidores que utilizam os FELs, existem diferenças significativas. O modelo LG81 da KEYENCE é simples, de baixa precisão e baixo custo (~1.000US\$ FOB), indicado para a detecção de posicionamento em automação industrial. Já o medidor LC2220 também da KEYENCE é de alta precisão e alta velocidade. É constituído por um complexo sistema eletrônico destinado à medição de espessuras, e atinge alto custo (~17.000US\$). Os medidores MITUTOYO bem como os SELCOM, foram os pioneiros, sendo fabricados até hoje, e possuem custos numa faixa intermediária (~5.000 e 9.000 US\$ FOB). Os medidores OPTO MD50 e MD250 possuem grande campo de medição com acurácia elevada, e quando comparados com aqueles de campo similar, tais como o SELCOM SLS5000-100 atingem desempenho igual ou melhor com potências de iluminação sensivelmente menores. Observar que para atingir acurácia elevada, este último opera com velocidade baixa, 10Hz. Isto sugere o uso de algum artifício de limitação de banda de ruído ou de processamento que supere as limitações dos FELs grandes.

Os medidores MD50 e MD250 são de baixo custo (~3.000 US\$), por utilizarem CCDs aplicados em máquinas de fac-símile e o processamento ser quase inteiramente digital. A velocidade é relativamente baixa, 100Hz, porém esta se deve principalmente ao microprocessador utilizado, de 8 bits. Usando o mesmo CCD é possível atingir cerca de 1700 Hz, com pequenas mudanças na eletrônica de controle e aplicando um microprocessador de 16 bits.

5. Cultura de Utilização

Nos capítulos anteriores foram estudadas as principais técnicas, componentes e desenhos dos Medidores de Distância. Neste capítulo são discutidos alguns aspectos relacionados à utilização deste tipo de medidor. A finalidade desta discussão é o esclarecimento de quais áreas ou aplicações o medidor é viável, e quais não, e a razão que está por trás disso.

Procurou-se realizar uma análise comparativa entre alguns métodos alternativos, comparando seu desempenho, e discutindo as vantagens relativas.

As regras de boa utilização destes medidores são discutidas com o intuito de otimizar o seu uso e extrair o máximo desempenho nas aplicações, onde seu uso é recomendado.

Por fim é executada uma breve discussão das principais áreas de utilização, reais e potenciais.

5.1 Alguns Métodos Alternativos

O Medidor de Distância por Triangulação a Laser não é o único método capaz de efetuar a medida de distância, sem contato físico direto. Existem sensores capacitivos e indutivos que, dependendo da situação, apresentam características interessantes. Outros sistemas, tais como ultra-sônicos, possuem aplicações bem determinadas. A seguir são explicados sucintamente os princípios de funcionamento e características.

5.1.1 Sensores Indutivos

Os Sensores Indutivos se baseiam em dois princípios: o de indução de corrente e o de relutância variável. O método de indução de corrente parasita é esquematizado na Figura 5.1-1.

Figura 5.1-1) Sensor Indutivo por Corrente Parasita

Uma corrente alternada de alta frequência é aplicada à bobina. O campo magnético produzido, induz na superfície condutora correntes parasitas. Essas correntes parasitas dissipam parte da energia contida no circuito ressonante do qual a bobina faz parte. A amplitude da corrente de perda depende da distância entre a bobina e a superfície condutora. Após tratamento do sinal, a distância da superfície condutora é obtida.

Precisões da ordem de 0,2% do Fundo de Escala são obtidas em campos de medições de 0,5 até 80 mm. Podem trabalhar em temperaturas elevadas (até 350°C) e são relativamente insensíveis às variações térmicas. As desvantagens são que operam somente em superfícies condutoras e, principalmente para distâncias de 50 a 80mm, a cabeça medidora apresenta diâmetro de até 140mm; assim, a medida não é pontual. Outra desvantagem é a complexidade eletrônica, que exige alta estabilidade e precisão. As velocidades de amostragem chegam a 30KHz. DOEBLIN (1975).

Um medidor indutivo mais simples corresponde ao de relutância variável, esquematizado a seguir.

Figura 5.1-2) Sensor Indutivo por Relutância Variável

Neste medidor, a indução obtida no núcleo depende do caminho magnético. Como se observa, o caminho magnético parte do núcleo da bobina, atravessa a camada de ar e atinge a superfície metálica retornando ao núcleo. A componente principal de variação da relutância é a espessura da camada de ar.

Aplicando-se uma corrente alternada e medindo-se o sinal induzido se obtém uma medida de relutância do circuito magnético, e assim a camada de ar presente.

O processamento eletrônico deste sistema é mais simples, sendo muito utilizado em detectores de presença, para automação fabril. As medidas da distância variam de 0,5 até 35mm com acurácia da ordem de 1% de Fundo de Escala, e velocidade de amostragem de até 5KHz.

Apesar de funcionar em superfícies condutoras, sua utilização é indicada principalmente para materiais ferromagnéticos.

5.1.2 Sensores Capacitivos

O Sensor Capacitivo baseia-se na propriedade de um capacitor ideal onde, variando-se a distância entre placas, altera-se a capacitância do conjunto. No caso do medidor capacitivo, o sensor corresponde a uma placa e a superfície alvo a outra. Na Figura 5.1-3 é mostrado o princípio.

Figura 5.1-3) Sensor Capacitivo

Uma corrente alternada de frequência fixa é aplicada às placas do capacitor. Uma pequena corrente de carga flui pelas placas. A tensão presente na placa é proporcional à capacitância e assim à distância entre placas. Um circuito eletrônico processa esta informação fornecendo a distância.

Os campos de medida variam de 0,05 até 10mm, com acurácia de 0.2% de Fundo de Escala; as resoluções atingem 0,004% de Fundo de Escala.

O Medidor Capacitivo se presta à medição de distâncias em qualquer material condutor. Utilizando-se do artifício de colocar uma superfície metálica como base, é possível também realizar a medição de espessuras de materiais isolantes, tais como filmes plásticos.

Figura 5.1-4) Sensor Capacitivo na Medição de Espessuras de Materiais não Condutores

5.1.3 Sensores Ultra-sônicos

Os sensores Ultra-sônicos funcionam sob o princípio de transmissão e recepção de uma onda acústica. Uma cápsula piezo-elétrica transmite durante um curto período de tempo uma onda de alta frequência, normalmente entre 40 e 200KHz, fora da região de sensibilidade do ouvido Humano. Esta onda caminha pelo meio, usualmente ar ou algum líquido, e atinge a superfície de interesse. Ao atingir esta superfície, uma parte é refletida e volta para o sensor. O período de tempo decorrido entre o instante da transmissão e o da recepção é medido, e através de calibração relacionado com a distância entre o sensor e o alvo.

Figura 5.1-5) Sensor Ultra-sônico

Por operar com ondas acústicas, a eficiência do sensor depende das características do meio e do material alvo. Os melhores resultados são obtidos quando existe um grande “contraste acústico” de maneira que as ondas refletidas sejam bem definidas. Devido também a esta característica, a onda transmitida possui grande divergência que depende do comprimento de onda utilizado: a 40KHz estes sensores possuem divergências de 60° , e a 200KHz cerca de 10° . Assim normalmente a região de medida possui grandes dimensões. A avaliação da distância é feita pela medida do tempo decorrido, e assim depende da velocidade de propagação no meio. Infelizmente esta velocidade pode variar com a temperatura, no caso do ar cerca de $0,2\%/^\circ\text{K}$. Meios em movimento, tais como correntes de ar, ventos, alvos em movimento, também podem causar desvios. Devido a estas características normalmente possuem precisão entre 1 e 5% Fundo de Escala, com campos de medição indo de 1,5 cm até 10 metros. A velocidade de medida depende do campo de medição, porém tipicamente se situa ao redor de 5 Hz.

O campo de atuação depende que o objeto a ser medido possua características adequadas, regiões grandes de posicionamento e características bem controladas do ambiente. Os medidores de Distância Ultra-sônicos são muito usados como sensores de presença em automação industrial, alarmes residenciais e automotivos. São muito usados também em medidores de Nível de Líquidos e Pós em Silos, Medidores de Profundidade em barcos (batímetro) etc.

Em algumas montagens especiais podem medir espessuras de materiais. Uma aplicação comum é a da medição de Espessura de camada Isolante na fabricação de cabos elétricos. Um captador Ultra-sônico é colocado em contato com a camada isolante, e a espessura desta é medida em contraste com o fio metálico interno. Estes equipamentos medem espessuras de 0,3 até 5mm com precisão de até 1%.

5.1.4 Comparação entre os Métodos de Medição sem Contato

- **Acurácia:** Todos os métodos aqui descritos possuem acurácia na ordem de 0,03 e 5,0%, sendo que o sistema por triangulação e o capacitivo levam vantagem.

Triangulação Laser	0,03% a 0,5%
Capacitivo	0,2%
Indutivo	0,2% a 1%
Ultra-sônico	1% a 5%

- **Materiais Aplicáveis:** Os Medidores Lasers são intrinsecamente insensíveis ao tipo de material que está sendo medido, e mesmo alguns materiais transparentes podem ser medidos em modelos dedicados. Os sensores indutivos impõem a necessidade do material ser indutivo ou mesmo ferromagnético. Os sensores indutivos devem ser calibrados para o material que está sendo medido, devido as características de permeabilidade e condutibilidade alterarem a indução magnética existente. Se o material apresentar estas características variáveis, as medidas poderão sofrer erros. O sensor capacitivo pode medir espessuras de materiais isolantes, porém, a medida de distância é efetuada contra uma superfície metálica básica. Os medidores Ultra-sônicos dependem que haja contraste acústico e que o material não absorva ou atenua a onda refletida em demasia. Tipicamente exigem que o sinal recebido seja no mínimo 10% do transmitido.
- **Posicionamento do Sensor:** Os sensores Indutivos e Capacitivos normalmente são colocados bem junto à superfície que está sendo medida, pois a característica do processo de medição impõe esta condição. Assim, se por exemplo, em algum processo, por razões de segurança, for necessário manter uma distância mínima de separação entre o medidor e a peça, conseqüentemente a acurácia vai diminuir. Por exemplo, deseja-se que a cabeça medidora fique no mínimo 15mm de distância de uma chapa. Nesse caso, a acurácia máxima obtida na avaliação de distância será de $\pm 0,015\text{mm}$ (0,1% de Fundo de Escala). Para os medidores por Triangulação Laser, as distâncias de separação são grandes. Um medidor por triangulação típico, com campo de medição entre 60 a 80 mm de distância, possui acurácia de $\pm 0,02\text{mm}$. Quando, no entanto, a distância de separação não é crítica, os medidores indutivos ou capacitivos podem apresentar melhor acurácia. Os medidores Ultra-Sônicos necessitam que a normal à alguma superfície do alvo esteja orientada com relação ao transmissor com tolerâncias ao redor de $\pm 7^\circ$, pois caso contrário a onda refletida não retorna ao sensor. Normalmente também possuem distâncias mínimas de posicionamento, ajustáveis, tipicamente ao redor de 20% da medida de fundo de escala.

- **Medição Puntiforme:** O Medidor por Triangulação a Laser é capaz de definir com precisão o ponto de onde a distância está sendo avaliada. Trata-se de uma característica única e muito útil em diversas situações, principalmente quando se deseja levantar superfícies irregulares ou de geometria não plana. Os medidores Indutivos ou Capacitivos "integram" em uma área a medida resultante, sendo assim impossível a determinação de um ponto particular. Devido a esta característica "integradora", os sistemas Indutivos ou Capacitivos são úteis principalmente quando a medida desejada não deve conter influência de defeitos ou características superficiais tais como rugosidade. Os medidores Ultra-sônicos são os que possuem as maiores regiões de medição. Devido a divergência da onda transmitida, entre 10° e 40° , cobrem áreas grandes e assim são úteis quando o alvo não possui região bem definida de posicionamento.
- **Velocidade:** Todos os sistemas descritos possuem velocidades altas quando comparados aos métodos de contato. Neste caso, os medidores Ultra-sônicos são os mais lentos, cerca de 5Hz seguidos pelos a Laser, variando de 100Hz a 40KHz. Os Indutivos podem ir até 100KHz. Nas medições de espessura, por exemplo, este fato pode ser relevante porque permite a filtragem dos efeitos causados pela vibração. Ao contrário do que se imagina, um medidor lento não necessariamente "filtra" as influências vibratórias, podendo causar erros. Por exemplo, medidores com frequências baixas, ao redor de 100 a 200 Hz, podem ser enganados devido às vibrações superficiais de 120Hz em algum equipamento elétrico. Normalmente, nos medidores mais rápidos, esta filtragem é ajustada pelo usuário.
- **Faixa de Temperatura de Trabalho:** Apesar de todos os medidores permitirem seu uso "enclausurado" em caixas isoladoras térmicas, alguns medidores intrinsecamente possuem maior capacidade de suportar tais variações. Os medidores Ultra-sônicos são desenhados para trabalhar tipicamente entre 0° e 60° , pois sofrem deriva térmica acentuada, ao redor de $0,2\%/^\circ\text{K}$. São sensíveis também aos gradientes térmicos e fluxos de ar. Os Sensores Indutivos podem trabalhar até cerca de 350°C , pois a partir dessa temperatura as características ferromagnéticas começam a desaparecer. Os Sensores Capacitivos geralmente trabalham até 150°C . Já os Sensores Laser, devido aos seus elementos ópticos e eletrônicos, raramente ultrapassam 40°C , sem proteção. Entretanto, quando as temperaturas são mais elevadas, acima dos 200°C , devem ser colocadas proteções especiais. Devido a essas proteções, os medidores Indutivos e Capacitivos não mais se prestam ao funcionamento. Os Ultra-sônicos perdem eficiência, salvo em casos onde a precisão requerida é baixa. O Medidor Laser neste caso, por enviar uma feixe luminoso e possuir distâncias de trabalho maiores, novamente é o mais indicado. Daí seu uso em siderurgia.

5.1.5 Resumo das Características

Pela Tabela 5.1-1 e pelos comentários anteriores, se verifica que os fatores decisivos na aplicação do Medidor Laser por Triangulação correspondem principalmente aos seguintes :

- não contato, com distância de trabalho relativamente grande;
- independência do tipo do material a ser medido e de suas características elétricas;
- determinação precisa do ponto de medida;
- velocidade;
- precisão e acurácia elevadas.

Se qualquer um desses itens citados forem características necessárias à medição, o Medidor a Laser por Triangulação é a solução , e muito provavelmente a melhor .

	Indutivo	Capacitivo	Ultra-Sônico	Triangulação Laser
Acurácia	0,2% a 1,0%	0,2% a 0,5%	1 a 5%	0,03 a 0,3%
Resolução (típica)	0,01%	0,004%	0,1%	0,03% típico
Campo de Medição	0,5 a 80mm	0,05 a 10mm	200 a 1000mm (típico)	10 a 350mm (típico)
Distância de trabalho (posição sensor)	0	0	0 a 20% do campo	10 a 200mm (típico)
Faixa de temperatura (sem proteção)	-40 a +350°C	-40 a 150°C	0 a 60°C	0 a 40°C
Faixa de temperatura (com proteção)	-	-	até ~500°C	até ~ 1000°C
Velocidade de medida	até 100KHz	até 3KHz	5Hz (típico)	até 40KHz
Materiais	Condutivos e Ferromagnéticos	Condutivos	quaisquer	quaisquer
Área de Medida	4 a 140mm	4 a 20mm	20 a 3000mm (típico)	0,1 a 1mm

Tabela 5.1-1)Quadro Comparativo entre os Tipos de Medidores Sem Contato

5.2 Regras de Boa Utilização

Os Medidores por Triangulação Óptica, por estarem baseados em princípios pouco usuais, não possuem uma cultura de utilização já estabelecida. Este fato pode resultar às vezes, numa situação de mau uso ser interpretada como de mau funcionamento.

Por ser um equipamento de introdução industrial relativamente recente, não existe ainda o conhecimento da técnica e "macetes", ou mesmo o bom senso que, por exemplo, já existem para o paquímetro, micrômetro, relógios comparadores, etc. O fato de se utilizar "Raio Laser" algumas vezes por ignorância ou má informação, faz com que seu uso seja temido. THOMAS (1986) descreve a experiência na implantação de sensores Laser para Robótica. Conclui-se que a divulgação das normas de segurança como a FDA (1985), e a classificação dos equipamentos dentro da mesma, ajudam a contornar esta "resistência psicológica".

A seguir serão apresentadas uma série de regras úteis para uma boa utilização dos Medidores Ópticos por Triangulação. A finalidade dessas regras é de educar o usuário para uma melhor compreensão do equipamento, criando assim a boa cultura do uso.

- Por ser um equipamento óptico, se deve evitar a contaminação das lentes da cabeça óptica. Sujeiras que ali se depositem, podem diminuir e alterar a condição de captação da imagem. Quando o equipamento precisa ser instalado em locais que apresentam altos riscos de contaminação, cortinas mecânicas ou mesmo cortinas de ar comprimido devem ser usadas.
- Cuidados especiais devem ser tomados com a presença de luzes potentes ou com reflexos de luz solar que possam atingir a óptica de captação. Nestes casos, recomenda-se um reposicionamento da cabeça de forma a evitá-las. Alguns fabricantes chegam a recomendar que a luz ambiente não ultrapasse determinados valores (~ 3000 lux). Nestes casos, o uso de "viseiras" ou "máscaras" é recomendado.

Figura 5.2-1) Posicionamento de uma Cabeça Medidora com Relação a Fachos Luminosos Potentes

- Alguns medidores possuem fonte luminosa modulada e amplificação sintonizada. Este método permite grande imunidade a ruídos elétricos e mesmo ópticos. No entanto, fontes luminosas muito intensas podem saturar o sensor, encobrindo o sinal desejado.
- Gradientes térmicos ou presença de fontes de calor intensas podem causar desvios mecânicos nos suportes, e até mesmo na estrutura da cabeça medidora. Tais desvios podem gerar erros nas captações. Muitas vezes é necessário aguardar a acomodação térmica para serem efetuados ajustes ou medidas acuradas.

A instalação e orientação da cabeça óptica medidora com relação a superfície que está sendo medida deve seguir algumas regras básicas:

- Quando o medidor por Triangulação for do tipo “Feixe Normal” , é importante que durante a sua instalação se garanta o posicionamento do feixe com relação à normal a superfície, ou de maneira paralela ao deslocamento desta. Uma forma prática de se garantir este alinhamento durante a instalação, consiste em posicionar um espelho no local de incidência do feixe e verificar se a reflexão atinge a origem deste. Quando o medidor for usado para medir deslocamentos de superfícies com grande refletância, deve-se evitar que reflexões atinjam a óptica de captação.

Figura 5.2-2) Orientação da Cabeça Medidora e seu Feixe Iluminador em Relação à Normal da Superfície.

- Quando a superfície alvo está em movimento, e ela possui desníveis, cuidados devem ser tomados no sentido de observar a possibilidade de ocorrer o ocultamento do feixe iluminador. A medida que a superfície se move, o feixe iluminado pode ser capturado por alguma depressão, impedindo que a luz espalhada seja captada pelo sensor. Nestes casos, a cabeça medidora deve ser reorientada.

Figura 5.2-3) Posicionamento Ideal da Cabeça com Relação à Desníveis

- O mesmo raciocínio se aplica à superfícies em revolução. Quando a superfície é muito rugosa, o movimento pode produzir uma mancha, ou região preferencial para a luz espalhada, tal como ocorre em rebolos, chapas laminadas etc. Este espalhamento pode confundir o sensor de imagem, provocando erros de leitura. Nestes casos, também é recomendável o reposicionamento.

Figura 5.2-4) Posicionamento da Cabeça com Relação à Superfícies em Revolução

- Quando a superfície possuir grandes variações de refletância ou apresentar regiões pintadas com grande diferencial reflexivo, erros de medidas podem ocorrer quando o feixe iluminado cruza a fronteira de tais regiões. A causa deste fenômeno tem origem no feixe iluminador, que normalmente possui uma dimensão não exatamente pontual. Na fronteira, com o feixe centrado, uma parte atinge a região mais clara e outra a região mais escura. Como os sensores de posição determinam o "centróide" da imagem, a região mais clara participa mais efetivamente que a escura, induzindo a um desvio. Para sanar este efeito, é importante posicionar o sensor no sentido paralelo à fronteira.

Figura 5.2-5) Posicionamento da Cabeça com Relação a Regiões de Albedo Altamente Diferenciado

5.3 Aplicações dos Medidores a Triangulação Óptica

A seguir serão apresentadas diversas sugestões de aplicações dos Medidores por Triangulação a Laser. Algumas delas resultam da necessidade de separação física, ou seja, medição sem contato, outras pela rapidez e precisão desejada. O Medidor por Triangulação a Laser encontra possibilidade de aplicação nas áreas de Siderurgia e Fundição, indústrias Madeireira, Automotiva, Embalamento, Transportes.

Serão descritas a seguir algumas aplicações, dentre muitas sugeridas pela Literatura, porém, aquelas aqui apresentadas fazem parte da experiência do autor.

5.3.1 Controle de Espessura de Placas Metálicas I

A fabricação de placas de alguns metais, como por exemplo, o alumínio, é executada através do escoamento de metal líquido. Uma lâmina de altura regulável controla a espessura do escoamento. Para comandar a posição desta lâmina é necessária a medição da espessura do material fundido. Devido às altas temperaturas e ao estado líquido que se apresentam, as medições por contato são descartadas.

O Medidor Laser é "zerado" no fundo do canal. Na passagem do material fundido a espessura é determinada e controlada pela realimentação da posição da lâmina.

Figura 5.3-1) Controle de Espessura de Placas de Alumínio

As temperaturas costumam ser elevadas e o material emite, às vezes, radiação visível. Em materiais como o alumínio, uma camada de óxido branco, facilita a visualização do feixe e não interfere com o sensor. Em outros materiais, como o ferro, onde a radiação visível é elevada, torna-se necessário usar Lasers Modulados. O uso de filtros ópticos bloqueadores de infra-vermelho são indicados. A maior dificuldade neste tipo de aplicação está na confecção eficiente de isoladores térmicos. Caixas com “camisas d’água”, insufladas com nitrogênio são as soluções mais comuns.

As precisões requeridas pelo processo são baixas, da ordem de 2 mm, não sofrendo dos efeitos nocivos causados pelo desvio do feixe devido aos gradientes térmicos presentes.

5.3.2 Controle de Espessura de Chapas Metálicas

Durante o processo de Laminação de Chapa, é indispensável o monitoramento da sua espessura, visando a regulação dos cilindros Laminadores. Como a chapa caminha em alta velocidade, estando ainda submetida a choques e vibrações, um medidor de contato não é aplicável.

Figura 5.3-2) Medição de Espessura de Chapas Laminadas

Neste caso, 2 medidores de distância são colocados simetricamente, a uma distância de separação comum conhecida. O sistema capta então, respectivamente, a

distância inferior e superior, descontando da separação entre as cabeças. Obtém-se assim, a espessura da chapa, e automaticamente os efeitos da vibração são atenuados.

O ambiente é em geral extremamente agressivo, com presença de vapores de água e limalha de ferro. Novamente, é necessário um cuidadoso projeto de isolamento térmica.

Por muitos anos, o processo mais comum de medição de espessura de chapas em laminadores contínuos, constituiu-se na medição da absorção de radiação proveniente de uma bomba de Césio. Obviamente, é um processo perigoso e caro. Nos últimos anos, todavia, tem-se procurado substituí-lo por processos Indutivos e a Laser, como descrito acima. Um requisito importante, neste caso, são as altas velocidades de processamento necessárias.

5.3.3 Controle de Espessura de Pós Bimetálicos

O processo de fabricação de lâminas bimetálicas consiste em depositar a liga em pó sobre uma lâmina de um metal base e sinterizá-las em um forno. As lâminas bimetálicas são usadas na fabricação de mancais, bronzinas etc.

A medição da camada de pó é essencial para a qualidade das lâminas produzidas. A medição por contato pode alterar a espessura deste pó, além de ser uma medida com fortes componentes subjetivos.

Figura 5.3-3) Medição de Espessura de Camadas de Pós na Fabricação de Bimetálicos

Usando o esquema de medição similar ao caso anterior, determina-se a espessura do pó depositado. Esta informação pode ser usada para um controle automático da deposição do pó a ser sinterizado. Observar que o sistema automaticamente compensa oscilações e desvios da posição do metal base.

O Medidor Laser aqui utilizado obteve grande precisão e confiabilidade, porém, a maior dificuldade encontrada foi a conciliação dos valores obtidos pelo Medidor Laser, com aqueles obtidos pelo método tradicional usado pelo fabricante do bimetálico. O método consistia em “raspar” um micrômetro de ponta de agulha, até que um “risco usual” fosse obtido na camada de pó. Este “risco” precisava apresentar determinadas dimensões, porque os operadores eram treinados há muitos anos para, dessa forma, avaliar a fabricação. Ou seja, todo o processo de controle de produção e

qualidade era baseado nestas medidas, que diferiam das medidas Laser por um fator constante. Este fator foi levantado em ensaios e o medidor foi programado para “descontá-lo”. A acurácia obtida foi de $2\sigma = \pm 0.02\text{mm}$.

5.3.4 Seleção de Chapas Metálicas por Espessura

Devido às tolerâncias de fabricação existentes na laminação de chapas, estas apresentam alguns desvios com relação à espessura nominal. Devido às faixas comerciais de tolerâncias, alguma aplicação que requeira precisão maior, necessita que as chapas sejam selecionadas a priori.

A medição de espessura por métodos manuais é uma operação morosa, sendo incompatível com a demanda necessária de seleção. As chapas são fornecidas em bobinas e cortadas em dimensões pré-estabelecidas, em guilhotinas automáticas.

Utilizando-se o sistema de medição de espessura a Laser, logo após a guilhotina, classifica-se cada chapa cortada dentro dos limites pré-estabelecidos.

Figura 5.3-4) Seleção de Espessuras de Chapas em Guilhotinas Automáticas

A medição deve ser feita sem contato devido a severidade da movimentação, ocorrendo choques, grandes vibrações e golpes provenientes da guilhotina.

Aparentemente simples, esta aplicação possui, na verdade, grandes dificuldades. A primeira se refere às vibrações e choques que aparecem por ocasião do momento do corte. A chapa se movimenta com violência, enganando o medidor, devido à sua velocidade de captação ser limitada. Outro fator perturbador é a grande variação de refletância. As chapas aparecem sujas, enferrujadas e cheias de manchas de óleo, exigindo grande velocidade de compensação. A precisão exigida também é alta, na ordem de $0,005\text{mm}$. Todos esses fatores conjugados, ainda não permitiram obter uma configuração de Medidor Laser satisfatório, contudo, dentre os métodos de medição sem contato possíveis, foi o que apresentou melhor resultado. A acurácia obtida foi de $2\sigma = \pm 0,012\text{mm}$.

5.3.5 Controle de Nível de Purga em Fornos de Fundição

Em fundições de Alumínio, o metal escorre em canaleta, sendo que o fluxo é dosado através de um regulador de "purga", colocado na base da forno. Devido a agressividade do ambiente, medidores convencionais não se aplicam e o ajuste é então realizado visualmente, de forma manual.

Com o auxílio de um medidor de distância, a medida do nível é efetuada diretamente, e o sistema regula o ajuste de nível automaticamente. No caso do alumínio, uma camada de óxido branco atenua o efeito da radiação visível emitida. Novamente, cuidados especiais devem ser tomados para a refrigeração da cabeça medidora.

Figura 5.3-5) Controle de Purga do Forno em Fundições

5.3.6 Determinação da Centralização de Toras de Madeira

Na indústria de Laminados de Madeira, as lâminas são retiradas girando-se a tora no seu eixo de "simetria ideal", e retirando-se a lâmina através de uma faca afiada que tangencia a superfície da tora.

Como as toras são irregulares, uma escolha cuidadosa do eixo de giro deve ser efetuada, de modo a aumentar o rendimento. Para isso, um ou mais medidores de distância varrem a superfície da tora, sendo esta girada em torno de um eixo arbitrário. Um sistema computadorizado encontra matematicamente a melhor posição do eixo de giro. Um sistema similar é usado para o corte de tábuas.

Figura 5.3-6) Mapeamento de Toras para Laminados

Na Europa, este tipo de utilização de Medidor Laser é muito comum, devido à necessidade de se aproveitar o máximo da madeira disponível. No Brasil, somente agora, com a exaustão das Florestas, principalmente na Região Sul, tem-se mostrado grande interesse. Novamente, a precisão requerida é baixa, sendo a medição sem contato, o requisito principal.

5.3.7 Controle de Espessura de Lâminas de Madeira

Encontrada a centralização ideal, a tora é reposicionada e uma faca do comprimento da tora é aplicada na sua tangente. Com um controle cuidadoso do posicionamento da faca, são extraídas as lâminas desejadas. No entanto, é indispensável para isso, a medição de espessura da lâmina.

Figura 5.3-7) Controle de Espessura de Laminados de Madeira

Um medidor de espessura deve ser colocado logo na saída, controlando o posicionamento da faca laminadora. Como no caso anterior, novamente o requisito básico é a medição sem contato. As lâminas sofrem de vibrações que dificultam as medidas por métodos tradicionais.

5.3.8 Controle de Espessura de Mantas de Borracha

Para a fabricação de pneus e câmaras de ar, mantas de borracha são largamente utilizadas. Para a fabricação destas mantas, uma massa de borracha não vulcanizada é produzida em lâminas, e então calandradas sucessivamente, visando chegar a uma largura e espessura determinada. Para controlar sua espessura, a distância entre os rolos da calandra é ajustada. O problema é que a manta, por ser de borracha, é altamente deformável. Se uma amostra for retirada para medição, ela pode se contrair e mudar o valor da espessura lida. A medição direta na calandra por métodos tradicionais com contato, não suporta a severidade do processo e as características peculiares da borracha.

O Medidor Laser sem contato é zerado sobre a superfície do cilindro, e assim a espessura da borracha é controlada. Para um melhor desempenho, no entanto, devido aos erros e folgas existentes no cilindro, dois medidores são colocados. O primeiro mede continuamente a posição do cilindro e o segundo a distância até a borracha.

Figura 5.3-8) Medição de Espessura de Borracha durante o Processo de Calandragem

Os Medidores Laser apresentaram, nesse caso, boa precisão ($2\sigma = \pm 0,04\text{mm}$), permitindo o controle automático do posicionamento dos cilindros. Cuidados especiais precisaram ser tomados devido à presença de vapores químicos, que impregnavam as lentes. Janelas com proteção de ar comprimido foram utilizadas. As mantas também, às vezes, se rompiam, atingindo o medidor violentamente; “pára-choques” foram então instalados.

5.3.9 Levantamento de Perfil de Bandas de Borracha

As Bandas de Borracha são mantas destinadas à confecção de Pneus, fazendo parte da "Banda" de Rodagem deles. Estas Bandas, são compostas de uma série de tiras de Borracha com características distintas e combinadas de acordo com a finalidade do pneu.

É necessário o controle do perfil destas Bandas, com o objetivo de racionalizar o uso do material, bem como a forma que as diversas mantas se ligam. Por ser um material mole e facilmente deformável, a medição deve ser executada sem contato.

Assim, medidores são colocados num suporte em "C", medindo ininterruptamente a espessura da Banda. O suporte "C" é deslocado em intervalos discretos. Desse modo, um mapa do perfil da Banda é levantado continuamente.

Figura 5.3-9) Levantamento do Perfil de Bandas de Borracha na Fabricação de Pneus

O Medidor Laser aqui apresenta bons resultados. A medição é efetuada continuamente, e o programa residente no Microcomputador gera relatórios para o Controle de Qualidade.

5.3.10 Medição e Controle de Espessura de Plásticos

No processo de fabricação de frisos plásticos, chapas plásticas e perfilados, o formato final da peça depois da extrusão pode ser afetado por um série considerável de fatores, tais como temperatura da extrusora, velocidade, temperatura da água, densidade do plástico etc.

Para um eficiente controle do processo, é necessário determinar a dimensão do perfil logo após o processo, quando o plástico ainda está mole e em movimento, muitas vezes ainda sob alta temperatura. O Medidor a Laser sem contato se aplica notavelmente a esta situação.

Figura 5.3-10) Controle de Espessura de Peças Plásticas Extrudadas

Cuidados especiais devem ser tomados com as lentes, pois o plástico desprende vapores que podem prejudicar a captação.

Quando o material é muito fino ou translúcido é necessário sincronizar, ou alternar, os Lasers iluminadores pois o feixe de uma cabeça pode alterar a imagem captada pelo outra.

5.3.11 Verificações de Super-Alimentação de Prensas Automáticas

Algumas prensas automáticas possuem manipuladores que as alimentam. Estes colocam ou retiram as chapas prensadas. Um acidente, muito comum, ocorre quando o manipulador carrega duas ou mais peças ao mesmo tempo, podendo ocasionar a quebra da prensa. Um medidor de espessura sem contato é colocado no caminho da alimentação, e verifica se a espessura corresponde àquela de 1 chapa. Caso contrário, interrompe o processo.

Figura 5.3-11) Controle de Sobre-Alimentação de Prensas Automáticas

5.3.12 Verificação do Posicionamento de Peças em Máquinas Automáticas

Além da aplicação já descrita no capítulo 4, os medidores a Laser sem contato podem ser utilizados em robôs de solda ou rebiteagem. Nestes casos, o Medidor informa a posição da peça com relação ao Braço do Robô. Esta medição é necessária para corrigir desvios ou tolerâncias de fabricação da peça, e prováveis erros de posicionamento.

Figura 5.3-12) Verificador de Posicionamento em Robôs

5.3.13 Verificação de Montagem de Peças

Como o feixe Laser iluminador determina com precisão o ponto onde se está medindo, é possível a detecção da presença ou não de uma peça com relação a outra.

Na Figura 5.3-13 a seguir, o sensor verifica se o anel espaçador foi colocado na bucha. Ao mesmo tempo, permite verificar se 2 anéis foram colocados juntos, acidentalmente.

Figura 5.3-13) Verificação de Montagem de Peças

A maior dificuldade neste caso é a sincronização da medida com o posicionamento da peça. Normalmente, para isso são necessários dispositivos eletrônicos auxiliares. No entanto, o medidor Laser pode ser programado para se auto disparar quando a medida atinge um nível determinado, no caso, a borda da peça. A precisão é limitada não pelo medidor em si, mas sim pela precisão da esteira ou mecanismo posicionador da peça que está sendo medida. Em certos casos é conveniente a colocação de uma segunda cabeça medidora compensadora.

5.3.14 Medição de Variação da Posição ou Dimensão de uma Peça em Ambiente Agressivo

Um caso típico desta situação é encontrado na montagem e ajuste de relés termostáticos bimetálicos. Tais relés são colocados e ajustados num forno com o objetivo de verificar se para o ponto de ajuste, o dispositivo é acionado. Não é possível a medição por contato, pois corre-se o risco de tensões mecânicas alterarem o delicado ajuste do par bimetálico.

Nas paredes do forno são colocadas janelas transparentes e um Medidor de Distância a Laser é alinhado sobre o bimetal. O medidor é ajustado visando determinar o momento e a variação de distância que ocorre no braço bimetálico ao se atingir a temperatura de ajuste.

O medidor efetua a leitura através de uma janela transparente, ou mesmo uma cortina de ar frio. É necessário uma calibração do sensor no local.

Figura 5.3-14) Verificação de Peças em Ambientes Agressivos

5.3.15 Verificação de Selagem de Embalagens

Uma aplicação de princípio similar, se resume em verificar se embalagens ou tampas estão bem colocadas ou seladas ao produto. Um exemplo típico são as tampas com selo de violação a vácuo. (Ex.: tampa do "Gatorade").

Tais tampas possuem uma membrana que fica disfarçada quando o produto interno está no vácuo. Caso haja violação o vácuo desaparece, e o selo fica evidente formando uma "bolha" na tampa.

Um Medidor de Distância é colocado sobre a linha de saída, verificando a presença de selo violado. O medidor é zerado na tampas boas, assim, uma tampa violada é determinada pela alteração da distância.

Figura 5.3-15) Verificação de Selagem de Embalagens a Vácuo

O medidor neste caso deve possuir grande velocidade, e a esteira precisão compatível. Infelizmente, nem sempre isso ocorre, sendo necessária a colocação de um segundo medidor compensador, medindo a borda da tampa.

5.3.16 Controle de Dimensões Durante Usinagem de Peça

Alguns materiais são de difícil manuseio, impedindo o uso de medidores por contato. Um caso típico consiste na usinagem de rebolos abrasivos. Um rebole é usinado com o auxílio de uma ferramenta que sofre grande desgaste. Assim, o deslocamento da ferramenta não corresponde necessariamente à retirada de material da peça que está sendo trabalhada. Como agravante, as velocidades são elevadas.

Um Medidor a Laser é colocado sobre a peça que está em usinagem. A variação da medida captada é a leitura direta do material retirado. Outra vantagem é que não é preciso interromper o processo para efetuar a medição.

Figura 5.3-16) Controle de Dimensão de Peças durante Operação de Usinagem

Mesmo sendo uma superfície rugosa, o medidor mede com a resolução necessária. Existe uma grande presença de pó e detritos, que podem contaminar as janelas ópticas. Através de dispositivos de proteção com ar comprimido esses detritos são desviados da lente de captação.

Em materiais isolantes tais como Borracha ou Plásticos, o processo de usinagem gera elevadas cargas eletrostáticas. Nestes casos um cuidadoso projeto elétrico de aterramento para proteção da cabeça medidora é necessário.

5.3.17 Medição e Controle em Moinhos

Na moagem de certos materiais tais como calcário, o moinho é formado por dois cilindros, sendo indispensável o monitoramento da distância entre eles para controlar a granulometria final. Devido a vibração do sistema, equipamentos de medição por contato sofrem grande desgaste e erros de leitura.

Neste caso, o Medidor de Distância a Laser sem contato monitora a distância dos rolos, não sofrendo os efeitos da vibração e filtrando-os da medida desejada.

Figura 5.3-17) Controle de Posição dos Rolos Moedores

5.3.18 Medição de Espessura de Mantas Fibrocimento

O processo de fabricação de fibrocimento, consiste na deposição gradativa de camadas sucessivas de uma manta de fibras misturada a cimento e outros aglomerantes.

Necessita-se medir e controlar a espessura desta manta, que é acumulada sobre um cilindro girando, até que atinja a espessura desejada, para então ser cortada e retirada. A medição deste material torna-se difícil, pois ele possui consistência frágil e está em movimento.

O Medidor de Distância a Laser mede a espessura da manta diretamente sobre o cilindro, sendo zerado sobre este. Atingindo a medida desejada, o sistema interrompe o giro e a manta é retirada.

Figura 5.3-18) Controle de Espessura de Mantas de Fibrocimento

5.3.19 Medição de Papel Ondulado

Na fabricação de papel ondulado, se faz necessário o controle dos "vales" e "picos". Um medidor por contato se torna inviável devido ao risco de se destruir as ondulações. Neste caso, o Medidor Laser é programado para informar as distâncias máximas e mínimas encontradas. De acordo com os valores obtidos é possível regular o processo.

Figura 5.3-19) Controle de Espessura de Papelão Ondulado

Obviamente, é necessária grande velocidade de processamento, e nem sempre o papelão tem um movimento bem comportado. Felizmente, as precisões exigidas são baixas, não gerando problemas.

6. Conclusão

Foram apresentados os principais tipos de Medidores de Distância por Triangulação a Laser, discutindo suas configurações, componentes principais e vantagens relativas. Este trabalho apresentou também um projeto completo de Medidor de Distância e procurou relatar a sua utilização em diversas aplicações industriais a que o autor teve experiência.

Como resultado de tudo o que foi discutido, salienta-se os seguintes pontos:

- Existem várias topologias de medidores de distância usando métodos ópticos. Os métodos variam grandemente nos aspectos de custo, faixa de medição e aplicabilidade industrial. Os Medidores por Triangulação a Laser são os modelos que reúnem as melhores características do ponto de vista de simplicidade, custo e desempenho.
- O Medidor por Triangulação Laser, construído de acordo com a topologia mais conhecida por “Feixe Normal”, apresenta a vantagem significativa de indicar com precisão, o ponto onde a medida está sendo efetuada, e por isso facilita enormemente a sua operação. Outras topologias possuem vantagens em precisão, porém, ora possuem complexidade maior, ora dificuldade maior de operação.
- O Laser Semicondutor Visível apresenta um bom conjunto de características do ponto de vista de um projeto de medidor. Dimensões reduzidas, potência óptica suficiente para a maioria dos casos, colimação relativamente fácil desde que usado com lentes especialmente desenhadas, facilidade de modulação e controle de potência. O único fator a que se deve atentar é a necessidade de se implantar durante a manufatura do sistema, rigorosos procedimentos de manuseio, e cuidadoso desenho da fonte de alimentação.
- O projeto das lentes de captação não apresentam grandes dificuldades, podendo ser usados projetos clássicos de “doublets” ou “triplets”, adaptados à necessidade. Trabalhando-se com conjugados finitos próximos ao unitário, as aberrações são diminuídas. A utilização de programas de cálculo óptico facilita muito o estudo e a adaptação de tais lentes. As aberrações prioritárias no sentido de serem diminuídas são as Esféricas, Coma e Distorção.
- Existem diversos tipos de sensores ópticos utilizáveis nos Medidores por Triangulação à Laser. Os diodos PIN são indicados para os detectores de presença, onde a medida absoluta de distância não é relevante. Os sensores de 2 hemisférios, são indicados para os “apalpadores ópticos”, onde é necessária a detecção precisa ao redor de um determinado ponto, por anulamento. Os Fotodiodos de Efeito Lateral possuem características vantajosas quando se deseja medir pequenos deslocamentos, maiores que aqueles obteníveis com os sensores de 2 hemisférios. Já os sensores discretos tipo CCD, são vantajosos quando se deseja medir grandes deslocamentos.
- Os materiais normalmente submetidos à medição sem contato pelos medidores Lasers possuem as mais diversas características de refletância. A previsão teórica nem sempre é possível, sendo o levantamento empírico preliminar essencial para o

desenho do medidor. Este levantamento é necessário principalmente no que se refere ao equilíbrio radiométrico, determinante do desenho óptico e das etapas de amplificação do sensor adotado. No entanto, é essencial a implementação de artifícios de regulação automática da potência de iluminação, visto que um mesmo material sofre dispersões consideráveis em suas características de refletância.

- O efeito da rugosidade e do granulado óptico agem de forma a diminuir a acurácia do equipamento. Devem ser adotados artifícios ópticos ou eletrônicos que diminuam seus efeitos. Em superfícies foscas e difusas o efeito é menos pronunciado, porém em materiais brilhantes, a degradação da acurácia pode ser relevante. Superfícies muito rugosas devem ser “integradas”, tanto por meios eletrônicos quanto matemáticos, visando filtrar os efeitos oriundos de “defeitos” localizados na superfície.
- Um processo de calibração é essencial ao bom funcionamento do medidor. Desvios de fabricação ópticos e mecânicos, não linearidade dos sensores, ajustes eletrônicos etc, influem na precisão global do sistema. Tais erros devem ser “mapeados” e na medida do possível anulados pelos procedimentos de calibração. De preferência, estes processos devem ser executados através do uso de um padrão conhecido e certificado, para garantir a rastreabilidade, exigida por sistemas de garantia de qualidade.
- Os Medidores por Triangulação a Laser possuem a característica marcante de efetuar medidas sem que haja contato físico direto. Essa peculiaridade faz com que, em muitas aplicações, este seja a única alternativa possível de medição. Outros fatores destacáveis são acurácias elevadas e velocidades grandes.
- Por serem equipamentos ópticos, que utilizam Lasers, os Medidores por Triangulação a Laser exigem certos cuidados, distintos daqueles normalmente aplicados aos medidores tradicionais, por contato. Cuidados especiais devem ser tomados quanto à presença de sujeiras nas lentes de captação, orientação da cabeça medidora com relação ao movimento da superfície, presença de fontes luminosas intensas, presença de ruídos elétricos elevados, choques mecânicos ou vibrações etc. Um cuidadoso estudo preliminar do processo de medição é recomendado, bem como a instrução dos operadores quanto ao método de funcionamento.

Tomando-se os cuidados necessários, este tipo de medidor constitui instrumento relativamente simples e que apresenta bom desempenho. Linearidades da ordem de 0,05% são alcançadas. Por ser um método alheio ao contato físico, não sofre de desgastes significativos, e quando bem utilizados atingem vida útil elevada.

Espera-se que a experiência aqui relatada sirva como subsídio na criação de uma cultura de utilização, necessária para uma maior popularização desta classe de medidores.

7. Bibliografia

- AROMAT CORPORATION - LM100/LM200 Laser Analog Sensors. A High Precision Class IIIb Laser Measurement for a Wide Range of Applications. *Aromat Bulletin XPE041-11X893*, 1993.
- ASTM. Standard Practice for Preparation of Reference White Reflectance Standards. *ASTM Publication E259-66*. 1987.
- BERTANI, D.; CETICA, M.; CILIBERTO, S. A Fast Optical Profilometer. *Optics Communications*, v. 46, n. 1, p. 1-3, june 1983.
- BHARDWAJ, B. *Silicon Photodiodes, Physics and Technology*, Application Notes, United Detector Technology, Hawthorne, CA, april 1982.
- BODLAJ, V.; KLEMENT, E. Remote Measurement of Distance and Thickness Using a Deflected Laser Beam. *Applied Optics*, v. 15, n. 6, p.1432-1436, june 1976.
- BURR-BROWN. Photodiode Monitoring with Operational Amplifiers. *Application Bulletin AB075*, 1994.
- CHAPPEL, A.; HÄRTEL, V. *Optoelectronics Theory and Practice*. McGraw-Hill Book Company, 1978.
- DAINTY, J.C. *Laser Speckle and Related Phenomena*. Heidelberg, Springer Verlag, 1975.
- DAVIS, C.M. Fiber Optic Sensors: an Overview. *Optical Engineering*, v. 24, n. 2, p. 347-351, march/april, 1985.
- DEWITT, T. Rangefinding by the Diffraction Method. *Lasers & Optronics*, p.119-124, april 1989.
- DOEBELIN, E.O. *Measurement Systems, Application and Design*. McGraw-Hill Inc, 1975.
- DUDA, R.C. Radiometric and Photometric Concepts Based on Measurement Techniques. *SPIE v. 416 - Applications of Optical Metrology*. p. 102-110, 1983.
- EDWARDS, I. Using Photodetectors for Position Sensing. *Sensors*, december 1988
- FEIGE, E.; CLEGG, T.B.; POULTON, J.W. A New Optical Transducer to Measure Damped Harmonic Motion. *Am. J. Phys.* vol 51, n. 10, p. 954-955, october 1983.
- FDA. Code of Federal Regulations Part 1040 Subchapter J: Compliance Guide for Laser Products. *Food and Drug Administration*. HHS Publication FDA 86-8260. (1985).
- GONNANSON, W.R.; HASLETT, J.W.; TROFIMENKOFF, F.N. A Low Cost High Resolution Optical Position Sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 39, n.4, p. 658-663, august 1990.

- HAMSTRA, R.H.JR.; WENDLAND, P. Noise and Frequency Response of Silicon Photodiode Operational Amplifier Combination. *Applied Optics*, v.11, n.7, p. 1539-1547, july 1972.
- HASLETT, J.W.; TROFIMENKOFF, F.N.; NORDQUIST, S.E. High-Resolution Position Sensor Based on Two Sensing Elements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v 42, n.2, p. 763-767, june 1993.
- HECHT, E. *Optics* 2nd Ed. Reading, Addison-Wesley Publishing Company, 1987.
- HOBSON, G.S. *Charge-transfer Devices*. Edward Arnold Press, 1978.
- HORN, B.K.P. *Robot Vision*. MIT Press, Cambridge MA, 1987, cap. 10.
- HOVANESSIAN, S. *Introduction to Sensor Systems*. Norwood MA, Artech House, Inc, 1988.
- HUTCHESON, L.D. Pratical Electro-Optic Deflection Measurements System. *Optical Engineering*, v.15, n. 1, p. 61-63, january/february, 1976.
- INTEL. Automotive Products Handbook. *Intel Corp.* 1991.
- JÄHNE, B. *Digital Image Processing: Concepts, Algorithms, and Scientific Applications*. Springer-Verlag. 2nd Edition, 1993.
- KAPLAN, H. 3-D Gauging with Laser Triangulation. *Photonics Spectra*, p. 50-52, july 1994
- KEYENCE CORPORATION OF AMERICA. LB1000 Series Laser Displacement Sensors. *Keyence Cat no. LB3*, 1994.
- KELLY, B.O.; NEMHAUSER, R.I. Techniques for Using the Position Sensitivity of Silicon Photodetectors to Provide Remote Machine Control. *21st Annual IEEE Machine Tool Conference, Paper C73970-11A*. Hartford, CN, october, 1973.
- KENNEDY, N. Robotics for the Welding Engineer - Joint Finding, Tracking and Control. *The Welding Institue Research Bulletin*, p.15-19, january 1986.
- KERR, J.R. A Laser Thickness Monitor. *IEEE Journal of Quantum Eletronics*, p.338-339, june 1969.
- KINGSLAKE, R. *Lens Design Fundamentals*. New York, Academic Press, Inc. 1978.
- KINGSLAKE, R. *Optical System Design*. Orlando. Academic Press, Inc. 1983.
- KINGSTON, R.H. *Detection of Optical and Infrared Radiation*. Heildelberg, Springer-Verlag, 1978.
- KOEBNER, H. *Industrial Applications of Lasers*. John Wiley & Sons, 1984.
- LAIKIN, M. *Lens Design*. New York, Marcel Dekker INC. 1990.
- LASIEWICZ, T.W. Laser Slab Thickness Gage to Increase Aluminum Rolling Productivity. *Light Metal Age*, 1974.

- LASIEWICZ, T.W. Laser Technology as Used in the Iron and Steel Industry. *Iron and Steel Engineer*, 1975
- LASIEWICZ, T.W. Use of the Laser in the Aluminum and Brass Industries. *Light Metal Age*, 1976.
- LDP. Laser Diode Handbook. *Laser Diode Products Inc.* 1994 Edition.
- LIGHT, W. *Non-contact Optical Position Sensing using Silicon Photodetectors*. Application Notes, United Detector Technology. Hawthorne CA, april, 1982.
- LINDHOLM, L.; EDWARDS, K. Analog Position-Sensing Photodetectors, a New Life for an Old Technology. *Photonics Spectra*, p. 149-156, november 1991.
- LUXON, J.T.; PARKER, D.E. *Industrial Lasers and their applications*. New Jersey, Prentice-Hall Inc, 1985.
- MÄÄTTÄ, K.; KOSTAMOVARA, J.; MYLLYLÄ, R. Profiling if Hot Surfaces by Pulsed Time-of-Flight Laser Range Finder Techniques. *Applied Optics*, v. 32, n. 27, p. 5334-5347, September 1993.
- MAHONY, T.; GROMALA, J. Diode Lasers Move into Machine Vision. *Lasers & Optronics*, p. 69-75, november 1989
- MAILLET, H. *O Laser, Princípios e Técnicas de Aplicação*. São Paulo, Editora Manole Ltda, 1987.
- O'SHEA, D.C. *Elements of Modern Optical Design*. John Wiley & Sons, 1985.
- PEIPONEN, K.E. ET AL. Surface Roughness Inspection of Cold-Rolled Aluminium by Laser Light Reflection. *Optics & Laser Technology*, v. 24 n. 4, p 223-225, may 1992.
- PARKER, L. Measuring Height with a Position-Sensing Detector. *Laser Focus*, p. 40-46, july 1980.
- PENNEY, C.M.; THOMAS, B. High Performance Laser Triangulation Ranging. *Journal of Laser Applications*, v. 1, n. 2, p. 51-59, march 1989.
- PAILLER, A. Process and Apparatus for Monitoring the Pressure Prevailing in a Vessel or Receptacle. *US Patent 4907443*, march 13, 1990.
- ROSS, D.A. *Optoelectronic Devices and Optical Imaging Techniques*. MacMillan Press Ltd., 1979.
- SAE. Vehicle Multiplexing Systems. *Society of Automotive Engineers*. SAE Publication p.241, 1991.
- SAWABE, M. Recent Development of Measurement Technique for Dimension and Profile in Japan. *Bull. Japan Soc. of Prec. Eng* , v.18, n. 2, p.158-164, june 1984.
- SAWATARI, T. Real-Time NonContacting Distance Measurement Using Optical Triangulation. *Applied Optics*, v. 15, n. 11 p. 2821-2824, november 1976.

- SCHUDA, F.J. High-Precision, Wide-Range, Dual-Axis, Angle Monitoring System. *Rev.Sci. Instrum.* v. 54, n. 12, p. 1648-1652, december 1983
- SDL. *Laser Diode Operator's Manual & Technical Notes*. 1994 Edition
- SIROHI, R.S.; KOTHIYAL, M.P. *Optical Components, Systems and Measurement Techniques*. New York, Marcel Dekker, Inc. 1990.
- SKRIBANOV, E.V.; ALEKSEEV, K.B.; MARKIN, S.V.; MATVEENKO, V.I. A Device for Optical Measurement of Linear Dimensions by Means of Matrix Signal Converters. *Izmeritel'naya Tekhnika*, n.5, p.10-11, may 1984 / Tradução do original em Russo / .
- SLATER, P.N. *Remote Sensing Optics and Optical Systems*. Reading MA, Addison-Wesley, 1980.
- STITCH, M.L. Laser Rangefinding. *Laser Handbook*, capítulo F7 ,North-Holland Publ. Co., 1972.
- SUN, X.; ABSHIRE, B.; DAVIDSON, F.M. Multishot Laser Altimeter: Design and Performance. *Applied Optics*, v. 32 n. 24, p. 4578-4585, august 1993.
- THOMAS, B. S. Optical Seam Trackers: Tough Requirements for Design and Laser Safety. *Robotics Engineering*, June, p. 8-11, 1986.
- THOMSON COMPOSANTS MILITAIRES ET SPATIAUX. *The CCD Image Sensor*. 1992.
- TANWAR, L.S.; KUNZMANN, H. An Electro-Optical Sensor for Microdisplacement Measurement and Control. *J. Phys. E; Sci. Instrum.*, v.17, p. 864-866, 1984.
- TOSHIBA. *CCD Linear Image Sensor Handbook*, 1991.
- TOSHIBA. *Laser Diode Product Guide*, 1990
- VORBURGER, T.V.; TEAGUE, E.C. Optical Techniques for On-line Measurement of Surface Topography. *Precision Engineering*, v. 3 p.61-83, 1981.
- WALLMARK, T.J. A New Semiconductor Photocell Using Lateral Photoeffect. *Proceedings of IRE*, p.474-483, april, 1957.
- WIEMAN, C.E.; HOLBERG, L. Using Diode Lasers for Atomic Physics. *Rev. Sci. Instrum.* v. 62, n. 1, p. 1-20, january 1991.
- WILSON, J.; HAWKES, J.F.B. *Lasers, Principles and Applications*. Prentice Hall International Series in Optoelectronics. Hertfordshire, Prentice Hall International (UK) Ltd, 1987.

8. APÊNDICES

8.1 APÊNDICE I - Programa MathCAD para Ante-Projeto Geométrico de um Medidor de Distância : MD50

São apresentadas as listagens do programa MathCAD e a seguir o esboço mecânico usado para este fim.

Programa MathCAD para Ante-projeto Geométrico de um Medidor de Distância.

Este programa procura auxiliar o projeto da configuração geométrica de um medidor por triangulação óptica. Como já discutido no Capítulo 4, dada uma configuração desejada, não existe solução única do ponto de vista matemático. Assim o projetista deve considerar outros fatores, principalmente de ordem prática, na escolha dos parâmetros que definirão a geometria da cabeça medidora.

A configuração aqui descrita corresponde ao medidor MD50, usando sensor CCD de 2048 pontos, destinado a medir distâncias de 60 a 110mm da face de referência.

Os seguintes parâmetros são fornecidos: (todos em milímetros)

$do := 58$ Distância da origem, a partir da face de referência, com relação à ordenada do centro da lente, a partir da face de referência

$R := 50$ Campo de medição, a partir da origem do .

$\theta := 45.55 \cdot \frac{\pi}{180}$ Angulo primário de triangulação formado entre o feixe laser, (normal à superfície) e o eixo do sistema óptico de captação, em radianos, correspondente a distancia inicial, zero.
 $\theta = 0.794997$

$x_{max} := 28$ Comprimento do sensor de imagem, definindo assim o passeio máximo que a imagem pode percorrer sobre este.

$f := 40.2$ Distância focal da lente adotada (EFL), O programa irá calcular a alteração necessária para ajustar-se ao sistema.
Trata-se da estimativa inicial.

$dx := 0.014$ Resolução do CCD.

$$\text{alf}(f, \tau) := \text{atan} \left(\tan(\tau) \cdot \frac{do}{f \cdot \cos(\tau)} \right)$$

Esta equação calcula a inclinação do Sensor de Imagem com relação ao eixo óptico.

$$A(f, \tau) := \frac{do - f \cdot \cos(\tau)}{(\cos(\tau))^2}$$

Coefficienttes da equação geral de operação, conforme já descrito no capítulo 2.

$$B(f, \tau) := f \cdot \frac{\tan(\tau)}{\sin(\text{alf}(f, \tau))}$$

A próxima equação ajusta o campo de medição R com a coordenada máxima do sensor x_{max} , portanto seu valor deve ser próximo de zero.

$$\text{casa}(f, \tau) := R \cdot (B(f, \tau) - x_{max}) - A(f, \tau) \cdot x_{max}$$

A equação seguinte verifica a resolução obtida.

$$\text{rel}(f, \tau, x) := \left[B(f, \tau) \cdot \frac{A(f, \tau)}{(B(f, \tau) - x)^2} \right] \cdot dx$$

A seguir são feitas as aproximações desejadas.

Primeiramente usa-se como estimativas:

$$\tau_c := 0 \quad f_c := 40.2$$

$$f_s := \text{root}(\text{casa}(f_c, \tau_c), f_c)$$

$$f_s = 41.950566$$

A função root encontra f_s

O programa sugere a alteração da distancia focal da lente , como caminho da solução

$$\text{rel}(f_s, \tau_c, x_{\max}) = 0.046417$$

Resolução obtida

$$\text{alf}(f_s, \tau_c) \cdot \frac{180}{\pi} = 44.804322$$

Inclinação do sensor

$$\text{casa}(f_s, \tau_c) = -8.871368 \cdot 10^{-4}$$

Verificação da validade da solução, devendo ser proximo de zero.

$$s(d) = \frac{d_o}{\cos(\tau_c)} + d \cdot \cos(\tau_c)$$

Calcula a posição do alvo com relação ao eixo da lente , para as distancias desejadas

$$s(0) = 82.823236 \quad s(50) = 117.837565$$

$$\text{sl}(d) := s(d) \cdot \frac{f_s}{s(d) - f_s} \quad \text{hl}(d) := d \cdot \sin(\tau_c) \cdot \frac{f_s}{s(d) - f_s}$$

Calcula a posição da imagem , para as distancias desejadas

$$\text{sl}(0) = 85.007454$$

$$\text{hl}(0) = 0$$

$$\text{sl}(50) = 65.140968$$

$$\text{hl}(50) = 19.731251$$

$$\text{alfa}(d) := \text{atan}\left(\frac{\text{hl}(d)}{\text{sl}(d) - \text{sl}(0)}\right) \cdot \frac{180}{\pi}$$

Verificação do angulo de inclinação do sensor com relação ao eixo optico da lente. Notar o sinal invertido.

$$\text{alfa}(50) = -44.804322$$

$$x_l := \sqrt{\text{hl}(R)^2 + (\text{sl}(R) - \text{sl}(0))^2}$$

Verificação do tamanho do sensor necessário.

$$x_l = 27.999992$$

$$A(f_s, \theta) = 58.365635$$

$$B(f_s, \theta) = 60.684738$$

Estimativas das constantes
geométricas , para a função
transferência.

[illegible]

8.2 APÊNDICE II - Programa MathCAD para Calibração de um Medidor de Distância : MD50

São listados os dados usados para a calibração do medidor MD50, número de série 014.

Programa MathCAD para Calibração de Um Medidor de Distancia MD50

Este programa foi escrito em MathCad 5 , e destina-se a calcular as constantes de calibração para o medidor MD50 numero de série 014. O procedimento está descrito no capítulo 4 . O programa usa o método dos mínimos quadrados para encontrar as constantes A , B , C que melhor adapta a equação de comportamento teórico aos dados levantados durante o processo de calibração.

 $n := 47$
 $i := 0..n$
 $x_i :=$
 $y_i :=$

873	0
1130	1
1382	2
1626	3
1859	4
2085	5
2305	6
2520	7
2727	8
2929	9
3123	10
3313	11
3497	12
3676	13
3849	14
4018	15
4181	16
4340	17
4494	18
4644	19
4792	20
4934	21
5074	22
5209	23
5342	24
5471	25
5598	26
5721	27
5840	28
5959	29
6073	30
6185	31
6294	32
6400	33
6505	34
6607	35
6707	36
6805	37
6900	38
6995	39
7086	40
7175	41
7263	42
7348	43
7433	44
7515	45

numero de pontos

índice auxiliar

Tabelas de pontos

A tabela "y" corresponde as distancias calibradas apresentadas ao sistema para a aquisição da tabela "x" . Esta ultima representa a posição captada pelo sensor de imagem , ou numero do pixel iluminado, quando o alvo está na posição calibrada.

Notar que x não está em mm e sim em "pixels" . Desta forma as constantes obtidas já incorporam a conversão de unidade .

Para facilitar a aritmética do processamento , a contagem x de pixels é multiplicada por 4. Assim a medida x_{max} corresponde a 4*2048=8192

7515
7600
7679

45
46
47

Interpolação usando Função Teórica

$$x'_i := x_i$$

Método dos Mínimos Quadrados.
Cria a matriz X

$$X3 := \overrightarrow{(x^0)}$$

$$X1 := \overrightarrow{x}$$

$$X2 := \overrightarrow{(x^1 \cdot y)}$$

$$X4 := \text{augment}(X1, X2)$$

$$X := \text{augment}(X4, X3)$$

Encontra os coeficientes.

$$\text{coef} := (X^T \cdot X)^{-1} \cdot (X^T \cdot y)$$

$$\text{coef} = \begin{pmatrix} 0.004 \\ 6.316 \cdot 10^{-5} \\ -3.079 \end{pmatrix}$$

Reduz os coeficientes nas constantes
A, B e C da equação teorica.

$$A := \frac{\text{coef}_0}{\text{coef}_1} + \text{coef}_2 \quad B := \frac{1}{\text{coef}_1} \quad C := \text{coef}_2$$

Valores escolhidos.

$$A = 53.178 \quad B = 1.583 \cdot 10^4 \quad C = -3.079$$

Função teorica.

$$f(y) := A \cdot \frac{y}{(B - y)} + C$$

Função erro , correspondente à
diferença entre o valor real "y" e o
valor da função interpoladora "f(x)".

$$\text{Erro}_i := y_i - f(x_i)$$

$$2 \cdot \text{stdev}(\text{Erro}) = 0.021$$

Desvio padrão do erro encontrado.
Intervalo de confiabilidade de 96% ,
correspondendo a $2\sigma = 0.021\text{mm}$

Gráfico do erro de calibração
obtido. Usando Função
interpoladora Teórica.

Verificação usando interpolação polinomial

$D := 4$ grau do polinomio
 $d := 0..D$

$X^{<d>} = \overrightarrow{(x^d)}$ vetoriza xi

$\text{coef} := (X^T \cdot X)^{-1} \cdot (X^T \cdot y)$ calculo dos coef

$$\text{coef} = \begin{bmatrix} -2.97 \\ 0.003 \\ 3.677 \cdot 10^{-7} \\ -2.631 \cdot 10^{-11} \\ 4.668 \cdot 10^{-15} \end{bmatrix}$$

$\text{fp}(t) := \sum_d \text{coef}_d \cdot t^d$ funcao interp.

$\text{Error}_i := y_i - \text{fp}(x_i)$ Função erro

$2 \cdot \text{stdev}(\text{Error}) = 0.023$ Desvio Padrão obtido

Gráfico de erro usando polinômio interpolador

Algumas conclusões:

Notar que para um medidor "bom" a equação teórica equivale em desempenho a um polinômio de grau 4.

Observar também que os valores encontrados para as constantes A, B e C não são iguais às previstas pelo programa de ante-projeto geométrico.

As constantes teóricas (Apêndice I) são :

$$A=58.36 \quad B=60.68$$

As constantes aqui obtidas são , depois da conversão de 4*pixels em mm:

$$A=53.17 \quad B=55.40$$

Conclui-se portanto a exigência do processo de calibração para cada exemplar do medidor.

8.3 APÊNDICE III - Programa MathCAD para Ensaio de Refletância Direcional Difusa

Usado para a calibração do Refleto-Goniômetro, destinado ao levantamento das características de diversos materiais.

Levantamento do Índice de Refletância Direcional Difusa.

Neste Apêndice são demonstrados os ensaios realizados para o levantamento do índice de Refletância Direcional de uma série de materiais , onde comumente são utilizados os medidores de distância por Triangulação Óptica.

A finalidade destes ensaios é a de orientar o usuário destes medidores na escolha e seleção dos parâmetros de ajuste do equipamento , e avaliar alternativas de uso.

Os ensaios foram realizados usando a montagem detalhada na figura 3.4-7 do capítulo 3 . Um laser Semicondutor (670nm) de potência conhecida é colimado e apontado sobre uma amostra da superfície de interesse. A uma certa distância é colocada uma optica coletora fixada a um gônio. Este gônio é construído de forma a evitar a obstrução do feixe laser quando os angulos são coincidentes.

O feixe é ajustado na incidencia normal , e um medidor de potência optica é ajustado à lente coletora. O valor do sinal lido é registrado em função do angulo formado entre a lente captadora e a normal à superfície. Para obter valores significativos , é necessário a calibração do conjunto. A forma mais comum é a se se submeter um material de comportamento conhecido e a partir do resultado , encontrar a constante de calibração do conjunto.

O material aqui utilizado é o Sulfato de Bário , muito usado como referencia de refletância difusa quase ideal. Este material é o indicado pelas normas de radiometria como possuindo refletividade de 0.99 Lambertiano. Nas referencias ASTM (1987) são mostrados as etapas necessárias para a confecção de amostras normalizadas.

Os calculos a seguir ilustram o procedimento.

$P_e := 18.70$	Potência do Laser , avaliado através do medidor de Potência Optica, usando a lente captadora na saída da Optica colimadora de Transmissão Este valor não está em mW , devido ao aparelho estar descalibrado. Os valores devem ser tomados de forma relativa. O valor aqui corresponde a um laser de 2.5 mW.
$\tau_r := 1$	Fator de Perda , Optica de Captação, aqui considerada unitário, para encontrar mais adiante a real.
$\tau_t := 1$	Fator de Perda , Optica de Transmissão
$A_r := \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{50}{2}\right)^2$	Area de abertura da optica de Captação (mm2), lente 50mm f2
$d := 200$	Distância entre o ponto iluminado e a Optica de Captação (mm)
$i := 0..17$	
$j := 0..2$	

Pr := READPRN(dados1)

Angulos de Captação
, em graus

$\alpha_i =$

0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55
60
65
70
75
80
85
90

Potência Captada no angulo α ,
em 3 leituras . Não expresso em mW,
pois o medidor está descalibrado

Pr =

	0	1	2
0	0.0616	0.0621	0.0621
1	0.0611	0.0613	0.0614
2	0.0605	0.0609	0.0609
3	0.0587	0.0591	0.0592
4	0.0569	0.0576	0.0576
5	0.0550	0.0554	0.0556
6	0.0522	0.0523	0.0523
7	0.0483	0.0486	0.0487
8	0.0444	0.0445	0.0445
9	0.0414	0.0416	0.0416
10	0.0369	0.0371	0.0370
11	0.0322	0.0324	0.0325
12	0.0275	0.0277	0.0274
13	0.0223	0.0225	0.0223
14	0.0173	0.0175	0.0175
15	0.0129	0.0130	0.0131
16	0.0080	0.0080	0.0080
17	0.0037	0.0036	0.0035

$$Pm_i := \sum_{j=0}^2 \frac{Pr_{i,j}}{3}$$

Potência optica captada média

$$R_i := \frac{Pm_i \cdot d^2}{Pe \cdot \tau_r \cdot \tau_t \cdot A_r}$$

Refletância obtida

$$Rt_i := \frac{\cos\left(\alpha_i \cdot \frac{\pi}{180}\right)}{\pi}$$

Refletância teórica para um material
Lambertiano ideal

$$R_0 = 0.2699$$

Este valor corresponde a refletância medida pelo dispositivo

$$R_{t_0} = 0.3183$$

Já o valor R_t corresponde ao teórico, esperado para um sistema sem perdas

$$\tau_c = \frac{R_0}{R_{t_0}} \quad \tau_c = 0.8479$$

O fator de calibração aqui obtido será aquele que deverá ser aplicado nos ensaios de refletância descritos no Apêndice IV

8.4 APÊNDICE IV - Ensaios de Refletância Direcional Difusa de Alguns Materiais

São apresentados a seguir uma série de curvas fornecendo o valor da refletância direcional difusa para diversos materiais. Estes materiais são normalmente encontrados na utilização de Medidores de Distância por Triangulação a Laser.

A Refletância direcional é apresentada em 1/stereo-radiano, em escala logarítmica, em função do ângulo de observação. A incidência é sempre normal.

Para estimar a refletância relativa, adimensional, para um certo ângulo do sistema de captação, basta multiplicar o valor da refletância direcional difusa encontrado na curva, pelo ângulo sólido da lente captadora. Para maiores esclarecimentos consultar o Capítulo 3 e também o Apêndice III anterior.

Os materiais foram ensaiados no dispositivo descrito na Figura 3.4-7, e calibrados usando o coeficiente de correção encontrado no Apêndice III.

Curva 1) Chapa Alumínio AL99.5, a mais comum encontrada comercialmente. É brilhante, com poucos riscos e usado na fabricação de painéis de baixa qualidade ou peças mecânicas de pequenas cargas. É usado também na fabricação de refletores e luminárias, quando polido. Observar que a curva mostra o efeito da reflexão parcial, confirmando o comportamento misto no que se refere à refletância especular e difusa

Curva 2) Manta de Borracha, usado na fabricação de pneus e câmaras. Aqui se apresenta antes da vulcanização, possuindo uma superfície lisa e brilhante, apesar de ser bem escura. Observar que a curva se interrompe a 50 graus, devido a baixa intensidade do sinal refletido.

Curva 3) Manta de Borracha Vulcanizada. Observar a diferença em relação a curva anterior. É bem mais fosca.

Curva 4) Chapa de Aço 1020, usada na fabricação de longarinas de Chassis de Caminhões. A superfície é escura e rugosa, possuindo regiões riscadas brilhantes.

Curva 5) Chapa de Aço 1020 Jateado, a mesma anterior usada na fabricação de longarinas, após sofrer jateamento com granalha de vidro.

Curva 6) Chapa Plástica ABS Branca, muito usada na fabricação de Eletrodomésticos, partes internas de geladeiras etc. Normalmente apresentada em chapas, sofre deformação através do método de “Vacuum Forming”.

Curva 7) Papel Sulfite, branco e limpo, tipo Chamex. Comparar com a curva correspondente ao Sulfato de Bário, no Apêndice III. Conclui-se que possuem características bem próximas.

Curva 8) Chapa de Inox, utilizada na fabricação de moedas, laminado a frio. Observada no sentido transversal às estrias de laminação.

Curva 9) Chapa de Inox, a mesma anterior, observada no plano paralelo às estrias de laminação. Observar as diferenças com relação à curva anterior. Exemplo de anisotropia das características de Refletância.

Curva 10) Liga de Antimônio, usada na fabricação de pistões.

8.5 APÊNDICE V - Listagem das Características Ópticas da Lente do Medidor MD50, conforme programa CODE V

É apresentado a seguir a listagem do programa CODE V, mostrando as características principais da lente captadora usada no medidor MD50, descrito no capítulo 4.

São apresentados em sequência :

- Listagem das características principais
- Desenho geométrico usado para avaliação óptica
- Esboço previsto para os “spots” nas posições angulares limites, correspondentemente ao início, meio e fim do campo de medição.
- Previsão da Imagem sobre a superfície 4, que corresponde ao sensor de imagem CCD. (obs: notar a escala)

VIE

UNIV SAO PAU 18-Aug-95 20H 37M 49S

CODE V PC Version: 8.04 A

CPU clock: 0H 4M 42S

Defocus on a tilted image surface is measured along the axis
preceding the tilt

The scale factor has been set to 2.3

FNV-Lente Corrigida M. A. Stefani

	RDY	THI	RMD	GLA	CCY	THC	GLC
> OBJ:	INFINITY	97.880000			100	100	
XDE:	0.000000	YDE:	0.000000	ZDE:	0.000000	DAR	
XDC:	100	YDC:	100	ZDC:	100		
ADE:	52.910000	BDE:	0.000000	CDE:	0.000000		
ADC:	100	BDC:	100	CDC:	100		
STO:	45.00000	5.000000		SF2_SCHOTT	100	100	
2:	-45.00000	3.000000		BK7_SCHOTT	100	100	
3:	-69.19246	66.890000			0	100	
IMG:	INFINITY	-1.421823			100	100	
XDE:	0.000000	YDE:	0.000000	ZDE:	0.000000	DAR	
XDC:	100	YDC:	100	ZDC:	100		
ADE:	-37.000000	BDE:	0.000000	CDE:	0.000000		
ADC:	100	BDC:	100	CDC:	100		

SPECIFICATION DATA

EPD	9.00000		
DIM	MM		
WL	670.00		
REF	1		
WTW	1		
INI			
XAN	0.00000	0.00000	0.00000
YAN	-8.42600	0.00000	8.42600
VUX	0.00000	0.00000	0.00000
VLX	0.00000	0.00000	0.00000
VUY	0.00000	0.00000	0.00000
VLY	0.00000	0.00000	0.00000

REFRACTIVE INDICES

GLASS CODE	670.00
SF2_SCHOTT	1.641187
BK7_SCHOTT	1.513905

No solves defined in system

This is a decentered system. If elements with power are decentered or tilted, the first order properties are probably inadequate in describing the system characteristics.

INFINITE CONJUGATES

EFL	42.0000
BFL	38.7657
FFL	-40.0749
FNO	4.6667

AT USED CONJUGATES

RED	0.7266
FNO	7.9103
OBJ DIS	97.8800
TT	171.3482
IMG DIS	65.4682
OAL	8.0000
PARAXIAL IMAGE	
HT	8.8088
THI	69.2821

ANG 8.4260

ENTRANCE PUPIL

DIA 9.0000

THI 0.0000

EXIT PUPIL

DIA 9.4323

THI -5.2519

20:07:13

25.00 MM

FNV-Lente corrigida

M. A. Stefani

FULL SCALE

ORA 18-Aug-95

FIELD
POSITION

0.00, 1.00
0.000, 8.426 DG

0.00, 0.00
0.000, 0.000 DG

0.00, -1.00
0.000, -8.43 DG

0.25400 MM

DEFOCUSING

0.00000

FNV-Lente corrigida M. A. Stefani

20:00:01

19:57:44

FNV-Lente corrigida M. A. Stefani

ORA 18-Aug-95

8.6 APÊNDICE VI - Diagramas dos Circuitos Eletrônicos do Medidor MD50

São apresentados :

- Circuito EMP3111 e EMP3111b : Placa do microprocessador central, 8031.
- Circuito EPMC9132 : Placa de conexão do CCD.
- Circuito EPDL020 : Fonte do Diodo Laser.
- Circuito EPCCD010, folhas 1, 2 e 3 : Placa de controle do CCD.
- Circuito DIS31011 : Display e chaves de painel.
- Circuito EPA0200 e EPA0200A : Placas de Acessórios, entre eles o D/A do controlador de potência do Laser.

PARTS LIST			
QUANTITY REQUIRED		REVISION	
1	U14	74LS02	1
1	U15	74LS261	1
1	U16	74LS138	1
1	U17	74LS263	1
3	U12	74LS00	1
1	U13	74LS00	1

OPTOELETRONICA S/A

PLACA MICROPROCESSADOR

EMP3111B

2 OF 2

PARTS LIST			
OPTOELETRONICA S/A			
PLACA CONEXAO DO CCD			
Q3	BC546	Q4	BC546
R13	1K	R14	1K
R15	1K	R16	1K
R17	33R	R18	47R
R19	47R	R20	47R
R21	1K	R22	47R
R23	47R	R24	1K2
R25	1K2		
C4	47µF	C5	10µF
D3	1N4007		
1/1

PARTS LIST									
PROJECT NO.					OPTOELETRONICA S/A				
REVISION					PLACA CONTROLE CCD				
DATE					EPCCD0010				
BY					2/3

[illegible]

8.7 APÊNDICE VII - Listagem do Programa de Controle do Medidor de Distância : MD50

A Listagem a seguir compreende o programa de controle do medidor MD50. Foi inteiramente escrito em ASSEMBLER do 8031.

```

1  $paginate
3  $showincs
4  ;
5  ;
6  ;      Programa de controle do medidor de distancia
7  ;      Versao :Medidor de distancia MD50
8  ;      Cliente :FNV Cruzeiro
9  ;
10 ;      Versao Monoprocessada baseada na versao ffnv04.asm e bimetall.asm
11 ;      Versao 2.0      10/12/93      -Rede CAN
12 ;                                  -Multitasker
13 ;                                  -Processamento integral
14 ;                                  -placa emp3111
15 ;      int0 , t0      valid
16 ;      int1 , t1      imagem
17 ;
18 ;
19 ;      Mario Antonio Stefani
20 ;
21 ;      Optoeletronica S/A
22 ;
23 ;      Definicao de variaveis, bits de controle e flags
24 ;
=0097# 25 ledvar      equ      p1.7 ;led indicativo de varredura ccd
=0096# 26 ledpro      equ      p1.6 ;led indicativo de processamento
=0091# 27 ledcal      equ      p1.1 ;led indicativo de calculo sendo efetuado
=0090# 28 ledhead0     equ      p1.0 ;led indicativo de imagem captada cabeca 0
=0092# 29 ledclaro     equ      p1.2 ;sinal selecionador ve claro/escuro
=0093# 30 ledcabmed    equ      p1.3 ; verde , indicativo de medida
=0095# 31 ledcabalc    equ      p1.5 ; amarelo , indicativo de alcance
=0094# 32 ledcabsus    equ      p1.4 ; vermelho , indicativo de suspeito
=00B2# 33 fimvar      equ      p3.2 ;p3.2 verifica fim de varredura (int0)
=00B3# 34 imagem      equ      p3.3 ;sinal imagem ccd (int1)
=00B2# 35 initvar     equ      p3.2 ;verifica inicio varredura
36 ;
=7E02 37 resetserial  equ      7e02h ;reset serial
=7E03 38 resetcan     equ      7e03h ;reset can
=7E01 39 vpp          equ      7e01h ;se 0 poe 5V na flash , se 1 poe 12V
=7E00 40 nshadow      equ      7e00h ;se 0 habilita flash , se 1 habilita RAM
41 ;
=0100 42 postack0      equ      0100h ;posicao inicial pilha0 de posicoes
=0300 43 widstack0     equ      0300h ;posicao inicial pilha0 de largura
=0500 44 postack1      equ      0500h ;posicao inicial pilha1 de posicoes
=0700 45 widstack1     equ      0700h ;posicao inicial pilha1 de largura
=1100 46 pilhapncc     equ      1100h ;contem filtros
=1102 47 pilhamedia    equ      1102h ;contem medias de captacoes
=1000 48 lasersetpoint equ      1000h ;potencia setada nos jumps
=1001 49 laserpower    equ      1001h ;contem potencia corrente
50 ;
=0018 51 posptl        equ      18h ;pointer pilha posicao l
=0019 52 pospth        equ      19h ;pointer pilha posicao h
=001A 53 widptl        equ      1ah ;pointer pilha largura l
=001B 54 widpth        equ      1bh ;pointer pilha largura h

```

```

=001C      55  ncountcap      equ    1ch    ;contador numero de var. p/ captacao
=001D      56  ncountmean    equ    1dh    ;contador numero de var. p/ media
=001E      57  procntl       equ    1eh    ;contador pilha processamento l
=001F      58  procnth       equ    1fh    ;contador pilha processamento h
=0020      59  acqcntl       equ    20h    ;contador pilha aquisicao l
=0021      60  acqcnth       equ    21h    ;contador pilha aquisicao h
=0022      61  acqposl       equ    22h    ;pointer pilha aquisicao posicao l
=0023      62  acqposh       equ    23h    ;pointer pilha aquisicao posicao h
=0024      63  acqwidl       equ    24h    ;pointer pilha aquisicao largura l
=0025      64  acqwidh       equ    25h    ;pointer pilha aquisicao largura hq
=002A      65  laserpowerc    equ    2ah    ;contador delay de cont. potencia
=002B      66  ncountoutrange equ    2bh    ;contador de captacoes maximas de outrange
=0009      67  nsetoutrange   equ    09h    ;numero maximo de outranges
=0031      68  nsetcap       equ    31h    ;numero setado para captacoes
=0032      69  nsetmean      equ    32h    ;numero setado para media
=0033      70  ncountmeancap equ    33h    ;contador de medias p/ captacao
=0034      71  powerdifl     equ    34h    ;diferenca entre largura setada e captada l
=0035      72  powerdifh     equ    35h    ; idem h
=0036      73  vstatus       equ    36h    ;contem status do sistema
=0037      74  ncountsat     equ    37h    ;filtro anti-saturador
=0020      75  nsetsat       equ    020h    ;n max de saturacoes antes de zerar potencia
          76  ;
=007F      77  flagrangep    equ    7fh    ;flag de outrange
=007E      78  flagmensr     equ    7eh    ;flag de mensagem outrange escrita
=007D      79  flagvar       equ    7dh    ;flag de varredura terminada
=007C      80  flagterm      equ    7ch    ;termino de processamento e display
=007B      81  flagdata      equ    7bh    ;dado disponivel para ser processado
=007A      82  flagbank      equ    7ah    ;determina banco sendo utilizado
=0079      83  flagtransbufful equ    79h    ;indica transmitter buf full
=0078      84  flagonce      equ    78h    ;indica requisicao de medida
=0077      85  flagerrorcom   equ    77h    ;indica comando nao reconhecido
=0076      86  flagcontinuous equ    76h    ;indica envio continuo de medida
=0075      87  flagerroruart  equ    75h    ;indica erro na serial
=0072      88  flagneg       equ    72h    ;indica largura medida menor que a setada
=0071      89  flagmean      equ    71h    ;indica n media atravez de comando serial
=0070      90  flagfirst     equ    70h    ;indica primeiro valor para pncc
=006F      91  flagsecond    equ    6fh    ;indica segundo valor para pncc
=006E      92  flagesperaproc equ    6eh    ;indica espera para termino de proc.
=006D      93  flagsuspeito  equ    6dh    ;indica que ouve captacao de medida suspeita
=006C      94  flagcalibra   equ    6ch    ;indica estado de calibracao
=006B      95  flagerrorcan   equ    6bh    ;indica erro can situacao anormal
=006A      96  flagerrorcanbus equ    6ah    ;indica erro duto
=0069      97  flagerrordpram equ    69h    ;indica erro interno no can
=0068      98  flagnegant     equ    68h    ;indica derivativo do controle potencia
=0067      99  flagcabalc     equ    67h    ;indica mimic da cabeca led alcance
=0066      100 flagcabsus     equ    66h    ;indica mimic da cabeca led suspeiro
=0065      101 flagcabmed     equ    65h    ;indica mimic da cabeca led medida
=0062      102 flagsat       equ    62h    ;indica saturacao de potencia
          103 ;
          104 ;
          105 ;      vetores de interrupcoes
          106 ;
=8000      107              org 8000h

```

```

8000 02 8D54'      108 reset1:      ljmp inicializa
                   109 ;
                   110 ;                org 8003h
8003 02 8F5D'      111 interrupcao0: ljmp fimvarredura
                   112 ;
                   113 ;                org 08013h
8013 02 92C2'      114 interrupcao1: ljmp medida
                   115 ;
                   116 ;                org 8030h
                   117 ;
                   118 include "fc3101.asm"
                   1 ;
                   2 ;
                   3 ;                Constates do sistema Medidor MD50
                   4 ;                placa mpo3111
                   5 ;                Versao 1.0      10/12/93      constantes em posicoes
                   6 ;                Mario Antonio Stefani
                   7 ;
                   8 ;                Este arquivo contem as constantes de calibracao a serem aplicadas
                   9 ;                para a tranformacao do numero magico x na medida de distancia
                  10 ;                desejada
                  11 ;
                  12 ;                constantes de calibracao      cabeca0
                  13 ;
                  14 ;                 $M(x)=a\{(x-off)/(b-x+off)\}+moff$ 
                  15 ;
8030 D7            16 offset00c0      db      0d7h      ;lsb
8031 05            17 offset01c0      db      005h      ;msb
8032 00            18 moff00c0       db      000h      ;lsb
8033 00            19 moff01c0       db      000h      ;msb
8034 7F            20 bb00c0        db      07fh      ;lsb
8035 36            21 bb01c0        db      036h      ;msb
8036 50            22 aa00c0        db      050h      ;lsb
8037 17            23 aa01c0        db      017h      ;msb
                   24 ;
                   25 ;                constantes de ajuste do controle de potencia do laser
                   26 ;
8038 02            27 lasertau       db      2          ;cte de tempo
8039 0F            28 laserlarg      db      15         ;largura imagem desejada p/ tcd142
                   29 ;
                   30 ;                constantes de media
                   31 ;
803A 02 02         32 tabelajmedia: db      2,2          ;000      0=fechado 1=aberto
803C 02 04         33                  db      2,4          ;001
803E 04 04         34                  db      4,4          ;010
8040 04 06         35                  db      4,6          ;011
8042 06 06         36                  db      6,6          ;100
8044 06 08         37                  db      6,8          ;101
8046 0A 08         38                  db      10,8         ;110      alterado
8048 0F 08         39                  db      15,8         ;111      alterado
804A 0F 08         40                  db      15,8         ;1000
804C 0F 08         41                  db      15,8         ;1001
                   42 ;

```

```

43 ;
44 ;
119 ;
120 include "fmathpck.asm"
1 ;
2 ;
3 ; Pacote de rotinas matematicas para 8051
4 ;
5 ; Optoeletronica S/A
6 ; Mario Antonio Stefani 20/09/91
7 ; versao 1.4 29/03/93 revisao em div32 divisor>FFFF
8 ;
9 ; registros utilizados
10 ;
=000B 11 op3 equ 0bh ;msb operador
=000A 12 op2 equ 0ah
=0009 13 op1 equ 09h
=0008 14 op0 equ 08h ;lsb operador fornecido
=000F 15 tmp3 equ 0fh ;msb registro auxiliar
=000E 16 tmp2 equ 0eh
=000D 17 tmp1 equ 0dh
=000C 18 tmp0 equ 0ch ;lsb registro auxiliar
=0013 19 acc3 equ 13h ;msb acumulador auxiliar 32bits
=0012 20 acc2 equ 12h
=0011 21 acc1 equ 11h
=0010 22 acc0 equ 10h ;lsb acumulador auxiliar
=0014 23 mem0 equ 14h ;memoria auxiliar
=0015 24 mem1 equ 15h
=0016 25 mem2 equ 16h
=0017 26 mem3 equ 17h
=0010 27 dispt equ 10h ;display buffer pointer , na memoria de dados
=000F 28 disbuf equ 0fh ;display buffer , na memoria de dados
=0020 29 micbuf equ 20h ;mimic buffer
=001B 30 esc equ 1bh ;ascii esc
=002E 31 point equ 2eh ;ascii "."
=0030 32 zero equ 30h ;ascii zero
=0020 33 space equ 20h ;ascii space
=002D 34 minus equ 2dh ;ascii "-"
35 ;
36 ;
37 ;
38 ; rotina add32
39 ; soma os 32 bits fornecidos no opx ao accx
40 ; resultado no accx
41 ;
804E C0 D0 42 add32: push psw
8050 C0 E0 43 push acc
8052 C3 44 clr c
8053 E5 10 45 mov a,acc0
8055 35 08 46 addc a,op0
8057 F5 10 47 mov acc0,a
8059 E5 11 48 mov a,acc1
805B 35 09 49 addc a,op1

```



```

805D F5 11      50      mov acc1,a
805F E5 12      51      mov a,acc2
8061 35 0A      52      addc a,op2
8063 F5 12      53      mov acc2,a
8065 E5 13      54      mov a,acc3
8067 35 0B      55      addc a,op3
8069 F5 13      56      mov acc3,a
806B D0 E0      57      pop acc
806D D0 D0      58      pop psw
806F 22         59      ret
                60      ;
                61      ;      rotina sub32
                62      ;      subtrai 32 bits fornecidos em opx do accx
                63      ;      resultado em accx
                64      ;
8070 C0 D0      65      sub32: push psw
8072 C0 E0      66      push acc
8074 C3         67      clr c
8075 E5 10      68      mov a,acc0
8077 95 08      69      subb a,op0
8079 F5 10      70      mov acc0,a
807B E5 11      71      mov a,acc1
807D 95 09      72      subb a,op1
807F F5 11      73      mov acc1,a
8081 E5 12      74      mov a,acc2
8083 95 0A      75      subb a,op2
8085 F5 12      76      mov acc2,a
8087 E5 13      77      mov a,acc3
8089 95 0B      78      subb a,op3
808B F5 13      79      mov acc3,a
808D D0 E0      80      pop acc
808F D0 D0      81      pop psw
8091 22         82      ret
                83      ;
                84      ;      mul32
                85      ;      multiplica os 32 bits de accx pelo valor 16 em op0,op1
                86      ;      resultado em accx
                87      ;
8092 C0 D0      88      mul32: push psw
8094 C0 E0      89      push acc
8096 C0 F0      90      push b
8098 75 D0" 00  91      mov psw,#0
809B 75 0F 00  92      mov tmp3,#0
809E 75 0E 00  93      mov tmp2,#0      ;apaga os 16 msb
                94      ;
                95      ;      gera os lsb do resultado
                96      ;
80A1 85 10 F0"  97      mov b,acc0
80A4 E5 08      98      mov a,op0      ;low order
80A6 A4         99      mul ab
80A7 F5 0C      100     mov tmp0,a      ;low order
80A9 85 F0" 0D  101     mov tmp1,b      ;high order
                102     ;

```

```

103 ;      gera o proximo msb
104 ;
80AC 85 11 F0"      105      mov b,acc1      ;high order
80AF E5 08          106      mov a,op0      ;low
80B1 A4             107      mul ab
80B2 25 0D          108      add a,tmp1      ;low result
80B4 F5 0D          109      mov tmp1,a
80B6 E5 F0          110      mov a,b      ;high
80B8 35 0E          111      addc a,tmp2     ;inclui carry
80BA F5 0E          112      mov tmp2,a
80BC 50 02'         113      jnc mulloop1
80BE 05 0F          114      inc tmp3      ;propaga carry
80C0               115      mulloop1:
80C0 85 10 F0"      116      mov b,acc0      ;low
80C3 E5 09          117      mov a,op1      ;high
80C5 A4             118      mul ab
80C6 25 0D          119      add a,tmp1      ;low result
80C8 F5 0D          120      mov tmp1,a
80CA E5 F0          121      mov a,b      ;high result
80CC 35 0E          122      addc a,tmp2     ;inclui carry
80CE F5 0E          123      mov tmp2,a
80D0 50 02'         124      jnc mulloop2
80D2 05 0F          125      inc tmp3      ;propaga
80D4               126      mulloop2:
127 ;
128 ;      calcula 3 byte
129 ;
80D4 85 12 F0"      130      mov b,acc2      ;high *op2 erro
80D7 E5 08          131      mov a,op0      ;low
80D9 A4             132      mul ab
80DA 25 0E          133      add a,tmp2      ;low result
80DC F5 0E          134      mov tmp2,a
80DE E5 F0          135      mov a,b      ;high result
80E0 35 0F          136      addc a,tmp3     ;inclui carry
80E2 F5 0F          137      mov tmp3,a
138 ;
139 ;      outra metade
140 ;
80E4 85 11 F0"      141      mov b,acc1
80E7 E5 09          142      mov a,op1
80E9 A4             143      mul ab
80EA 25 0E          144      add a,tmp2
80EC F5 0E          145      mov tmp2,a
80EE E5 F0          146      mov a,b
80F0 35 0F          147      addc a,tmp3
80F2 F5 0F          148      mov tmp3,a
149 ;
150 ;      termina msb
151 ;
80F4 85 13 F0"      152      mov b,acc3      ;high
80F7 E5 08          153      mov a,op0      ;low
80F9 A4             154      mul ab
80FA 25 0F          155      add a,tmp3

```

```

80FC F5 0F      156      mov tmp3,a
                157      ;
                158      ;      esqueca os resultados de ordem superior
                159      ;
80FE 85 12 F0"   160      mov b,acc2
8101 E5 09      161      mov a,op1
8103 A4         162      mul ab
8104 25 0F      163      add a,tmp3
8106 F5 0F      164      mov tmp3,a
                165      ;
                166      ;      restora resultado em acc
                167      ;
8108 85 0C 10   168      mov acc0,tmp0
810B 85 0D 11   169      mov acc1,tmp1
810E 85 0E 12   170      mov acc2,tmp2
8111 85 0F 13   171      mov acc3,tmp3
8114 D0 F0      172      pop b
8116 D0 E0      173      pop acc
8118 D0 D0      174      pop psw
811A 22         175      ret
                176      ;
                177      ;      div32
                178      ;      divide o 32 accx pelo 16 opx
                179      ;      resultado em accx
                180      ;      resto em opx
                181      ;
811B C0 D0      182      div32: push psw
811D C0 E0      183      push acc
811F C0 00      184      push 0
8121 C0 01      185      push 01
8123 C0 02      186      push 02
8125 C0 03      187      push 03
8127 C0 05      188      push 05
8129 C0 06      189      push 06
812B C0 07      190      push 07      ;salva
812D 75 D0" 00  191      mov psw,#0
8130 7F 00      192      mov r7,#0      ;zera resto parcial
8132 7E 00      193      mov r6,#0
8134 7D 00      194      mov r5,#0
8136 75 0C 00   195      mov tmp0,#0
8139 75 0D 00   196      mov tmp1,#0
813C 75 0E 00   197      mov tmp2,#0
813F 75 0F 00   198      mov tmp3,#0
8142 7A 00      199      mov r2,#0
8144 A9 09      200      mov r1,op1
8146 A8 08      201      mov r0,op0
8148 7B 20      202      mov r3,#32      ;loop count
814A           203      divloop:      ;inicio
814A 12 81A0'   204      call shiftD      ;desloca o dividendo e retorna msb no c
814D ED         205      mov a,r5      ;desloca c no lsb do resto parcial
814E 33         206      rlc a
814F FD         207      mov r5,a
8150 EE         208      mov a,r6      ;desloca c no lsb do resto parcial

```

```

8151 33      209      rlc a
8152 FE      210      mov r6,a
8153 EF      211      mov a,r7
8154 33      212      rlc a
8155 FF      213      mov r7,a
8156 C3      214      clr c          ;testa se r7r6r5>=r2r1r0
8157 EF      215      mov a,r7      ;subtrai r2 de r7 para ver se r2<r7
8158 9A      216      subb a,r2     ;a=r7-r2, set c se r7<r2
8159 40 1C'   217      jc cantsub   ;se nao, r7>r2 ou r7=r2
815B 70 0C'   218      jnz cansub   ;jump se r7>r2
815D C3      219      clr c          ;se r7=r2 , testa r6>=r1
815E EE      220      mov a,r6
815F 99      221      subb a,r1     ;a=r6-r1, carry se r6<r1
8160 40 15'   222      jc cantsub
8162 70 05'   223      jnz cansub   ;jump se r6>r1
8164 C3      224      clr c          ;se r6=r1 , testa r5>=r0
8165 ED      225      mov a,r5
8166 98      226      subb a,r0
8167 40 0E'   227      jc cantsub
8169 C3      228      cansub: clr c   ;subtrai o div do resto parcial
816A ED      229      mov a,r5      ;a=r5-r0
816B 98      230      subb a,r0
816C FD      231      mov r5,a
816D EE      232      mov a,r6
816E 99      233      subb a,r1     ;a=r6-r1
816F FE      234      mov r6,a
8170 EF      235      mov a,r7
8171 9A      236      subb a,r2     ;a=r7-r2-borrow
8172 FF      237      mov r7,a
8173 D3      238      setb c        ;desloca 1 no quociente
8174 02 8178' 239      jmp quot
8177      240      cantsub:
8177 C3      241      clr c          ;desloca 0 no quociente
8178 12 8186' 242      quot: call shiftq  ;desloca o carry no quociente
817B DB CD'   243      djnz r3,divloop ;testa finalizacao
817D 85 0C 10 244      mov acc0,tmp0 ;retorna valores ao accx
8180 85 0D 11 245      mov acc1,tmp1
8183 85 0E 12 246      mov acc2,tmp2
8186 85 0F 13 247      mov acc3,tmp3
8189 8D 08    248      mov op0,r5
818B 8E 09    249      mov op1,r6
818D D0 07    250      pop 07
818F D0 06    251      pop 06
8191 D0 05    252      pop 05
8193 D0 03    253      pop 03
8195 D0 02    254      pop 02
8197 D0 01    255      pop 01
8199 D0 00    256      pop 00
819B D0 E0    257      pop acc
819D D0 D0    258      pop psw
819F 22      259      ret
81A0 C3      260      shiftd: clr c   ;desloca o dividendo esquerda poe msb em c
81A1 E5 10    261      mov a,acc0

```

```

81A3 33          262      rlc a
81A4 F5 10      263      mov acc0,a
81A6 E5 11      264      mov a,acc1
81A8 33          265      rlc a
81A9 F5 11      266      mov acc1,a
81AB E5 12      267      mov a,acc2
81AD 33          268      rlc a
81AE F5 12      269      mov acc2,a
81B0 E5 13      270      mov a,acc3
81B2 33          271      rlc a
81B3 F5 13      272      mov acc3,a
81B5 22          273      ret
81B6 E5 0C      274      shiftq: mov a,tmp0      ;desloca o quociente e introduz c no lsb
81B8 33          275      rlc a
81B9 F5 0C      276      mov tmp0,a
81BB E5 0D      277      mov a,tmp1
81BD 33          278      rlc a
81BE F5 0D      279      mov tmp1,a
81C0 E5 0E      280      mov a,tmp2
81C2 33          281      rlc a
81C3 F5 0E      282      mov tmp2,a
81C5 E5 0F      283      mov a,tmp3
81C7 33          284      rlc a
81C8 F5 0F      285      mov tmp3,a
81CA 22          286      ret
                287      ;
                288      ;
                289      ;      div2
                290      ;      divide o accx de 32 bits por 2
                291      ;      resultado em accx
                292      ;
81CB C0 D0      293      div2:  push psw
81CD C0 E0      294      push acc
81CF C3          295      clr c
81D0 E5 13      296      mov a,acc3
81D2 A2 E7      297      mov c,acc.7
81D4 13          298      rrc a
81D5 F5 13      299      mov acc3,a
81D7 E5 12      300      mov a,acc2
81D9 13          301      rrc a
81DA F5 12      302      mov acc2,a
81DC E5 11      303      mov a,acc1
81DE 13          304      rrc a
81DF F5 11      305      mov acc1,a
81E1 E5 10      306      mov a,acc0
81E3 13          307      rrc a
81E4 F5 10      308      mov acc0,a
81E6 D0 E0      309      pop acc
81E8 D0 D0      310      pop psw
81EA 22          311      ret
                312      ;
                313      ;      rotina acczero
                314      ;      se accx contem zero, retorna carry set .

```

```

315 ;      se accx nao zero, retorna carry 0
316 ;
81EB C0 E0 317 acczero:      push acc
81ED C3      318          clr c
81EE E5 10   319          mov a,acc0
81F0 45 11   320          orl a,acc1
81F2 45 12   321          orl a,acc2
81F4 45 13   322          orl a,acc3
81F6 B4 00 01' 323          cjne a,#0,acczero1
81F9 D3      324          setb c
81FA D0 E0   325 acczero1:      pop acc
81FC 22      326          ret
327 ;
328 ;      rotina accneg
329 ;      se accx contem numero negativo ,retorna carry set
330 ;      se accx nao negativo , retorna carry 0
331 ;
81FD C0 E0   332 accneg:      push acc
81FF E5 13   333          mov a,acc3
8201 A2 E7   334          mov c,acc.7
8203 D0 E0   335          pop acc
8205 22      336          ret
337 ;
338 ;      rotina clracc
339 ;      apaga conteudo do accx
340 ;
8206 C0 E0   341 clracc:      push acc
8208 C0 D0   342          push psw
820A 74 00   343          mov a,#0
820C F5 10   344          mov acc0,a
820E F5 11   345          mov acc1,a
8210 F5 12   346          mov acc2,a
8212 F5 13   347          mov acc3,a
8214 D0 D0   348          pop psw
8216 D0 E0   349          pop acc
8218 22      350          ret
351 ;
352 ;      cplacc
353 ;      complemento de dois do accx
354 ;
8219 C0 E0   355 cplacc:      push acc
821B C0 D0   356          push psw
821D C3      357          clr c
821E E5 10   358          mov a,acc0
8220 F4      359          cpl a
8221 24 01   360          add a,#1
8223 F5 10   361          mov acc0,a
8225 E5 11   362          mov a,acc1
8227 F4      363          cpl a
8228 34 00   364          addc a,#0
822A F5 11   365          mov acc1,a
822C E5 12   366          mov a,acc2
822E F4      367          cpl a

```

```

822F 34 00      368      addc a,#0
8231 F5 12      369      mov acc2,a
8233 E5 13      370      mov a,acc3
8235 F4         371      cpl a
8236 34 00      372      addc a,#0
8238 F5 13      373      mov acc3,a
823A D0 D0      374      pop psw
823C D0 E0      375      pop acc
823E 22         376      ret
377 ;
378 ;
379 ;      binascii
380 ;      transforma o accx em um string ascci decimal correspondente
381 ;      Versao 2.0      aceita numeros negativos colocando sinal -
382 ;      em "a" posicao da virgula, da direita para esquerda
383 ;      utiliza-se do display buffer
384 ;
823F C0 D0      385 binascii:      push psw
8241 C0 00      386      push 00
8243 C0 01      387      push 01
8245 75 A0" 00  388      mov p2,#0
8248 F9         389      mov r1,a
8249 78 0F      390      mov r0,#disbuf ;poe esc no display buffer
824B 74 1B      391      mov a,#esc
824D F2         392      movx @r0,a
824E 18         393      dec r0
824F C2 D5      394      clr f0      ;flag indicativo de numero negativo
8251 12 81FD'   395      lcall accneg
8254 50 05'     396      jnc binascii1
8256 12 8219'   397      lcall cplacc
8259 D2 D5      398      setb f0
825B 12 81EB'   399 binascii1:      lcall acczero ;teste se accx=zero
825E 40 12'     400      jc binascii2
8260 74 0A      401      mov a,#10      ;divide accx pela base
8262 F5 08      402      mov op0,a
8264 E4         403      clr a
8265 F5 09      404      mov op1,a
8267 F5 0A      405      mov op2,a
8269 F5 0B      406      mov op3,a
826B 12 811B'   407      lcall div32
826E E5 08      408      mov a,op0      ;resto
8270 80 01'     409      sjmp binascii3
8272 E4         410 binascii2:      clr a
8273 24 30      411 binascii3:      add a,#zero
8275 F2         412      movx @r0,a
8276 18         413      dec r0
8277 19         414      dec r1
8278 B9 01 04'   415      cjne r1,#1,binascii4
827B 74 2E      416      mov a,#point
827D F2         417      movx @r0,a
827E 18         418      dec r0
827F B9 00 D9'   419 binascii4:      cjne r1,#0,binascii1
8282 12 81EB'   420 binascii5:      lcall acczero

```

```

8285 40 16'      421          jc binasci6
8287 74 0A      422          mov a,#10
8289 F5 08      423          mov op0,a
828B E4         424          clr a
828C F5 09      425          mov op1,a
828E F5 0A      426          mov op2,a
8290 F5 0B      427          mov op3,a
8292 12 811B'   428          lcall div32
8295 E5 08      429          mov a,op0      ;resto
8297 24 30      430          add a,#zero
8299 F2         431          movx @r0,a
829A 18         432          dec r0
829B 80 E5'     433          sjmp binasci5
829D 30 D5# 06' 434 binasci6:  jnb f0,binasci61
82A0 74 2D      435          mov a,#"- "
82A2 C2 D5      436          clr f0
82A4 80 02'     437          sjmp binasci62
82A6 74 20      438 binasci61:  mov a,#space
82A8 F2         439 binasci62:  movx @r0,a
82A9 D8 F2'     440          djnz r0,binasci6
82AB 80 03'     441          ;          movx a,@r0
82AD 74 4D      442          ;          cjne a,#"M",blink
82AF F2         443          ;          mov a,#space
82B0 90 0010    444          ;          sjmp blink1
82B3 E8         445          sjmp blink11
82B4 F0         446 blink:      mov a,#"M"
82B5 D0 01      447 blink1:    movx @r0,a
82B7 D0 00      448 blink11:   mov dptr,#dispt
82B9 D0 D0      449          mov a,r0
82BB 22         450          movx @dptr,a
82BD 00         451          pop 01
82BF 00         452          pop 00
82C1 00         453          pop psw
82C3 00         454          ret
82C5 00         455          ;
82C7 00         456          ;
82C9 00         457          ;      fim mathpack
82CB 00         458          ;
82CD 00         121         ;
82CF 00         122         include "fld7219c.asm"
82D1 00         1         ;
82D3 00         2         ;      rotina de controle de display LED
82D5 00         3         ;      utilizando ICL 7218C maxxim
82D7 00         4         ;      idem a versao fled7218 porem com 2 casas decimais
82D9 00         5         ;      Versao 2.1      placa mpo3101
82DB 00         6         ;      Versao 2.0      08/02/93      sequencia invertida
82DD 00         7         ;      Versao 1.1      12/12/92      dupla linha de leds
82DF 00         8         ;      Versao 1.0      14/08/92
82E1 00         9         ;      Mario Antonio Stefani
82E3 00        10         ;
82E5 00        11 displayled equ 07a00h ;digitos
82E7 00        12 leds      equ 07a01h ;leds de sinalizacao
82E9 00        13 leds1     equ 07a02h ;leds segundo conjunto

```



```

=1040      14  ledvalue      equ    01040h  ;contem valor dos bits de leds
=1041      15  ledvaluedig1 equ    01041h  ;contem primeiro digito
=1042      16  ledvaluedig2 equ    01042h  ;contem segundo digito
=1043      17  ledvaluedig3 equ    01043h  ;contem 3 digito
=1044      18  ledvaluedig4 equ    01044h  ; 4
=1045      19  ledvaluedig5 equ    01045h  ; 5
=1046      20  ledvaluedig6 equ    01046h  ; 6
=1047      21  ledvaluedig7 equ    01047h  ; 7
=1048      22  ledvaluedig8 equ    01048h  ; 8
=1049      23  ledvalue1    equ    01049h  ;leds de sinalizacao conjunto 1
24  ;
25  ;
26  ;      initled
27  ;      rotina de inicializacao
28  ;      supoe codigo B selecionado para ICL7228
29  ;
82BC C0 E0 30  initled:      push acc
82BE C0 F0 31                push b
82C0 C0 82 32                push dpl
82C2 C0 83 33                push dph
82C4 90 7A00 34              mov dptr,#displayled
82C7 74 08 35              mov a,#00001000b      ;liga display e pontos 1 2
82C9 F0 36                movx @dptr,a
82CA 74 18 37              mov a,#00011000b
82CC F0 38                movx @dptr,a
82CD 74 28 39              mov a,#00101000b      ;liga display e pontos 3 4
82CF F0 40                movx @dptr,a
82D0 74 38 41              mov a,#00111000b
82D2 F0 42                movx @dptr,a
82D3 74 48 43              mov a,#01001000b      ;liga display e pontos 5 6
82D5 F0 44                movx @dptr,a
82D6 74 58 45              mov a,#01011000b
82D8 F0 46                movx @dptr,a
82D9 74 68 47              mov a,#01101000b      ;liga display e pontos 7 8
82DB F0 48                movx @dptr,a
82DC 74 78 49              mov a,#01111000b
82DE F0 50                movx @dptr,a
82DF 90 7A01 51            mov dptr,#leds
82E2 74 FF 52              mov a,#11111111b      ;liga leds
82E4 F0 53                movx @dptr,a
82E5 90 1040 54            mov dptr,#ledvalue      ;armazena
82E8 F0 55                movx @dptr,a
82E9 75 F0" FA 56          mov b,#250
82EC 12 834B' 57  initledloop: lcall delayed      ;espera 500ms
82EF D5 F0" FA' 58          djnz b,initledloop
82F2 90 7A00 59          mov dptr,#displayled
82F5 74 80 60          mov a,#10000000b      ;prepara zero
82F7 F0 61          movx @dptr,a
82F8 90 1041 62          mov dptr,#ledvaluedig1
82FB F0 63          movx @dptr,a
82FC 90 7A00 64          mov dptr,#displayled
82FF 74 90 65          mov a,#10010000b      ;zero em dig 2
8301 F0 66          movx @dptr,a

```

```

8302 90 1042      67      mov dptr,#ledvaluedig2
8305 F0           68      movx @dptr,a
8306 90 7A00      69      mov dptr,#displayled
8309 74 20        70      mov a,#00100000b      ;zero e ponto dig3
830B F0           71      movx @dptr,a
830C 90 1043      72      mov dptr,#ledvaluedig3
830F F0           73      movx @dptr,a
8310 90 7A00      74      mov dptr,#displayled
8313 74 BF        75      mov a,#10111111b      ;zero frontal dig4
8315 F0           76      movx @dptr,a
8316 90 1044      77      mov dptr,#ledvaluedig4
8319 F0           78      movx @dptr,a
831A 90 7A00      79      mov dptr,#displayled
831D 74 CF        80      mov a,#11001111b      ;zero frontal em branco
831F F0           81      movx @dptr,a
8320 90 1045      82      mov dptr,#ledvaluedig5
8323 F0           83      movx @dptr,a
8324 90 7A00      84      mov dptr,#displayled
8327 74 DF        85      mov a,#11011111b
8329 F0           86      movx @dptr,a
832A 90 1046      87      mov dptr,#ledvaluedig6
832D F0           88      movx @dptr,a
832E 90 7A00      89      mov dptr,#displayled
8331 74 EF        90      mov a,#11101111b
8333 F0           91      movx @dptr,a
8334 90 1047      92      mov dptr,#ledvaluedig7
8337 F0           93      movx @dptr,a
8338 90 7A00      94      mov dptr,#displayled
833B 74 FF        95      mov a,#11111111b
833D F0           96      movx @dptr,a
833E 90 1048      97      mov dptr,#ledvaluedig8
8341 F0           98      movx @dptr,a
8342 D0 83        99      pop dph
8344 D0 82       100      pop dpl
8346 D0 F0       101      pop b
8348 D0 E0       102      pop acc
834A 22         103      ret
104 ;
105 ;      delayed
106 ;      espera 2 mseg
107 ;
834B C0 D0       108 delayed:  push psw
834D C0 E0       109      push acc
834F C0 F0       110      push b
8351 74 04       111      mov a,#4h
8353 75 F0" FF   112 delayed1:  mov b,#0ffh
8356 D5 F0" FD'   113 delayed2:  djnz b,delayled2
8359 D5 E0" F7'   114      djnz acc,delayled1
835C D0 F0       115      pop b
835E D0 E0       116      pop acc
8360 D0 D0       117      pop psw
8362 22         118      ret
119 ;

```

```

120 ; settled
121 ; acende os leds correpondentes e armazena
122 ; padrao fornecido no acc : 1 acende, 0 nao altera
123 ;
124 ;
8363 C0 82 125 settled: push dpl
8365 C0 83 126 push dph
8367 C0 F0 127 push b
8369 F5 F0 128 mov b,a
836B 90 1040 129 mov dptr,#ledvalue
836E E0 130 movx a,dptr
836F 45 F0 131 orl a,b
8371 F0 132 movx dptr,a
8372 90 7A01 133 mov dptr,#leds
8375 F0 134 movx dptr,a
8376 D0 F0 135 pop b
8378 D0 83 136 pop dph
837A D0 82 137 pop dpl
837C 22 138 ret
139 ;
140 ; settled1
141 ; acende os leds correpondentes e armazena
142 ; padrao fornecido no acc : 1 acende, 0 nao altera
143 ; conjunto 1
144 ;
837D C0 82 145 settled1: push dpl
837F C0 83 146 push dph
8381 C0 F0 147 push b
8383 F5 F0 148 mov b,a
8385 90 1049 149 mov dptr,#ledvalue1
8388 E0 150 movx a,dptr
8389 45 F0 151 orl a,b
838B F0 152 movx dptr,a
838C 90 7A02 153 mov dptr,#leds1
838F F0 154 movx dptr,a
8390 D0 F0 155 pop b
8392 D0 83 156 pop dph
8394 D0 82 157 pop dpl
8396 22 158 ret
159 ;
160 ; clrled
161 ; apaga os leds correspondentes e armazena
162 ; padrao fornecido no acc : 1 apaga , 0 nao altera
163 ;
8397 C0 82 164 clrled: push dpl
8399 C0 83 165 push dph
839B C0 F0 166 push b
839D F4 167 cpl a
839E F5 F0 168 mov b,a
83A0 90 1040 169 mov dptr,#ledvalue
83A3 E0 170 movx a,dptr
83A4 55 F0 171 anl a,b
83A6 F0 172 movx dptr,a

```

```

83A7 90 7A01      173      mov dptr,#leds
83AA F0           174      movx @dptr,a
83AB D0 F0        175      pop b
83AD D0 83        176      pop dph
83AF D0 82        177      pop dpl
83B1 22           178      ret
                  179      ;
                  180      ;      clrled1
                  181      ;      apaga os leds correspondentes e armazena
                  182      ;      padrao fornecido no acc : 1 apaga , 0 nao altera
                  183      ;      conjunto 1
83B2 C0 82        184      clrled1:  push dpl
83B4 C0 83        185      push dph
83B6 C0 F0        186      push b
83B8 F4           187      cpl a
83B9 F5 F0        188      mov b,a
83BB 90 1049       189      mov dptr,#ledvalue1
83BE E0           190      movx a,@dptr
83BF 55 F0        191      anl a,b
83C1 F0           192      movx @dptr,a
83C2 90 7A02       193      mov dptr,#leds1
83C5 F0           194      movx @dptr,a
83C6 D0 F0        195      pop b
83C8 D0 83        196      pop dph
83CA D0 82        197      pop dpl
83CC 22           198      ret
                  199      ;
                  200      ;      cplled
                  201      ;      complementa os leds correspondentes e armazena.
                  202      ;      padrao fornecido no acc : 1 cpl , 0 nao altera
                  203      ;
83CD C0 82        204      cplled:  push dpl
83CF C0 83        205      push dph
83D1 C0 F0        206      push b
83D3 F5 F0        207      mov b,a
83D5 90 1040       208      mov dptr,#ledvalue
83D8 E0           209      movx a,@dptr
83D9 65 F0        210      xrl a,b
83DB F0           211      movx @dptr,a
83DC 90 7A01       212      mov dptr,#leds
83DF F0           213      movx @dptr,a
83E0 D0 F0        214      pop b
83E2 D0 83        215      pop dph
83E4 D0 82        216      pop dpl
83E6 22           217      ret
                  218      ;
                  219      ;      cplled1
                  220      ;      complementa os leds correspondentes e armazena.
                  221      ;      padrao fornecido no acc : 1 cpl , 0 nao altera
                  222      ;
83E7 C0 82        223      cplled1:  push dpl
83E9 C0 83        224      push dph
83EB C0 F0        225      push b

```

```

83ED F5 F0      226      mov b,a
83EF 90 1049    227      mov dptr,#ledvalue1
83F2 E0        228      movx a,@dptr
83F3 65 F0      229      xrl a,b
83F5 F0        230      movx @dptr,a
83F6 90 7A02    231      mov dptr,#leds1
83F9 F0        232      movx @dptr,a
83FA D0 F0      233      pop b
83FC D0 83      234      pop dph
83FE D0 82      235      pop dpl
8400 22        236      ret
                237
                238 ;
                239 ;
                240 ;      binasciiled
                241 ;      transforma o accx em digitos destinados ao display led
                242 ;      supoe ponto decimal apos 2 casas
                243 ;      se numero negativo , complementa e poe sinal -
                244 ;
8401 C0 D0      245 binasciiled:  push psw
8403 C0 00      246      push 00
8405 C0 01      247      push 01
8407 C0 82      248      push dpl
8409 C0 83      249      push dph
840B C0 E0      250      push acc
840D C0 F0      251      push b
840F 85 10 14   252      mov mem0,acc0
8412 85 11 15   253      mov mem1,acc1
8415 85 12 16   254      mov mem2,acc2
8418 85 13 17   255      mov mem3,acc3
841B 78 08      256      mov r0,#8      ;numero de digitos no display
841D 79 03      257      mov r1,#3      ;0.0 contador de zeros significantes
841F 90 1041    258      mov dptr,#ledvaluedig1
8422 74 80      259      mov a,#10000000b
8424 F0        260      movx @dptr,a
8425 A3        261      inc dptr
8426 74 90      262      mov a,#10010000b
8428 F0        263      movx @dptr,a
8429 A3        264      inc dptr
842A 74 20      265      mov a,#00100000b
842C F0        266      movx @dptr,a
842D A3        267      inc dptr
842E 74 BF      268      mov a,#10111111b
8430 F0        269      movx @dptr,a
8431 A3        270      inc dptr
8432 74 CF      271      mov a,#11001111b
8434 F0        272      movx @dptr,a
8435 A3        273      inc dptr
8436 74 DF      274      mov a,#11011111b
8438 F0        275      movx @dptr,a
8439 A3        276      inc dptr
843A 74 EF      277      mov a,#11101111b
843C F0        278      movx @dptr,a

```

```

843D A3          279          inc dptr
843E 74 FF          280          mov a,#11111111b
8440 F0          281          movx @dptr,a
8441 90 1041        282          mov dptr,#ledvaluedig1
8444 C2 D5          283          clr f0          ;apaga flag sinal
8446 12 81FD'       284  binasciiled0:  lcall accneg
8449 50 05'         285          jnc binasciiled1
844B 12 8219'       286          lcall cplacc  ;se negativo complementa
844E D2 D5          287          setb f0      ;seta flag sinal
8450 12 81EB'       288  binasciiled1:  lcall acczero  ;teste se accx=zero
8453 40 11'         289          jc binasciiled2
8455 75 08 0A       290          mov op0,#10  ;divide accx pela base
8458 E4            291          clr a
8459 F5 09          292          mov op1,a
845B F5 0A          293          mov op2,a
845D F5 0B          294          mov op3,a
845F 12 811B'       295          lcall div32
8462 E5 08          296          mov a,op0      ;resto
8464 80 01'         297          sjmp binasciiled3
8466 E4            298  binasciiled2:  clr a
8467 54 0F          299  binasciiled3:  anl a,#0fh      ;somente nibble menos sig.
8469 F5 F0          300          mov b,a
846B E0            301          movx a,@dptr
846C 54 F0          302          anl a,#0f0h  ;somente nibble mais sig.
846E 45 F0          303          orl a,b      ;junta os nibbles
8470 F0            304          movx @dptr,a  ;armazena
8471 A3            305          inc dptr
8472 18            306          dec r0
8473 19            307          dec r1
8474 B9 00 D9'      308  binasciiled4:  cjne r1,#0,binasciiled1
8477 12 81EB'       309  binasciiled5:  lcall acczero
847A 40 20'         310          jc binasciiled6
847C 75 08 0A       311          mov op0,#10
847F E4            312          clr a
8480 F5 09          313          mov op1,a
8482 F5 0A          314          mov op2,a
8484 F5 0B          315          mov op3,a
8486 12 811B'       316          lcall div32
8489 E5 08          317          mov a,op0      ;resto
848B 54 0F          318          anl a,#0fh  ;somente nibble menos sig.
848D F5 F0          319          mov b,a      ;salva
848F E0            320          movx a,@dptr  ;
8490 54 F0          321          anl a,#0f0h  ;somente nibble mais sig
8492 45 F0          322          orl a,b      ;compo
8494 F0            323          movx @dptr,a
8495 A3            324          inc dptr
8496 18            325          dec r0
8497 E8            326          mov a,r0
8498 60 18'         327          jz binasciiled7
849A 80 DB'         328          sjmp binasciiled5
849C 30 D5# 06'     329  binasciiled6:  jnb f0,binasciiled61  ;se nao sinal continua
849F 74 0A          330          mov a,#0ah  ;codigo de sinal menos
84A1 C2 D5          331          clr f0

```

```

84A3 80 02'      332      sjmp binasciiled62
84A5 74 0F      333      binasciiled61: mov a,#0fh      ;codigo de digito apagado
84A7 F5 F0      334      binasciiled62: mov b,a
84A9 E0          335      movx a,@dptr
84AA 54 F0      336      anl a,#0f0h      ;somente nibble mais sig.
84AC 45 F0      337      orl a,b      ;compoes os nibbles
84AE F0          338      movx @dptr,a
84AF A3          339      inc dptr
84B0 D8 EA'      340      djnz r0,binasciiled6
84B2 90 1041     341      binasciiled7: mov dptr,#ledvaluedig1
84B5 E0          342      movx a,@dptr
84B6 90 7A00     343      mov dptr,#displayled
84B9 F0          344      movx @dptr,a
84BA 90 1042     345      mov dptr,#ledvaluedig2
84BD E0          346      movx a,@dptr
84BE 90 7A00     347      mov dptr,#displayled
84C1 F0          348      movx @dptr,a
84C2 90 1043     349      mov dptr,#ledvaluedig3
84C5 E0          350      movx a,@dptr
84C6 90 7A00     351      mov dptr,#displayled
84C9 F0          352      movx @dptr,a
84CA 90 1044     353      mov dptr,#ledvaluedig4
84CD E0          354      movx a,@dptr
84CE 90 7A00     355      mov dptr,#displayled
84D1 F0          356      movx @dptr,a
84D2 90 1045     357      mov dptr,#ledvaluedig5
84D5 E0          358      movx a,@dptr
84D6 90 7A00     359      mov dptr,#displayled
84D9 F0          360      movx @dptr,a
84DA 90 1046     361      mov dptr,#ledvaluedig6
84DD E0          362      movx a,@dptr
84DE 90 7A00     363      mov dptr,#displayled
84E1 F0          364      movx @dptr,a
84E2 90 1047     365      mov dptr,#ledvaluedig7
84E5 E0          366      movx a,@dptr
84E6 90 7A00     367      mov dptr,#displayled
84E9 F0          368      movx @dptr,a
84EA 90 1048     369      mov dptr,#ledvaluedig8
84ED E0          370      movx a,@dptr
84EE 90 7A00     371      mov dptr,#displayled
84F1 F0          372      movx @dptr,a
373      ;blinkled:      mov a,#0001000b
374      ;              lcall cplled
84F2 85 14 10     375      mov acc0,mem0
84F5 85 15 11     376      mov acc1,mem1
84F8 85 16 12     377      mov acc2,mem2
84FB 85 17 13     378      mov acc3,mem3
84FE D0 F0       379      pop b
8500 D0 E0       380      pop acc
8502 D0 83       381      pop dph
8504 D0 82       382      pop dpl
8506 D0 01       383      pop 01
8508 D0 00       384      pop 00

```

```

850A D0 D0      385          pop psw
850C 22          386          ret
                  387 ;
                  388 ;
                  389 ;
                  123 ;
                  124 include "fserial.asm"
                    1 ;
                    2 ;
                    3 ;      Progserial
                    4 ;      capta os jumps de configuracao da interface serial e programa
                    5 ;      o IM28C91 correspondentemente.
                    6 ;      placa mpo3101
                    7 ;      Mario Antonio Stefani
                    8 ;
                    9 ;      Versao 1.1      19/03/92      enderecos trocados a0a1a2
                   10 ;      Versao 1.0      30/10/91
                   11 ;
                   12 ;      1=aberto      0=fechado
                   13 ;
                   14 ;      f007      q7      q6      q5      q4      q3      q2 q1 q0
                   15 ;              e/o      eo/10   c/s pa  1/2 stb 7/8      baud
                   16 ;
                   17 ;      q7      seleciona paridade      1 odd/1
                   18 ;                      0 even/0
                   19 ;
                   20 ;      q6      seleciona tipo de paridade      1 1/0
                   21 ;                      0 odd/even
                   22 ;
                   23 ;      q5      presenca de paridade      1 sem paridade
                   24 ;                      0 com paridade
                   25 ;
                   26 ;      q4      stop bits      1 2sb
                   27 ;                      0 1sb
                   28 ;
                   29 ;      q3      numero de bits  1 8 bits
                   30 ;                      0 7 bits
                   31 ;
                   32 ;      q2q1q0 baud rate
                   33 ;          111      19200
                   34 ;          110      9600
                   35 ;          101      4800
                   36 ;          100      2400
                   37 ;          011      1200
                   38 ;          010      600
                   39 ;          001      300
                   40 ;          000      150
                   41 ;
                   42 ;
                   43 ;
                   44 ;
                   45 ;
=7E07           46 jserial      equ      07e07h ;endereco dos jumps de configuracao

```



```

=5000      47  moderegister equ 05000h ;MR1,MR2
=5001      48  clockselect equ 05001h ;CSR write only
=5001      49  statusregister equ 05001h ;SR read only
=5002      50  commandregister equ 05002h ;CR write only
=5003      51  receiver equ 05003h ;RHR read only
=5003      52  transmitter equ 05003h ;THR write only
=5004      53  auxctrlreg equ 05004h ;ACR write only
=5005      54  intstatusreg equ 05005h ;ISR read only
=5005      55  intmodereg equ 05005h ;IMR write only
           56  ;
850D C0 82  57  progserial: push dpl
850F C0 83  58                push dph
8511 C0 E0  59                push acc
8513 C0 F0  60                push b
8515 C0 D0  61                push psw
8517 90 5004 62                mov dptr,#auxctrlreg
851A 74 F8  63                mov a,#11111000b ;power on
851C 90 5002 64                mov dptr,#commandregister
851F 74 1A  65                mov a,#00011010b ;reset mr , disable r t
8521 F0  66                movx @dptr,a
8522 74 2A  67                mov a,#00101010b ;reset r
8524 F0  68                movx @dptr,a
8525 74 3A  69                mov a,#00111010b ;reset t
8527 F0  70                movx @dptr,a
8528 74 4A  71                mov a,#01001010b ;reset error flags
852A F0  72                movx @dptr,a
852B 74 5A  73                mov a,#01011010b ;reset break
852D F0  74                movx @dptr,a
852E 74 9A  75                mov a,#10011010b ;stop counter
8530 F0  76                movx @dptr,a
8531 74 BA  77                mov a,#10111010b ;clear RTS
8533 F0  78                movx @dptr,a
8534 74 CA  79                mov a,#11001010b ;reset mpi
8536 F0  80                movx @dptr,a
8537 90 5004 81                mov dptr,#auxctrlreg
853A 74 F8  82                mov a,#11111000b ;set 2, external, PD off ,RSTN
853C F0  83                movx @dptr,a
           84  ;                mov dptr,#jserial ;capta config. jumps
           85  ;                movx a,@dptr
853D 74 86  86                mov a,#10000110b ;odd,1sb,7,9600
853F F5 F0  87                mov b,a
8541 90 8549' 88                mov dptr,#tabelabaud
8544 54 07  89                anl a,#0111b
8546 93  90                movc a,@a+dptr
8547 80 08'  91                sjmp progserial2
8549 33  92  tabelabaud: db 00110011b ;000 150bps 0 fechado 1 aberto
854A 44  93                db 01000100b ;001 300bps
854B 55  94                db 01010101b ;010 600bps
854C 66  95                db 01100110b ;011 1200bps
854D 88  96                db 10001000b ;100 2400bps
854E 99  97                db 10011001b ;101 4800bps
854F BB  98                db 10111011b ;110 9600bps
8550 CC  99                db 11001100b ;111 19200bps

```

```

8551 90 5001      100  progserial2:  mov dptr,#clockselect
8554 F0          101                movx @dptr,a
8555 74 1A        102                mov a,#00011010b      ;reset pointer
8557 90 5002      103                mov dptr,#commandregister
855A F0          104                movx @dptr,a
855B 90 5000      105                mov dptr,#moderegister
855E 74 C2        106                mov a,#11000010b      ;mr1
8560 A2 F3        107                mov c,b.3
8562 92 E0        108                mov acc.0,c           ;bits/char 0=7,1=8
8564 A2 F5        109                mov c,b.5
8566 92 E4        110                mov acc.4,c           ;0=com par. 1=sem par
8568 A2 F6        111                mov c,b.6
856A 92 E3        112                mov acc.3,c           ;0=o/e 1=forcado
856C A2 F7        113                mov c,b.7
856E 92 E2        114                mov acc.2,c           ;0=even,0 1=odd,1
8570 F0          115                movx @dptr,a
8571 74 17        116                mov a,#00010111b      ;mr2
8573 A2 F3        117                mov c,b.3
8575 92 E3        118                mov acc.3,c           ;0=1 stop bit ,1=2 stop bits
8577 F0          119                movx @dptr,a
8578 D0 D0        120                pop psw
857A D0 F0        121                pop b
857C D0 E0        122                pop acc
857E D0 83        123                pop dph
8580 D0 82        124                pop dpl
8582 22          125                ret
126 ;
127 ;
128 ;      PrepRec
129 ;      Inicializa Receiver buffer
130 ;
131 ;      A pilha esta vazia quando rechead=rectail
132 ;      A pilha esta cheia quando rechead+1=rectail
133 ;
      =0026      134  rechead      equ      26h           ;pointer receiver head
      =0027      135  rectail     equ      27h           ;pointer receiver tail
      =0050      136  recbufbot   equ      50h           ;inicio do rec. buf. na mem. dados
      =0074      137  recbuftop   equ      74h           ;fim do rec. buf. na mem. dados
      =000D      138  CR          equ      0dh           ;char CR
      =000A      139  LF          equ      0ah           ;char LF
140 ;
8583 C0 00        141  preprec:    push 00h
8585 C0 E0        142                push acc
8587 75 26 74      143                mov rechead,#recbuftop
858A 75 27 74      144                mov rectail,#recbuftop
858D 74 0D        145                mov a,#CR
858F A8 26        146                mov r0,rechead
8591 F2          147                movx @r0,a
8592 D0 E0        148                pop acc
8594 D0 00        149                pop 00h
8596 22          150                ret
151 ;
152 ;      Poetrans

```

```

153 ; Versao 2.0 16/02/91 ;alteracao para rede CAN
154 ; ;aumento da tamanho do buffer
155 ;
=0028 156 transhead equ 28h ;pointer trans. head
=0029 157 transtail equ 29h ;pointer trans. tail
=0075 158 transbufbot equ 75h ;inicio do trans. buf. na mem. dados
=00EF 159 transbuftop equ 0efh ;fim do trans buf na mem dados
160 ;
161 ;
8597 C0 00 162 preptrans: push 00h
8599 C0 E0 163 push acc
859B 75 28 EF 164 mov transhead,#transbuftop
859E 75 29 EF 165 mov transtail,#transbuftop
85A1 74 0D 166 mov a,#CR
85A3 A8 28 167 mov r0,transhead
85A5 F2 168 movx @r0,a
85A6 D0 E0 169 pop acc
85A8 D0 00 170 pop 00h
85AA 22 171 ret
172 ;
173 ;
174 ; Iomasterled
175 ; Versao 1.0 16/03/92
176 ;
177 ;
85AB C0 D0 178 iomasterled: push psw
85AD C0 E0 179 push acc
85AF C0 F0 180 push b
85B1 C0 00 181 push 00h
85B3 C0 82 182 push dpl
85B5 C0 83 183 push dph
85B7 C3 184 clr c
85B8 E5 28 185 mov a,transhead
85BA 95 29 186 subb a,transtail
85BC 60 17' 187 jz iomasterled3 ;buffer trans. vazio
85BE 90 5001 188 mov dptr,#statusregister
85C1 E0 189 movx a,@dptr
85C2 30 E2# 10' 190 jnb acc.2,iomasterled3 ;verifica uart livre
85C5 E5 29 191 mov a,transtail
85C7 04 192 inc a
85C8 B4 F0 02' 193 cjne a,#transbuftop+1,iomasterled2
85CB 74 75 194 mov a,#transbufbot ;verif. lim do trans. buffer
85CD F8 195 iomasterled2: mov r0,a
85CE F5 29 196 mov transtail,a
85D0 E2 197 movx a,@r0
85D1 90 5003 198 mov dptr,#transmitter
85D4 F0 199 movx @dptr,a
85D5 90 5001 200 iomasterled3: mov dptr,#statusregister ;verif se existe dado na uart
85D8 E0 201 movx a,@dptr
85D9 F5 F0 202 mov b,a
85DB 30 E0# 16' 203 jnb acc.0,iomasterled6 ;receiver empty?
85DE E5 26 204 mov a,rethead
85E0 04 205 inc a

```

```

85E1 B4 75 02'      206          cjne a,#recbuftop+1,iomasterled4
85E4 74 50          207          mov a,#recbufbot
85E6 B5 27 02'      208 iomasterled4: cjne a,rectail,iomasterled5
85E9 80 09'         209          sjmp iomasterled6          ;receiver buffer full
85EB F8            210 iomasterled5: mov r0,a
85EC F5 26         211          mov rethead,a
85EE 90 5003       212          mov dptr,#receiver
85F1 E0            213          movx a,@dptr
85F2 00            214          nop
85F3 F2            215          movx @r0,a
85F4 E5 F0         216 iomasterled6: mov a,b
85F6 30 E6# 02'     217          jnb acc.6,iomasterled61
85F9 D2 75         218          setb flagerroruart
85FB 30 E5# 02'     219 iomasterled61: jnb acc.5,iomasterled62
85FE D2 75         220          setb flagerroruart
8600 30 E4# 02'     221 iomasterled62: jnb acc.4,iomasterledsai
8603 D2 75         222          setb flagerroruart
8605 D0 83         223 iomasterledsai: pop dph          ;se livre retorna
8607 D0 82         224          pop dpl
8609 D0 00         225          pop 00h
860B D0 F0         226          pop b
860D D0 E0         227          pop acc
860F D0 D0         228          pop psw
8611 22            229          ret
230 ;
231 ;
232 ;      Poetrans
233 ;      poe char fornecido no acc no transmitter buffer
234 ;      se cheio seta flag de mensagem de erro
235 ;
8612 C0 F0         236 poetrans:  push b
8614 C0 D0         237          push psw
8616 C0 00         238          push 00
8618 C2 79         239          clr flagtransbufful
861A F5 F0         240          mov b,a
861C E5 28         241          mov a,transhead
861E 04            242          inc a
861F B4 F0 02'     243          cjne a,#transbuftop+1,poetrans1
8622 74 75         244          mov a,#transbufbot
8624 B5 29 02'     245 poetrans1:  cjne a,transtail,poetrans2
8627 D2 79         246          setb flagtransbufful
8629 F5 28         247 poetrans2:  mov transhead,a
862B F8            248          mov r0,a
862C E5 F0         249          mov a,b
862E F2            250          movx @r0,a
862F D0 00         251          pop 00
8631 D0 D0         252          pop psw
8633 D0 F0         253          pop b
8635 22            254          ret
255 ;
256 ;      Poestringserial
257 ;      coloca o string apontado por dptr na memoria de dados no
258 ;      transmitter buffer. o car ESC (1bh) determina fim

```

```

259 ;      versao 1.0 8/11 91      despreza SPC, substitui ESC por CR
260 ;
8636 C0 D0      261 poestringserial:      push psw
8638 C0 E0      262                  push acc
863A E0          263 poestringserial1:      movx a,@dptr
863B B4 1B 11'   264                  cjne a,#1bh,poestringserial2
863E 74 0D      265                  mov a,#CR
8640 12 8612'   266                  lcall poetrans
8643 74 0A      267                  mov a,#LF
8645 12 8612'   268                  lcall poetrans
8648 C2 78      269                  clr flagonce
864A D0 E0      270                  pop acc
864C D0 D0      271                  pop psw
864E 22         272                  ret
864F B4 20 03'  273 poestringserial2:      cjne a,#space,poestringserial3
8652 A3         274                  inc dptr
8653 80 E5'     275                  sjmp poestringserial1
8655 12 8612'   276 poestringserial3:      lcall poetrans
8658 A3         277                  inc dptr
8659 80 DF'     278                  sjmp poestringserial1
279 ;
280 ;
281 ;      Poestringserialc
282 ;      coloca o string apontado por dptr na memoria de programa no
283 ;      transmitir buffer. o car ESC (1bh) determina fim
284 ;      versao 1.0      16/03/92
285 ;      despreza SPC, substitui ESC por CR
286 ;
865B C0 D0      287 poestringserialc:      push psw
865D C0 E0      288                  push acc
865F E4         289 poestringserialc1:      clr a
8660 93         290                  movc a,@a+dptr
8661 B4 1B 0F'  291                  cjne a,#1bh,poestringserialc2
8664 74 0D      292                  mov a,#CR
8666 12 8612'   293                  lcall poetrans
8669 74 0A      294                  mov a,#LF
866B 12 8612'   295                  lcall poetrans
866E D0 E0      296                  pop acc
8670 D0 D0      297                  pop psw
8672 22         298                  ret
8673 B4 20 03'  299 poestringserialc2:      cjne a,#space,poestringserialc3
8676 A3         300                  inc dptr
8677 80 E6'     301                  sjmp poestringserialc1
8679 12 8612'   302 poestringserialc3:      lcall poetrans
867C A3         303                  inc dptr
867D 80 E0'     304                  sjmp poestringserialc1
305 ;
306 ;
307 ;
308 ;
309 ;      Retrec
310 ;      Retira do receiver buffer o caracter e o poe no acc
311 ;

```

```

867F C0 D0      312  retrec:      push psw
8681 C0 00      313                push 00
8683 E5 27      314                mov a,rectail
8685 B5 26 04'   315                cjne a,rechead,retrec1 ;teste se buf vazio
8688 74 1B      316                mov a,#esc           ; neste caso retorna escape
868A 80 0A'     317                sjmp retrec3
868C 04         318  retrec1:      inc a
868D B4 75 02'   319                cjne a,#recbuftop+1,retrec2
8690 74 50      320                mov a,#recbufbot
8692 F8         321  retrec2:      mov r0,a
8693 F5 27      322                mov rectail,a
8695 E2         323                movx a,@r0
8696 D0 00      324  retrec3:      pop 00h
8698 D0 D0      325                pop psw
869A 22         326                ret
327 ;
125 ;
126 include "fcomm.asm"
1 ;
2 ;
3 ;      Command interpreter
4 ;      versao medidor de distancia md50 placa 3101
5 ;      Versao 1.0      12/12/93
6 ;      Mario A. Stefani
7 ;
8 ;      Esta rotina consiste no interpretador de comandos que o
9 ;      medidor pode receber via canal serial e via canal CAN
10 ;      Procurou-se manter certa compatibilidade com o padrao de certos
11 ;      instrumentos industriais , notadamente os Mitutoyo.
12 ;
869B C0 E0      13  command:      push acc
14 ;                call retrec
869D B4 1B 03'   15                cjne a,#esc,com0           ;ESC exit
86A0 02 8768'    16                ljmp comsai
86A3 B4 0D 03'   17  com0:         cjne a,#CR,com1
86A6 02 8768'    18                ljmp comsai           ;CR exit
86A9 B4 43 05'   19  com1:         cjne a,#"C",com2
86AC D2 76       20                setb flagcontinuous ;continuous output
86AE 02 8768'    21                ljmp comsai
86B1 B4 42 05'   22  com2:         cjne a,#"B",com3
86B4 C2 76       23                clr flagcontinuous ;stop continuous output
86B6 02 8768'    24                ljmp comsai
86B9 B4 4D 05'   25  com3:         cjne a,#"M",com4
86BC D2 78       26                setb flagonce       ;request measure
86BE 02 8768'    27                ljmp comsai
86C1 B4 52 05'   28  com4:         cjne a,#"R",com5
86C4 C2 AF       29                clr ea
86C6 02 0000     30                ljmp 0                ;cold reset
86C9 B4 30 05'   31  com5:         cjne a,#"0",com6           ;set mean by jumps
86CC C2 71       32                clr flagmean
86CE 02 8768'    33                ljmp comsai
86D1 B4 31 0B'   34  com6:         cjne a,#"1",com7           ;set mean by serial command
86D4 D2 71       35                setb flagmean

```

```

86D6 90 1010      36      mov dptr,#numberformean
86D9 74 00         37      mov a,#0
86DB F0           38      movx @dptr,a
86DC 02 8768'     39      ljmp comsai
86DF B4 32 0B'    40      com7:  cjne a,#"2",com8
86E2 D2 71        41      setb flagmean
86E4 90 1010      42      mov dptr,#numberformean
86E7 74 01        43      mov a,#1
86E9 F0           44      movx @dptr,a
86EA 02 8768'     45      ljmp comsai
86ED B4 33 0B'    46      com8:  cjne a,#"3",com9
86F0 D2 71        47      setb flagmean
86F2 90 1010      48      mov dptr,#numberformean
86F5 74 02        49      mov a,#2
86F7 F0           50      movx @dptr,a
86F8 02 8768'     51      ljmp comsai
86FB B4 34 0B'    52      com9:  cjne a,#"4",com10
86FE D2 71        53      setb flagmean
8700 90 1010      54      mov dptr,#numberformean
8703 74 03        55      mov a,#3
8705 F0           56      movx @dptr,a
8706 02 8768'     57      ljmp comsai
8709 B4 35 0B'    58      com10: cjne a,#"5",com11
870C D2 71        59      setb flagmean
870E 90 1010      60      mov dptr,#numberformean
8711 74 04        61      mov a,#4
8713 F0           62      movx @dptr,a
8714 02 8768'     63      ljmp comsai
8717 B4 36 0B'    64      com11: cjne a,#"6",com12
871A D2 71        65      setb flagmean
871C 90 1010      66      mov dptr,#numberformean
871F 74 05        67      mov a,#5
8721 F0           68      movx @dptr,a
8722 02 8768'     69      ljmp comsai
8725 B4 37 0B'    70      com12: cjne a,#"7",com13
8728 D2 71        71      setb flagmean
872A 90 1010      72      mov dptr,#numberformean
872D 74 06        73      mov a,#6
872F F0           74      movx @dptr,a
8730 02 8768'     75      ljmp comsai
8733 B4 38 0B'    76      com13: cjne a,#"8",com20
8736 D2 71        77      setb flagmean
8738 90 1010      78      mov dptr,#numberformean
873B 74 07        79      mov a,#7
873D F0           80      movx @dptr,a
873E 02 8768'     81      ljmp comsai
8741 B4 4B 0B'    82      com20: cjne a,#"K",com21      ;modo calibracao
8744 D2 6C        83      setb flagcalibra
8746 90 9476'     84      mov dptr,#mens004
8749 12 865B'     85      lcall poestringserialc
874C 02 8768'     86      ljmp comsai
874F B4 4C 11'    87      com21: cjne a,#"L",com28      ;modo medicao
8752 C2 6C        88      clr flagcalibra

```

```

8754 90 9487'      89          mov dptr,#mens005
8757 12 865B'      90          lcall poestringserialc
875A 02 8768'      91          ljmp comsai
875D B4 48 03'     92 com27:      cjne a,#"H",com28
8760 30 6C 00'     93          jnb flagcalibra,com28
8763 D2 77         94 com28:      setb flagerrorcom          ;comando nao reconhecido
8765 12 8612'     95          lcall poetrans
8768 D0 E0         96 comsai:      pop acc
876A 22           97          ret
                    98 ;
                    99 ;
127              127 ;
128      include "fkeymd.asm"
                    1 ;
                    2 ;
                    3 ;      Rotina varredoras de teclado
                    4 ;      placa mpo3101
                    5 ;      placa display+chaves+tumblewhell dis31011
                    6 ;      versao medidor de borda
                    7 ;      Mario Antonio Stefani   Optoeletronica S/A
                    8 ;
                    9 ;      catakey
10          ;      Versao 1.0      12/12/93
11          ;      Verifica o estado das chaves painel dis31011 e seta os flags
12          ;      correspondentes
13          ;
14          ;
=7C07           15 jnkey      equ      07c07h ;endereco chaves
8768 C0 83       16 catakey:    push dph
876D C0 82       17          push dpl
876F C0 E0       18          push acc
8771 C0 D0       19          push psw
8773 90 7C07     20 catakey0:    mov dptr,#jnkey
8776 E0         21          movx a,@dptr
8777 F4         22          cpl a
8778 54 1F       23          anl a,#011111b
877A 30 E0# 00'  24          jnb acc.0,catakey1
877D 30 E1# 00'  25 catakey1:    jnb acc.1,catakey2
8780 30 E2# 00'  26 catakey2:    jnb acc.2,catakey3
8783 30 E3# 00'  27 catakey3:    jnb acc.3,catakey4
8786 30 E4# 00'  28 catakey4:    jnb acc.4,catakey5
8789 D0 D0       29 catakey5:    pop psw
878B D0 E0       30          pop acc
878D D0 82       31          pop dpl
878F D0 83       32          pop dph
8791 22         33          ret
                    34 ;
                    35 ;
129              129 ;
130      include "fmdtum.asm"
                    1 ;
                    2 ;      Rotinas de captacao da configuracao dos tumble whell
                    3 ;      Mario Antonio Stefani

```



```

4 ; Versao 1.0 19/09/93
5 ;
=7C06 6 tumblemedia equ 07c06h ; msb rede , lsb media
=7C05 7 tumbledistm equ 07c05h ; digitos msb dist entre cabecas
=7C04 8 tumbledistl equ 07c04h ; lsb dist entre cabecas
=7C03 9 tumblelisum equ 07c03h
=7C02 10 tumblelisul equ 07c02h
=7C01 11 tumblelinfm equ 07c01h
=7C00 12 tumblelinfl equ 07c00h
=1050 13 distcabl equ 1050h ;contem distancia entre cabecas l
=1051 14 distcabh equ 1051h ;
=1052 15 limitsupl equ 1052h ;contem valor limite sup.
=1053 16 limitsuph equ 1053h
=1054 17 limitinfl equ 1054h ;contem valor limite inf.
=1055 18 limitinfh equ 1055h
=1010 19 numberformean equ 1010h ;contem numero de medias
20 ;
21 ;
22 ; catamedia
23 ; capta o numero de medias setados no tumble media
24 ; veja tabelajmedia no arquivo fconst correspondente
25 ;
8792 C0 83 26 catamedia: push dph
8794 C0 82 27 push dpl
8796 C0 F0 28 push b
8798 C0 E0 29 push acc
879A C0 D0 30 push psw
879C 30 71 06' 31 jnb flagmean,catamedia0
879F 90 1010 32 mov dptr,#numberformean
87A2 E0 33 movx a,@dptr
87A3 80 05' 34 sjmp catamedia1
87A5 90 7C06 35 catamedia0: mov dptr,#tumblemedia
87A8 E0 36 movx a,@dptr
87A9 F4 37 cpl a
87AA 54 0F 38 catamedia1: anl a,#01111b
87AC 23 39 rl a
87AD F5 F0 40 mov b,a
87AF 90 803A' 41 mov dptr,#tabelajmedia
87B2 93 42 movc a,@a+dptr
87B3 F5 32 43 mov nsetmean,a ;numero para media
87B5 E5 F0 44 mov a,b
87B7 A3 45 inc dptr
87B8 93 46 movc a,@a+dptr
87B9 F5 31 47 mov nsetcap,a ;numero de captacoes
87BB D0 D0 48 pop psw
87BD D0 E0 49 pop acc
87BF D0 F0 50 pop b
87C1 D0 82 51 pop dpl
87C3 D0 83 52 pop dph
87C5 22 53 ret
54 ;
55 ;
56 ;

```

```

57 ;
131 ;
132 include "flser20d.asm"
1 ;
2 ; Controlalaser/metodo 3
3 ; efetua a atualizacao do D/A de controle potencia laser
4 ; Placa EPA0200
5 ; Versao 2.0 dac1230 0=potmin FFFF=potmax
6 ;
7 ; Esta rotina faz o controle de potencia do laser. Trata-se de uma
8 ; rotina PI , proporcional-integrativo.
9 ;
10 ; Flags definidos no programa principal
11 ;
=7000 12 powerpoint equ 07000h
=700C 13 trigerda equ 0700Ch ;disparo dos d/as
87C6 C0 D0 14 controlalaser: push psw
87C8 C0 E0 15 push acc
87CA C0 F0 16 push b
87CC C0 83 17 push dph
87CE C0 82 18 push dpl
87D0 E4 19 clr a
87D1 B5 2A 05' 20 cjne a,laserpowerc,controlasai0
87D4 30 72 51' 21 jnb flagneg,controlaneg0c0
87D7 80 03' 22 sjmp controlaposi0c0
87D9 02 8892' 23 controlasai0: ljmp controlasai
87DC C3 24 controlaposi0c0: clr c
87DD E5 34 25 mov a,powerdifl
87DF 94 05 26 subb a,#5
87E1 E5 35 27 mov a,powerdifh
87E3 94 00 28 subb a,#0
87E5 50 05' 29 jnc controlaposi1c0
87E7 75 F0" 00 30 mov b,#0 ; nao decrementa potencia
87EA 80 23' 31 sjmp controlaposi4c0
87EC C3 32 controlaposi1c0: clr c
87ED E5 34 33 mov a,powerdifl
87EF 94 0A 34 subb a,#10
87F1 E5 35 35 mov a,powerdifh
87F3 94 00 36 subb a,#0
87F5 50 05' 37 jnc controlaposi2c0
87F7 75 F0" 10 38 mov b,#010h
87FA 80 13' 39 sjmp controlaposi4c0
87FC C3 40 controlaposi2c0: clr c
87FD E5 34 41 mov a,powerdifl
87FF 94 14 42 subb a,#020
8801 E5 35 43 mov a,powerdifh
8803 94 00 44 subb a,#0
8805 50 05' 45 jnc controlaposi3c0
8807 75 F0" 80 46 mov b,#080h
880A 80 03' 47 sjmp controlaposi4c0
880C 75 F0" FF 48 controlaposi3c0: mov b,#0FFh
880F C3 49 controlaposi4c0: clr c
8810 90 1001 50 mov dptr,#laserpower

```

```

8813 E0          51          movx a,adptr
8814 95 F0        52          subb a,b
8816 F0          53          movx adptr,a
8817 A3          54          inc dptr
8818 E0          55          movx a,adptr
8819 94 00        56          subb a,#0
881B F0          57          movx adptr,a
881C 50 08'       58          jnc controlaposi5c0
881E 74 00        59          mov a,#0h
8820 90 1001      60          mov dptr,#laserpower
8823 F0          61          movx adptr,a
8824 A3          62          inc dptr
8825 F0          63          movx adptr,a
8826 80 50'       64          controlaposi5c0: sjmp controlapowerc0
8828 C3          65          controlaneg0c0:  clr c                ;largura medida menor que a setada
8829 74 FA        66          mov a,#0fah                ;necessario aumentar potencia
882B 95 34        67          subb a,powerdifl            ;powerpoint=ff min laser
882D 74 FF        68          mov a,#0ffh                ; ff=0V
882F 95 35        69          subb a,powerdifh
8831 50 05'       70          jnc controlaneg1c0
8833 75 F0'' 00   71          mov b,#00
8836 80 23'       72          sjmp controlaneg4c0
8838 C3          73          controlaneg1c0:  clr c
8839 74 F6        74          mov a,#0f6h
883B 95 34        75          subb a,powerdifl
883D 74 FF        76          mov a,#0ffh
883F 95 35        77          subb a,powerdifh
8841 50 05'       78          jnc controlaneg2c0
8843 75 F0'' 10   79          mov b,#10h                ;aumenta potencia de 1
8846 80 13'       80          sjmp controlaneg4c0
8848 C3          81          controlaneg2c0:  clr c
8849 74 EB        82          mov a,#0ebh
884B 95 34        83          subb a,powerdifl
884D 74 FF        84          mov a,#0ffh
884F 95 35        85          subb a,powerdifh
8851 50 05'       86          jnc controlaneg3c0
8853 75 F0'' 80   87          mov b,#080h
8856 80 03'       88          sjmp controlaneg4c0
8858 75 F0'' FF   89          controlaneg3c0:  mov b,#0FFh
885B C3          90          controlaneg4c0:  clr c
885C 90 1001      91          mov dptr,#laserpower
885F E0          92          movx a,adptr
8860 25 F0        93          add a,b
8862 F0          94          movx adptr,a
8863 A3          95          inc dptr
8864 E0          96          movx a,adptr
8865 34 00        97          addc a,#0
8867 F0          98          movx adptr,a
8868 C2 62        99          clr flagsat
886A 50 0C'      100         jnc controlaneg5c0
886C 90 1001     101         mov dptr,#laserpower
886F 74 F0      102         mov a,#0f0h
8871 F0      103         movx adptr,a

```

```

8872 A3          104          inc dptr
8873 74 FF        105          mov a,#0ffh
8875 F0          106          movx @dptr,a
8876 D2 62        107          setb flagsat
8878            108  controlaneg5c0:
8878 90 1002        109  controlapowerc0: mov dptr,#laserpower+1
887B E0          110          movx a,@dptr
887C 90 7001       111          mov dptr,#powerpoint+1
887F F0          112          movx @dptr,a
8880 90 1001       113          mov dptr,#laserpower
8883 E0          114          movx a,@dptr
8884 90 7000       115          mov dptr,#powerpoint
8887 F0          116          movx @dptr,a
8888 90 8038'     117          mov dptr,#lasertau
888B E0          118          movx a,@dptr
888C F5 2A        119          mov laserpowerc,a
            120          ;
888E 90 700C       121  controlatriger mov dptr,#trigerda
8891 F0          122          movx @dptr,a          ;dispara os canais simultaneamente
            123          ;
8892 D0 82        124  controlasai:  pop dpl
8894 D0 83        125          pop dph
8896 D0 F0        126          pop b
8898 D0 E0        127          pop acc
889A D0 D0        128          pop psw
889C 22          129          ret
            130          ;
            131          ;
            133          ;
            134  include "fequamd.asm"
            1          ;
            2          ;
            3          ;          Equacao Medidor de distancia md50
            4          ;          Placa mpo3111
            5          ;          Versao 1.0      23/03/94      constantes em posicoes
            6          ;          Mario Antonio Stefani
            7          ;
            8          ;          Esta rotina corresponde ao calculo via equacao teorica, da distancia
            9          ;          desejada , atraves do fornecimento do numero magico x , posicao
           10          ;          da imagem no sensor CCD.
           11          ;          A equacao tem a seguinte forma:
           12          ;
           13          ;          
$$M(x)=a\{(x-off)/(b-x+off)\}+moff$$

           14          ;
           15          ;          Toda a aritmetica e feita em ponto fixo , sendo a unidade resultante
           16          ;          a 0.01mm
           17          ;
=7E02          18  chavecal      equ      07e02h          ;bit 0 contem chave de calibracao
           19          ;          constantes de calibracao      cabeca0
           20          ;          vide arquivo fconst2.asm
           21          ;          memoria utilizadas
           22          ;          cabeca0
=1020          23  xmed0c0      equ      1020h          ;lsb

```

```

=1021      24  xmed1c0  equ    1021h
=1022      25  xmed2c0  equ    1022h
=1023      26  xmed3c0  equ    1023h      ;msb
=1024      27  xmo0c0  equ    1024h      ;lsb
=1025      28  xmo1c0  equ    1025h      ;
=1026      29  xmo2c0  equ    1026h
=1027      30  xmo3c0  equ    1027h      ;msb
=1028      31  bmx0c0  equ    1028h      ;lsb
=1029      32  bmx1c0  equ    1029h
=102A      33  bmx2c0  equ    102ah
=102B      34  bmx3c0  equ    102bh      ;msb
=102C      35  avx0c0  equ    102ch      ;lsb
=102D      36  avx1c0  equ    102dh      ;
=102E      37  avx2c0  equ    102eh
=102F      38  avx3c0  equ    102fh      ;msb
           39  ;      cabeca1
=1030      40  xmed0c1  equ    1030h      ;lsb
=1031      41  xmed1c1  equ    1031h
=1032      42  xmed2c1  equ    1032h
=1033      43  xmed3c1  equ    1033h      ;msb
=1034      44  xmo0c1  equ    1034h      ;lsb
=1035      45  xmo1c1  equ    1035h      ;
=1036      46  xmo2c1  equ    1036h
=1037      47  xmo3c1  equ    1037h      ;msb
=1038      48  bmx0c1  equ    1038h      ;lsb
=1039      49  bmx1c1  equ    1039h
=103A      50  bmx2c1  equ    103ah
=103B      51  bmx3c1  equ    103bh      ;msb
=103C      52  avx0c1  equ    103ch      ;lsb
=103D      53  avx1c1  equ    103dh      ;
=103E      54  avx2c1  equ    103eh
=103F      55  avx3c1  equ    103fh      ;msb
           56  ;
           57  ;      verifica se jump de calibracao esta setado
           58  ;      setado=calibracao      aberto 1
           59  ;      nao setado=calculo      fechado 0
           60  ;
           61  ;      7004H      q7 q6 q5 q4 q3 q2 q1 q0
           62  ;      x x c x x x x x
           63  ;
889D 30 6C 03'      64  equacao:      jnb flagcalibra,equacao01
88A0 02 8977'      65      ljmp saiequacao
           66  ;
           67  ;      poe accx em xmedx
           68  ;
88A3      69  equacao01:
           70  ;      setb ledciclo
88A3 90 1020      71      mov dptr,#xmed0c0
88A6 E5 10      72      mov a,acc0
88A8 F0      73      movx @dptr,a
88A9 90 1021      74      mov dptr,#xmed1c0
88AC E5 11      75      mov a,acc1
88AE F0      76      movx @dptr,a

```

```

88AF 74 00      77      mov a,#0
88B1 90 1022    78      mov dptr,#xmed2c0
88B4 F5 12      79      mov acc2,a
88B6 F0         80      movx @dptr,a
88B7 90 1023    81      mov dptr,#xmed3c0
88BA F5 13      82      mov acc3,a
88BC F0         83      movx @dptr,a
                84      ;
                85      ;      subtrai offset
                86      ;
88BD 90 8030'   87      mov dptr,#offset00c0
88C0 E0         88      movx a,@dptr
88C1 F5 08      89      mov op0,a
88C3 90 8031'   90      mov dptr,#offset01c0
88C6 E0         91      movx a,@dptr
88C7 F5 09      92      mov op1,a
88C9 74 00      93      mov a,#0
88CB F5 0A      94      mov op2,a
88CD F5 0B      95      mov op3,a
88CF 12 8070'   96      lcall sub32
                97      ;
                98      ;      armazena em xmox
                99      ;
88D2 90 1024    100     mov dptr,#xmo0c0
88D5 E5 10      101     mov a,acc0
88D7 F0         102     movx @dptr,a
88D8 90 1025    103     mov dptr,#xmo1c0
88DB E5 11      104     mov a,acc1
88DD F0         105     movx @dptr,a
88DE 90 1026    106     mov dptr,#xmo2c0
88E1 E5 12      107     mov a,acc2
88E3 F0         108     movx @dptr,a
88E4 90 1027    109     mov dptr,#xmo3c0
88E7 E5 13      110     mov a,acc3
88E9 F0         111     movx @dptr,a
                112     ;
                113     ;      verifica se accx e negativo
                114     ;
88EA E5 13      115     mov a,acc3
88EC 30 E7# 0C' 116     jnb acc.7,verifneg
88EF 74 00      117     mov a,#0
88F1 F5 10      118     mov acc0,a
88F3 F5 11      119     mov acc1,a
88F5 F5 12      120     mov acc2,a
88F7 F5 13      121     mov acc3,a
88F9 0000X      122     ajmp saiequacao
                123     ;
                124     ;      perfaz bb-(x-o)
                125     ;
88FB 85 10 08   126     verifneg: mov op0,acc0
88FE 85 11 09   127     mov op1,acc1
8901 85 12 0A   128     mov op2,acc2
8904 85 13 0B   129     mov op3,acc3

```

```

8907 90 8034'      130      mov dptr,#bb00c0
890A E0            131      movx a,@dptr
890B F5 10         132      mov acc0,a
890D 90 8035'      133      mov dptr,#bb01c0
8910 E0            134      movx a,@dptr
8911 F5 11         135      mov acc1,a
8913 74 00         136      mov a,#0
8915 F5 12         137      mov acc2,a
8917 F5 13         138      mov acc3,a
8919 12 8070'      139      lcall sub32
                   140      ;
                   141      ;      armazena
                   142      ;
891C 90 1028       143      mov dptr,#bmx0c0
891F E5 10         144      mov a,acc0
8921 F0            145      movx @dptr,a
8922 90 1029       146      mov dptr,#bmx1c0
8925 E5 11         147      mov a,acc1
8927 F0            148      movx @dptr,a
8928 90 102A       149      mov dptr,#bmx2c0
892B E5 12         150      mov a,acc2
892D F0            151      movx @dptr,a
892E 90 102B       152      mov dptr,#bmx3c0
8931 E5 13         153      mov a,acc3
8933 F0            154      movx @dptr,a
                   155      ;
                   156      ;      perfaz aa*x
                   157      ;
8934 74 00         158      mov a,#0
8936 F5 12         159      mov acc2,a
8938 F5 13         160      mov acc3,a
893A F5 0A         161      mov op2,a
893C F5 0B         162      mov op3,a
893E 90 8036'      163      mov dptr,#aa00c0
8941 E0            164      movx a,@dptr
8942 F5 10         165      mov acc0,a
8944 90 8037'      166      mov dptr,#aa01c0
8947 E0            167      movx a,@dptr
8948 F5 11         168      mov acc1,a
894A 90 1024       169      mov dptr,#xmo0c0
894D E0            170      movx a,@dptr
894E F5 08         171      mov op0,a
8950 90 1025       172      mov dptr,#xmo1c0
8953 E0            173      movx a,@dptr
8954 F5 09         174      mov op1,a
8956 12 8092'      175      lcall mul32
                   176      ;
                   177      ;      aa*x/(bb-x)
                   178      ;
8959 90 1028       179      mov dptr,#bmx0c0
895C E0            180      movx a,@dptr
895D F5 08         181      mov op0,a
895F 90 1029       182      mov dptr,#bmx1c0

```

```

8962 E0          183          movx a,adptr
8963 F5 09       184          mov op1,a
8965 12 811B'    185          lcall div32
                186          ;
                187          ;          subtrai moff
                188          ;
8968 90 8032'    189          mov dptr,#moff00c0
896B E0          190          movx a,adptr
896C F5 08       191          mov op0,a
896E 90 8033'    192          mov dptr,#moff01c0
8971 E0          193          movx a,adptr
8972 F5 09       194          mov op1,a
8974 12 804E'    195          lcall add32
8977            196  saiequacao:
                197          ;          clr ledciclo
8977 22          198          ret
                199          ;
                200          ;
                201          ;
                202          ;
                203          ;
                204          ;          verifica se jump de calibracao esta setado
                205          ;          setado=calibracao      aberto 1
                206          ;          nao setado=calculo    fechado 0
                207          ;
                208          ;
                209          ;
8978 C0 D0       210  verificcalibra: push psw
897A C0 E0       211          push acc
897C C0 83       212          push dph
897E C0 82       213          push dpl
8980 90 7E02     214          mov dptr,#chavecal
8983 E0          215          movx a,adptr
8984 30 E0# 04'  216          jnb acc.0,verifcalcula
8987 D2 6C       217          setb flagcalibra
8989 80 02'      218          sjmp verificcalibras
898B C2 6C       219  verificcalcula: clr flagcalibra
898D D0 82       220  verificcalibras: pop dpl
898F D0 83       221          pop dph
8991 D0 E0       222          pop acc
8993 D0 D0       223          pop psw
8995 22          224          ret
                225          ;
                226          ;
                227          ;
135             ;
136  include "canmd.asm"
                1          ;
                2          ;
                3          ;          Rotinas de controle para rede CAN
                4          ;          Versao 1.0      programa residente placa mpo3101
                5          ;          baseado na      Versao 1.0      candhesp.asm
                6          ;          12/12/93

```



```

7 ; Cabecas medidoras de distancia FNV
8 ; Mario Antonio Stefani
9 ;
=7C06 10 tumblend equ 07c06h
11 ;
=4000 12 cancontrolreg: equ 04000h ;control register 82526
=4001 13 canstatusreg: equ 04001h ;status register
=4002 14 caninterrupt: equ 04002h ;interrupt pointer
=4003 15 canbustiming0: equ 04003h ;bus timing register 0
=4004 16 canbustiming1: equ 04004h ;bus timing register 1
=4005 17 canoutputctl: equ 04005h ;output Control reg
=4006 18 object00 equ 04006h ;descriptor 1 object 0
=4007 19 object01 equ 04007h ;descriptor 2 object 0
=4008 20 object02 equ 04008h ;descriptor 3 object 0
=4009 21 databyte00 equ 04009h ;data byte comandos
=400A 22 object10 equ 0400ah ;descriptor 1 object 1
=400B 23 object11 equ 0400bh ;descriptor 2 object 1
=400C 24 object12 equ 0400ch ;descriptor 3 object 1
=400D 25 databyte10 equ 0400dh ;data byte h object 1 medida h cabeca0
=400E 26 databyte11 equ 0400eh ;data byte l object 1 medida l
=400F 27 databyte12 equ 0400fh ;databyte h object 1 status
=4010 28 endmark equ 04010h ;end mark
29 ;
30 ; caninit
31 ; Inicializacao da rede CAN , prepara os objetos 0 1
32 ;
8996 C0 D0 33 caninit: push psw
8998 C0 E0 34 push acc
899A C0 F0 35 push b
899C C0 82 36 push dpl
899E C0 83 37 push dph
89A0 90 4000 38 mov dptr,#cancontrolreg
89A3 74 0F 39 mov a,#0fh ;00001111h
89A5 F0 40 movx @dptr,a
89A6 90 4001 41 mov dptr,#canstatusreg
89A9 E0 42 caninit0: movx a,@dptr
89AA 30 E0# FC' 43 jnb acc.0,caninit0
89AD 90 4001 44 mov dptr,#canstatusreg
89B0 74 00 45 mov a,#0
89B2 F0 46 movx @dptr,a
89B3 74 FF 47 mov a,#0ffh
89B5 90 4002 48 mov dptr,#caninterrupt
89B8 F0 49 movx @dptr,a
89B9 90 4003 50 mov dptr,#canbustiming0
89BC 74 3F 51 mov a,#00111111b ;sjw=0,brp=64
89BE F0 52 movx @dptr,a
89BF 90 4004 53 mov dptr,#canbustiming1
89C2 74 12 54 mov a,#12h ;
89C4 F0 55 movx @dptr,a
89C5 90 4005 56 mov dptr,#canoutputctl
89C8 74 1A 57 mov a,#1ah ;current loop
89CA F0 58 movx @dptr,a
89CB 90 4006 59 descr0: mov dptr,#object00

```

```

89CE 74 80      60      mov a,#80h      ;imp access unlocked
89D0 F0        61      movx @dptr,a
89D1 A3        62      inc dptr
89D2 74 A9     63      mov a,#10101001b    ;id=0ah,remote dir=1,datadir=0
89D4 F0        64      movx @dptr,a
89D5 A3        65      inc dptr
89D6 74 01     66      mov a,#1          ;1 byte ,
89D8 F0        67      movx @dptr,a
89D9 A3        68      inc dptr
89DA 74 1B     69      mov a,#esc      ;data byte h
89DC F0        70      movx @dptr,a
89DD 90 7C06   71      pegaend:  mov dptr,#tumblerd
89DE E0        72      movx a,@dptr
89E1 F4        73      cpl a
89E2 54 F0     74      anl a,#11110000b
89E4 F5 F0     75      mov b,a
89E6 90 400A   76      descr1:  mov dptr,#object10
89E9 74 81     77      mov a,#81h      ;imp access locked
89EB F0        78      movx @dptr,a
89EC A3        79      inc dptr
89ED 74 05     80      mov a,#0101b    ;id=1xh,remote dir=0,datadir=1
89EF 45 F0     81      orl a,b
89F1 F0        82      movx @dptr,a
89F2 A3        83      inc dptr
89F3 74 03     84      mov a,#0000011b    ;3 data byte
89F5 F0        85      movx @dptr,a
89F6 A3        86      inc dptr
89F7 74 00     87      mov a,#0
89F9 F0        88      movx @dptr,a    ; h
89FA A3        89      inc dptr
89FB F0        90      movx @dptr,a    ; l
89FC A3        91      inc dptr
89FD F0        92      movx @dptr,a    ;status
89FE 90 4010   93      mov dptr,#endmark
8A01 74 FF     94      endfield:  mov a,#0ffh
8A03 F0        95      movx @dptr,a
8A04 90 4000   96      mov dptr,#cancontrolreg ;release reset
8A07 74 00     97      mov a,#0
8A09 F0        98      movx @dptr,a
8A0A D0 83     99      pop dph
8A0C D0 82    100      pop dpl
8A0E D0 F0    101      pop b
8A10 D0 E0    102      pop acc
8A12 D0 D0    103      pop psw
8A14 22      104      ret
105 ;
106 ;      rec0
107 ;      verifica a existencia de dado no objeto0
108 ;      poe "esc" se nada , "char" se recebeu
109 ;
8A15 C0 D0    110      rec0:      push psw
8A17 C0 F0    111      push b
8A19 C0 82    112      push dpl

```

```

8A1B C0 83      113      push dph
8A1D 90 4008    114      mov dptr,#object02
8A20 75 F0" FF  115      mov b,#0ffh
8A23 E0        116      rec01: movx a,adptr
8A24 20 E6# 05' 117      jb acc.6,rec02      ;transfer status set ?
8A27 D5 F0" F9' 118      djnz b,rec01
8A2A 80 33'     119      sjmp recobject0saiv
8A2C 90 4007    120      rec02: mov dptr,#object01
8A2F 75 F0" FF  121      mov b,#0ffh
8A32 15 F0      122      recobject01: dec b
8A34 E5 F0      123      mov a,b
8A36 60 27'     124      jz recobject0saiv
8A38 E0        125      movx a,adptr      ;cpu access locked?
8A39 30 E0# F6' 126      jnb acc.0,recobject01
8A3C 90 4009    127      recobject02: mov dptr,#databyte00
8A3F E0        128      movx a,adptr      ;capta dado
8A40 F5 F0      129      mov b,a          ; h
8A42 74 1B      130      mov a,#esc
8A44 F0        131      movx adptr,a      ;poe esc na posicao
8A45 90 4008    132      mov dptr,#object02
8A48 C3        133      clr c
8A49 E0        134      movx a,adptr
8A4A 92 E6      135      mov acc.6,c
8A4C F0        136      movx adptr,a      ;reset transfer status
8A4D 90 4007    137      mov dptr,#object01
8A50 E0        138      recobject03: movx a,adptr
8A51 30 E0# FC' 139      jnb acc.0,recobject03      ;cpu access locked ?
8A54 90 4008    140      mov dptr,#object02
8A57 E0        141      movx a,adptr
8A58 20 E6# E1' 142      jb acc.6,recobject02      ;transfer status set?
8A5B E5 F0      143      mov a,b
8A5D 80 02'     144      sjmp recobject0sai
8A5F 74 1B      145      recobject0saiv: mov a,#esc
8A61 D0 83      146      recobject0sai: pop dph
8A63 D0 82      147      pop dpl
8A65 D0 F0      148      pop b
8A67 D0 D0      149      pop psw
8A69 22        150      ret
151      ;
152      ;
153      ;
154      ;      refresh1
155      ;      atualiza o objeto 1, sem requisitar transmissao
156      ;      transmite somente se houver um remote frame
157      ;      dado no accx , e status nos flags do can
158      ;      seta flagerrocan caso nao conseguiu
159      ;      versao 1.0      31/07/92
160      ;      Mario Antonio Stefani
161      ;
8A6A C0 E0      162      refresh1: push acc
8A6C C0 D0      163      push psw
8A6E C0 F0      164      push b
8A70 C0 82      165      push dpl

```

```

8A72 C0 83      166      push dph
8A74 90 400A     167      mov dptr,#object10      ;set imp access locked
8A77 E0         168      movx a,@dptr
8A78 C2 E7      169      clr acc.7
8A7A F0         170      movx @dptr,a
8A7B 90 400B     171      mov dptr,#object11      ;cpu access locked?
8A7E 75 F0" FF  172      mov b,#0ffh
8A81 E0         173      refreshobj10: movx a,@dptr
8A82 20 E0# 05'  174      jb acc.0,refreshobj11
8A85 D5 F0" F9'  175      djnz b,refreshobj10
8A88 80 19'      176      sjmp refreshobjsaie
8A8A 90 400D     177      refreshobj11: mov dptr,#databyte10
8A8D E5 11      178      mov a,acc1
8A8F F0         179      movx @dptr,a
8A90 A3         180      inc dptr
8A91 E5 10      181      mov a,acc0
8A93 F0         182      movx @dptr,a
8A94 A3         183      inc dptr
8A95 E5 36      184      mov a,vstatus
8A97 F0         185      movx @dptr,a
8A98 90 400C     186      mov dptr,#object12
8A9B E0         187      movx a,@dptr
8A9C C2 E6      188      clr acc.6      ;reset transfer status
8A9E C2 E7      189      clr acc.7      ;set transmission request
8AA0 F0         190      movx @dptr,a
8AA1 80 02'      191      sjmp refreshobjsaie1
8AA3 D2 6B      192      refreshobjsaie: setb flagerrorcan
8AA5 90 400A     193      refreshobjsaie1: mov dptr,#object10      ;release imp access
8AA8 E0         194      movx a,@dptr
8AA9 D2 E7      195      setb acc.7
8AAB F0         196      movx @dptr,a
8AAC D0 83      197      pop dph
8AAE D0 82      198      pop dpl
8AB0 D0 F0      199      pop b
8AB2 D0 D0      200      pop psw
8AB4 D0 E0      201      pop acc
8AB6 22         202      ret
203      ;
204      ;      vstatus
205      ;      verifica status de erros setando os flags correspondentes
206      ;
8AB7 C0 E0      207      verifstatus: push acc
8AB9 C0 D0      208      push psw
8ABB C0 82      209      push dpl
8ABD C0 83      210      push dph
8ABF 90 4001     211      mov dptr,#canstatusreg
8AC2 E0         212      movx a,@dptr
8AC3 30 E2# 02'  213      jnb acc.2,verifstatus0
8AC6 D2 6B      214      setb flagerrorcan
8AC8 30 E5# 02'  215      verifstatus0: jnb acc.5,verifstatus1
8ACB D2 6A      216      setb flagerrorcanbus
8ACD 30 E6# 02'  217      verifstatus1: jnb acc.6,verifstatus2
8AD0 D2 69      218      setb flagerrordpram

```

```

8AD2 D0 83      219  verifstatus2:  pop dph
8AD4 D0 82      220                      pop dpl
8AD6 D0 D0      221                      pop psw
8AD8 D0 E0      222                      pop acc
8ADA 22         223                      ret
                224  ;
                225  ;
                226
                227
                228
                229
                230
137             137  ;
138             138  include "mimic.asm"
                1   ;
                2   ;
                3   ;
                4   ;      ROTINA MIMIC
                5   ;      Apresenta no display situacao da imagem captada
                6   ;      Trata-se de uma rotina auxiliar , durante o procedimento
                7   ;      de instalacao do equipamento.
                8   ;      Transforma o display num "bar-graph" proporcional a distancia do alvo.
                9   ;      atencao- destroi andamento da programacao normal
               10   ;      exige o funcionamento no modo RAM , flash desligada
               11   ;      redireciona interrupcoes
               12   ;      Versao 1.0      13/12/93
               13   ;      Mario A. Stefani
               14   ;
               15   ;
=001E           16  ledvaluemi      equ      1eh
=001F           17  ledvaluemi1    equ      1fh
8ADB C2 AF      18  inicializaMI:  clr ea                      ;segura interrupcoes
8ADD C0 D0      19                      push psw
8ADF C0 E0      20                      push acc
8AE1 C0 F0      21                      push b
8AE3 C0 82      22                      push dpl
8AE5 C0 83      23                      push dph
8AE7 C0 03      24                      push 03
8AE9 C0 04      25                      push 04
8AEB C0 05      26                      push 05
8AED C0 06      27                      push 06
8AEF C2 8B      28                      clr ie1                      ;cancela eventual resquicio
8AF1 C2 89      29                      clr ie0                      ;
8AF3 90 7E02    30                      mov dptr,#resetserial      ; libera resetserial
8AF6 74 00      31                      mov a,#0
8AF8 F0         32                      movx @dptr,a
8AF9 90 7E03    33                      mov dptr,#resetcan      ; libera resetcan
8AFC 74 01      34                      mov a,#1
8AFE F0         35                      movx @dptr,a
8AFF 74 00      36                      mov a,#0
8B01 90 7E01    37                      mov dptr,#vpp
8B04 F0         38                      movx @dptr,a                      ;desliga gerador de vpp flash
8B05 90 7E00    39                      mov dptr,#nshadow

```

```

8808 74 01          40          mov a,#1          ;ativa ram
880A F0             41          movx @dptr,a
880B 75 87 00       42          mov 87h,#00          ; preve non-idle mode em HCMOS
880E 75 98" 00      43          mov scon,#00          ; shift
8811 75 89" 05      44          mov tmod,#11010101b        ; t1 imagem, t0 valid , t2 encoder
8814 75 88" 01      45          mov tcon,#00000001b       ; imagem dispara em low level
8817 75 C8" 0B      46          mov t2con,#00001011b
881A 75 A8" 00      47          mov ie,#00
881D 75 88" 04      48          mov ip,#00000100b          ;valid com menor prioridade
8820 75 8D" 00      49          mov th1,#00
8823 75 8B" 00      50          mov tl1,#00
8826 75 8C" 00      51          mov th0,#00
8829 75 8A" 00      52          mov tl0,#00
882C C2 90          53          clr ledhead0
882E C2 97          54          clr ledvar
8830 74 FF          55          mov a,#0FFh
8832 F5 1E          56          mov ledvaluemi,a
8834 F5 1F          57          mov ledvaluemi1,a
8836 12 8D00'       58          lcall settledmimic
8839 12 8CCD'       59          lcall settledmimic1
883C 90 8BD5'       60          mov dptr,#fimvarredurami
883F E5 83          61          mov a,dph
8841 90 8004        62          mov dptr,#8004h
8844 F0             63          movx @dptr,a
8845 90 8BD5'       64          mov dptr,#fimvarredurami
8848 E5 82          65          mov a,dpl
884A 90 8005        66          mov dptr,#8005h
884D F0             67          movx @dptr,a
884E 12 82BC'       68          ;
884E 12 82BC'       69          lcall initled
884E 12 82BC'       70          ;
884E 12 82BC'       71          ;      sincronizacao inicial
884E 12 82BC'       72          ;
8851 30 B2# 02'     73      esperaravini1mi: jnb initvar,esperavarini2mi
8854 80 FB'         74          sjmp esperaravini1mi
8856 20 B2# 02'     75      esperaravini2mi: jb initvar,varredurainimi
8859 80 FB'         76          sjmp esperaravini2mi
8859 80 FB'         77          ;
8859 80 FB'         78          ;      inicio de varredura inicial de sincronizacao
8859 80 FB'         79          ;
885B C2 8C          80      varredurainimi: clr tr0
885D D2 97          81          setb ledvar
885F 75 8C" 00      82          mov th0,#0
8862 75 8A" 00      83          mov tl0,#0
8865 75 8D" 00      84          mov th1,#0
8868 75 8B" 00      85          mov tl1,#0
886B E5 1E          86          mov a,ledvaluemi
886D 44 1F          87          orl a,#00011111b
886F FD             88          mov r5,a          ;primeiro conjunto ( a ser ligado)
8870 E5 1F          89          mov a,ledvaluemi1
8872 44 F0          90          orl a,#11110000b
8874 FE             91          mov r6,a          ;segundo conjunto ( a ser ligado)
8875 D2 8C          92          setb tr0          ; habilita varredura

```

```

8B77 C2 89          93          clr ie0          ;
8B79 D2 A8          94          setb ex0          ; prepara interrupcoes valid
8B7B D2 AF          95          setb ea          ; habilita interrupcoes
8B7D 02 8C1E'       96          ljmp imagemmi          ; salta para imagem
8B80 D0 06          97          pop 06
8B82 D0 05          98          pop 05
8B84 D0 04          99          pop 04
8B86 D0 03         100          pop 03
8B88 D0 83         101          pop dph
8B8A D0 82         102          pop dpl
8B8C D0 F0         103          pop b
8B8E D0 E0         104          pop acc
8B90 D0 D0         105          pop psw
                   106          ;
                   107          ;      Processamento da varredura
                   108          ;
8B92 30 B2# 02'    109      esperavarmi:  jnb initvar,esperavar1mi
8B95 80 FB'        110                      sjmp esperavarmi
8B97 20 B2# 02'    111      esperavar1mi:  jb initvar,varredurami
8B9A 80 FB'        112                      sjmp esperavar1mi
                   113          ;
                   114          ;      inicio de varredura
                   115          ;
8B9C C2 8C         116      varredurami:  clr tr0
8B9E C2 8E         117                      clr tr1
8BA0 D2 97         118                      setb ledvar
8BA2 75 8C" 00     119                      mov th0,#0
8BA5 75 8A" 00     120                      mov tl0,#0
8BAB 75 8D" 00     121                      mov th1,#0
8BAB 75 8B" 00     122                      mov tl1,#0
8BAE E5 1E         123                      mov a,ledvaluemi
8BB0 44 1F         124                      orl a,#00011111b
8BB2 FD           125                      mov r5,a          ;primeiro conjunto ( a ser ligado)
8BB3 E5 1F         126                      mov a,ledvaluemi1
8BB5 44 F0         127                      orl a,#11110000b
8BB7 FE           128                      mov r6,a          ;segundo conjunto ( a ser ligado)
8BB8 D2 67         129                      setb flagcabalc
8BBA D2 66         130                      setb flagcabsus
8BBC D2 65         131                      setb flagcabmed
8BBE D2 8C         132                      setb tr0          ; habilita valid
8BC0 C2 89         133                      clr ie0          ; elimina eventual requisao ant.
8BC2 D0 04         134                      pop 04
8BC4 D0 03         135                      pop 03
8BC6 D0 83         136                      pop dph
8BC8 D0 82         137                      pop dpl
8BCA D0 F0         138                      pop b
8BCC D0 E0         139                      pop acc
8BCE D0 D0         140                      pop psw
8BD0 D2 A8         141                      setb ex0
8BD2 D2 AF         142                      setb ea          ; habilita interrupcoes
8BD4 32           143                      reti
                   144          ;
                   145          ;      ponto de entrada da interrupcao detetora de fim de varredura

```

```

146 ;
8BD5 C2 AF 147 fimvarredurami: clr ea
8BD7 C2 8C 148          clr tr0
8BD9 C2 A8 149          clr ex0
8BDB C2 89 150          clr ie0
8BDD C2 97 151          clr ledvar
8BDF C0 D0 152          push psw
8BE1 C0 E0 153          push acc
8BE3 C0 F0 154          push b
8BE5 C0 82 155          push dpl
8BE7 C0 83 156          push dph
8BE9 C0 03 157          push 03
8BEB C0 04 158          push 04
8BED ED 159          mov a,r5
8BEE F5 1E 160          mov ledvaluemi,a      ;primeiro conjunto ( a ser ligado)
8BF0 EE 161          mov a,r6
8BF1 F5 1F 162          mov ledvaluemi1,a    ;segundo conjunto ( a ser ligado)
8BF3 74 00 163          mov a,#0
8BF5 90 7A01 164          mov dptr,#leds
8BF8 ED 165          mov a,r5
8BF9 F0 166          movx @dptr,a
8BFA 90 7A02 167          mov dptr,#leds1
8BFD EE 168          mov a,r6
8BFE F0 169          movx @dptr,a
8BFF 30 65 04' 170          jnb flagcabmed,durami1
8C02 D2 93 171          setb ledcabmed
8C04 80 02' 172          sjmp durami11
8C06 C2 93 173 durami1:      clr ledcabmed
8C08 30 66 04' 174 durami11:     jnb flagcabsus,durami2
8C0B D2 94 175          setb ledcabsus
8C0D 80 02' 176          sjmp durami21
8C0F C2 94 177 durami2:      clr ledcabsus
8C11 30 67 05' 178 durami21:     jnb flagcabalc,durami3
8C14 D2 95 179          setb ledcabalc
8C16 02 8B92' 180          ljmp esperavarmi
8C19 C2 95 181 durami3:      clr ledcabalc
8C1B 02 8B92' 182          ljmp esperavarmi
183
184 ;
185 ;      interrupcao0      imagem
186 ;      int1 e t1
187 ;      capta a posicao e largura,armazena nas pilhas correspondentes
188 ;
8C1E D2 90 189 imagemmi:      setb ledhead0
8C20 30 B3# 02' 190 veimagemmi:     jnb imagem,imagemmi0
8C23 80 FB' 191          sjmp veimagemmi
8C25 E5 8C 192 imagemmi0:     mov a,th0
8C27 85 8A" F0" 193          mov b,tl0
8C2A B5 8C F8' 194          cjne a,th0,imagemmi0
8C2D AB F0 195          mov r3,b      ;lsb posicao
8C2F FC 196          mov r4,a      ;msb posicao
8C30 C2 90 197          clr ledhead0
8C32 C3 198 imic0:      clr c

```


8C33 EB	199		mov a,r3
8C34 94 E3	200		subb a,#0e3h
8C36 EC	201		mov a,r4
8C37 94 00	202		subb a,#0h
8C39 50 09'	203		jnc imic1
8C3B ED	204		mov a,r5
8C3C 54 EF	205		anl a,#11101111b
8C3E FD	206		mov r5,a
8C3F C2 65	207		clr flagcabmed
8C41 02 8CC8'	208		ljmp imicsai
8C44 C3	209	imic1:	clr c
8C45 EB	210		mov a,r3
8C46 94 C6	211		subb a,#0c6h
8C48 EC	212		mov a,r4
8C49 94 01	213		subb a,#01h
8C4B 50 09'	214		jnc imic2
8C4D ED	215		mov a,r5
8C4E 54 F7	216		anl a,#11110111b
8C50 FD	217		mov r5,a
8C51 C2 65	218		clr flagcabmed
8C53 02 8CC8'	219		ljmp imicsai
8C56 C3	220	imic2:	clr c
8C57 EB	221		mov a,r3
8C58 94 A9	222		subb a,#0a9h
8C5A EC	223		mov a,r4
8C5B 94 02	224		subb a,#02h
8C5D 50 09'	225		jnc imic3
8C5F ED	226		mov a,r5
8C60 54 FB	227		anl a,#11111011b
8C62 FD	228		mov r5,a
8C63 C2 65	229		clr flagcabmed
8C65 02 8CC8'	230		ljmp imicsai
8C68 C3	231	imic3:	clr c
8C69 EB	232		mov a,r3
8C6A 94 8C	233		subb a,#8ch
8C6C EC	234		mov a,r4
8C6D 94 03	235		subb a,#03h
8C6F 50 09'	236		jnc imic4
8C71 ED	237		mov a,r5
8C72 54 FD	238		anl a,#11111101b
8C74 FD	239		mov r5,a
8C75 C2 66	240		clr flagcabsus
8C77 02 8CC8'	241		ljmp imicsai
8C7A C3	242	imic4:	clr c
8C7B EB	243		mov a,r3
8C7C 94 6F	244		subb a,#06fh
8C7E EC	245		mov a,r4
8C7F 94 04	246		subb a,#4h
8C81 50 09'	247		jnc imic5
8C83 ED	248		mov a,r5
8C84 54 FE	249		anl a,#11111110b
8C86 FD	250		mov r5,a
8C87 C2 66	251		clr flagcabsus

```

8C89 02 8CC8'      252          ljmp imicsai
8C8C C3            253      imic5:      clr c
8C8D EB            254          mov a,r3
8C8E 94 53          255          subb a,#53h
8C90 EC            256          mov a,r4
8C91 94 05          257          subb a,#5h
8C93 50 09'        258          jnc imic6
8C95 EE            259          mov a,r6
8C96 54 7F          260          anl a,#01111111b
8C98 FE            261          mov r6,a
8C99 C2 66          262          clr flagcabsus
8C9B 02 8CC8'      263          ljmp imicsai
8C9E C3            264      imic6:      clr c
8C9F EB            265          mov a,r3
8CA0 94 35          266          subb a,#035h
8CA2 EC            267          mov a,r4
8CA3 94 06          268          subb a,#6h
8CA5 50 09'        269          jnc imic7
8CA7 EE            270          mov a,r6
8CAB 54 BF          271          anl a,#10111111b
8CAA FE            272          mov r6,a
8CAB C2 67          273          clr flagcabalc
8CAD 02 8CC8'      274          ljmp imicsai
8CB0 C3            275      imic7:      clr c
8CB1 EB            276          mov a,r3
8CB2 94 18          277          subb a,#18h
8CB4 EC            278          mov a,r4
8CB5 94 07          279          subb a,#7h
8CB7 50 09'        280          jnc imic8
8CB9 EE            281          mov a,r6
8CBA 54 DF          282          anl a,#11011111b
8CBC FE            283          mov r6,a
8CBD C2 67          284          clr flagcabalc
8CBF 02 8CC8'      285          ljmp imicsai
8CC2 EE            286      imic8:      mov a,r6
8CC3 54 EF          287          anl a,#11101111b
8CC5 FE            288          mov r6,a
8CC6 C2 67          289          clr flagcabalc
8CC8 C2 90          290      imicsai:  clr ledhead0
8CCA 02 8C1E'      291          ljmp imagenmi
292      ;
293      ;
294      ;
295      ;
296      ;
297      ;      setledmimic1
298      ;      acende os leds correpondentes e armazena
299      ;      padrao fornecido no acc : 1 acende, 0 nao altera
300      ;      conjunto 1
301      ;
8CCD C0 82          302      setledmimic1:  push dpl
8CCF C0 83          303          push dph
8CD1 C0 F0          304          push b

```

```

8CD3 F5 F0      305      mov b,a
8CD5 E5 1F      306      mov a,ledvaluemi1
8CD7 45 F0      307      orl a,b
8CD9 F5 1F      308      mov ledvaluemi1,a
8CDB 90 7A02    309      mov dptr,#leds1
8CDE F0        310      movx @dptr,a
8CDF D0 F0      311      pop b
8CE1 D0 83      312      pop dph
8CE3 D0 82      313      pop dpl
8CE5 22        314      ret
315 ;
316 ;      clrledmimic1
317 ;      apaga os leds correspondentes e armazena
318 ;      padrao fornecido no acc : 1 apaga , 0 nao altera
319 ;
8CE6 C0 82      320      clrledmimic1: push dpl
8CE8 C0 83      321      push dph
8CEA C0 F0      322      push b
8CEC F4        323      cpl a
8CED F5 F0      324      mov b,a
8CEF E5 1F      325      mov a,ledvaluemi1
8CF1 55 F0      326      anl a,b
8CF3 F5 1F      327      mov ledvaluemi1,a
8CF5 90 7A02    328      mov dptr,#leds1
8CF8 F0        329      movx @dptr,a
8CF9 D0 F0      330      pop b
8CFB D0 83      331      pop dph
8CFD D0 82      332      pop dpl
8CFF 22        333      ret
334 ;
335 ;
336 ;      setledmimic
337 ;      acende os leds correpondentes e armazena
338 ;      padrao fornecido no acc : 1 acende, 0 nao altera
339 ;      conjunto 1
340 ;
8D00 C0 82      341      setledmimic: push dpl
8D02 C0 83      342      push dph
8D04 C0 F0      343      push b
8D06 F5 F0      344      mov b,a
8D08 E5 1E      345      mov a,ledvaluemi
8D0A 45 F0      346      orl a,b
8D0C F5 1E      347      mov ledvaluemi,a
8D0E 90 7A01    348      mov dptr,#leds
8D11 F0        349      movx @dptr,a
8D12 D0 F0      350      pop b
8D14 D0 83      351      pop dph
8D16 D0 82      352      pop dpl
8D18 22        353      ret
354 ;
355 ;      clrledmimic
356 ;      apaga os leds correspondentes e armazena
357 ;      padrao fornecido no acc : 1 apaga , 0 nao altera

```

```

358 ;
8D19 C0 82 359 clrledmimic: push dpl
8D1B C0 83 360 push dph
8D1D C0 F0 361 push b
8D1F F4 362 cpl a
8D20 F5 F0 363 mov b,a
8D22 E5 1E 364 mov a,ledvaluemi
8D24 55 F0 365 anl a,b
8D26 F5 1E 366 mov ledvaluemi,a
8D28 90 7A01 367 mov dpnr,#leds
8D2B F0 368 movx @dpnr,a
8D2C D0 F0 369 pop b
8D2E D0 83 370 pop dph
8D30 D0 82 371 pop dpl
8D32 22 372 ret
373 ;
374 ; catakey mimic
375 ; Versao 1.0 12/12/93
376 ; Verifica o estado das chaves painel display0 e entra no modo mimico
377 ; caso esteja acionado
378 ;
379 ;
380 ;
=7C07 381 jnkeymimic equ 07c07h ;endereço chaves
8D33 C0 83 382 catakeymimic: push dph
8D35 C0 82 383 push dpl
8D37 C0 E0 384 push acc
8D39 C0 D0 385 push psw
8D3B 90 7C07 386 catakeymic0: mov dpnr,#jnkeymimic
8D3E E0 387 movx a,@dpnr
8D3F F4 388 cpl a
8D40 54 1F 389 anl a,#011111b
8D42 30 E2# 06' 390 jnb acc.2,catakeymics
8D45 02 8ADB' 391 ljmp inicializami
8D48 30 E3# 00' 392 catakeymic1: jnb acc.3,catakeymics
393
8D4B D0 D0 394 catakeymics pop psw
8D4D D0 E0 395 pop acc
8D4F D0 82 396 pop dpl
8D51 D0 83 397 pop dph
8D53 22 398 ret
139 ;
140 ;
141 ; PROGRAMA PRINCIPAL
142 ;
143 ; ponto de entrada via reset
144 ;
8D54 C2 AF 145 inicializa: clr ea ; segura interrupcoes
8D56 C2 8B 146 clr ie1 ; cancela eventual resquicio
8D58 C2 89 147 clr ie0 ;
8D5A 90 7E02 148 mov dpnr,#resetserial ; poe em alto resetserial
8D5D 74 01 149 mov a,#1
8D5F F0 150 movx @dpnr,a

```

```

8D60 90 7E03      151      mov dptr,#resetcan      ; poe em baixo resetcan
8D63 74 00        152      mov a,#0
8D65 F0           153      movx @dptr,a
8D66 90 7E01      154      mov dptr,#vpp
8D69 F0           155      movx @dptr,a      ; desliga gerador de vpp flash
8D6A 90 7E00      156      mov dptr,#nshadow
8D6D 74 00        157      mov a,#0      ; desativa ram
8D6F F0           158      movx @dptr,a
8D70 90 8D78'     159      sacanagem: mov dptr,#inicializa0 ;
8D73 C0 82        160      push dpl
8D75 C0 83        161      push dph
8D77 32           162      reti      ; pau do 8031 , desliga bit interno de
                        163      ; pendencia de interrupcao
8D78 74 FF        164      inicializa0: mov a,#0ffh
8D7A D5 E0' FD'   165      inicializa1: djnz acc,inicializa1 ; loop de estabilizacao, fontes,periféricos etc
                        166      ;
8D7D 75 87 00     167      mov 87h,#00      ; preve non-idle mode em HCMOS
8D80 75 98" 00    168      mov scon,#00      ; shift
8D83 75 89" DD    169      mov tmod,#11011101b ; counter P3.4 e P3.5 clock
8D86 75 88" 04    170      mov tcon,#00000100b ;
8D89 75 A8" 00    171      mov ie,#00
8D8C 75 B8" 04    172      mov ip,#0100b
8D8F 75 D0" 00    173      mov psw,#00      ; banco 0
8D92 75 81" 38    174      mov sp,#38h
8D95 75 8D" 00    175      mov th1,#00
8D98 75 8B" 00    176      mov tl1,#00
8D9B 75 8C" 00    177      mov th0,#00
8D9E 75 8A" 00    178      mov tl0,#00
8DA1 78 FF        179      mov r0,#0ffh      ; limpa memoria externa
8DA3 74 00        180      mov a,#0
8DA5 75 A0" 00    181      mov p2,#0
8DA8 D2 B2        182      setb p3.2
8DAA D2 B3        183      setb p3.3
                        184      ;
                        185      ; verifica modo mimico
                        186      ; caso durante reset , operador aperte algum botao no painel,
                        187      ; o sistema entra no modo manutencao ,
                        188      ; onde o display indica posicao grafica da imagem
                        189      ;
8DAC 12 8D33'     190      lcall catakeymimic
                        191      ;
8DAF F2           192      limpa: movx @r0,a
8DB0 D8 FD'       193      djnz r0,limpa
8DB2 75 90" FF    194      mov p1,#0FFh      ; poe em nivel alto
8DB5 75 B0" FF    195      mov p3,#0ffh
8DB8 90 7E02      196      mov dptr,#resetserial ; libera resetserial
8DBB 74 00        197      mov a,#0
8DBD F0           198      movx @dptr,a
8DBE 90 7E03      199      mov dptr,#resetcan ; libera resetcan
8DC1 74 01        200      mov a,#1
8DC3 F0           201      movx @dptr,a
8DC4 74 00        202      mov a,#0
8DC6 90 7E01      203      mov dptr,#vpp

```

```

8DC9 F0          204          movx @dptr,a          ; desliga gerador de vpp flash
8DCA 90 7E00      205          mov dptr,#nshadow
8DCD 74 00        206          mov a,#0          ; desativa ram
8DCF F0          207          movx @dptr,a
8DD0 D2 97        208          setb ledvar
8DD2 D2 96        209          setb ledpro
                210          ;
8DD4 12 82BC'     211          lcall initled
8DD7 74 FF        212          mov a,#0FFh
8DD9 12 8397'     213          lcall clrled
8DDC 74 FF        214          mov a,#0FFh
8DDE 12 83B2'     215          lcall clrled1
                216          ;
                217
8DE1 78 FF        218          mov r0,#0ffh
8DE3 75 A0' 00    219          mov p2,#0
8DE6 E8          220          zerapilhas: mov a,r0
8DE7 F4          221          cpl a
8DE8 F5 F0        222          mov b,a
8DEA F2          223          movx @r0,a
8DEB 00          224          nop
8DEC E2          225          movx a,@r0
8DED B5 F0 08'   226          cjne a,b,paurammens
8DF0 54 00        227          anl a,#0
8DF2 F2          228          movx @r0,a
8DF3 D8 F1'      229          djnz r0,zerapilhas
8DF5 F2          230          movx @r0,a
8DF6 80 05'      231          sjmp preparapi0
8DF8 00          232          paurammens: nop
8DF9 B2 97        233          pauram: cpl ledvar
8DFB 80 FC'      234          sjmp pauram
                235          ;
                236          ; inicializa estados internos
                237          ;
8DFD C2 71        238          preparapi0: clr flagmean
8DFF C2 7E        239          clr flagmensr
8E01 C2 76        240          clr flagcontinuous
8E03 C2 78        241          clr flagonce
8E05 C2 77        242          clr flagerrorcom
8E07 C2 75        243          clr flagerroruart
8E09 C2 79        244          clr flagtransbufful
8E0B C2 6D        245          clr flagsuspeito
8E0D C2 6B        246          clr flagerrorcan
8E0F C2 6A        247          clr flagerrorcanbus
8E11 C2 69        248          clr flagerrordpram
8E13 C2 92        249          clr ledclaro
8E15 C2 94        250          clr ledcabsus
8E17 C2 93        251          clr ledcabmed
8E19 C2 95        252          clr ledcabalc
8E1B 75 36 FF     253          mov vstatus,#0ffh
8E1E 90 1010      254          mov dptr,#numberformean
8E21 74 02        255          mov a,#2
8E23 F0          256          movx @dptr,a

```

```

8E24 C2 71      257      clr flagmean
                258 ;
                259 ;      prepara laser  dac1230d 12bits
                260 ;      inicia o controle de potencia do emissor laser
                261 ;      zera potencia de emissao , prevendo estado letargico do ccd ,
                262 ;      onde inicialmente esta saturado
                263 ;
8E26 90 8039'   264      mov dptr,#laserlarg
8E29 E0         265      movx a,@dptr
8E2A 90 1000    266      mov dptr,#lasersetpoint
8E2D F0         267      movx @dptr,a
8E2E 75 2A 01   268      mov laserpowerc,#1
8E31 90 1002    269      mov dptr,#laserpower+1
8E34 74 00      270      mov a,#0h                      ;previne a saturacao
8E36 F0         271      movx @dptr,a
8E37 90 1001    272      mov dptr,#laserpower
8E3A F0         273      movx @dptr,a
8E3B 75 34 00   274      mov powerdifl,#0
8E3E 75 35 00   275      mov powerdifh,#0
8E41 C2 72      276      clr flagneg
8E43 C2 68      277      clr flagnegant
8E45 C2 62      278      clr flagsat
8E47 12 87C6'   279      lcall controlalaser
                280
                281 ;
                282 ;      prepara interface serial
                283 ;      versao 1.0 8/11/91
                284 ;
8E4A 12 8583'   285      lcall preprec
8E4D 12 8597'   286      lcall preptrans
8E50 12 850D'   287      lcall progserial
8E53 90 5002    288      mov dptr,#commandregister
8E56 74 A5      289      mov a,#10100101b          ;habilita serial,rts low
8E58 F0         290      movx @dptr,a
                291 ;
                292 ;      prepara rede CAN
                293 ;
8E59 12 8996'   294      lcall caninit
8E5C 12 8AB7'   295      lcall verifstatus
                296 ;
                297 ;
                298 ;      mensagens iniciais
                299 ;      envio pela serial
                300 ;      versao 16/03/92
                301 ;
8E5F 90 938C'   302      mov dptr,#mens001
8E62 12 865B'   303      lcall poestringserialc
8E65 90 93A2'   304      mov dptr,#mens002
8E68 12 865B'   305      lcall poestringserialc
                306 ;
                307 ;      prepara estrutura de bancos alternativos de captacao
                308 ;
8E6B 12 8206'   309      preparapi:  lcall clracc          ;apaga accx

```

```

8E6E 75 1E 00      310      mov procntl,#0      ;inicializa contador das pilhas
8E71 75 1F 00      311      mov procnth,#0
8E74 75 20 00      312      mov acqcntl,#0
8E77 75 21 00      313      mov acqcnth,#0
8E7A 90 0100      314      mov dptr,#postack0      ;carrega ponteiro de posicao
8E7D 85 82" 18     315      mov pospth,dpl      ; processamento
8E80 85 83" 19     316      mov pospth,dph
8E83 90 0300      317      mov dptr,#widstack0      ;carrega ponteiro de largura
8E86 85 82" 1A     318      mov widpth,dpl
8E89 85 83" 1B     319      mov widpth,dph
8E8C 90 0500      320      mov dptr,#postack1      ;carrega ponteiro de posicao
8E8F 85 82" 22     321      mov acqposl,dpl      ; aquisicao
8E92 85 83" 23     322      mov acqposh,dph
8E95 90 0700      323      mov dptr,#widstack1      ;carrega ponteiro de largura
8E98 85 82" 24     324      mov acqwidl,dpl
8E9B 85 83" 25     325      mov acqwidl,dph
8E9E 12 8792'     326      lcall catamedia
8EA1 85 31 1C     327      mov ncountcap,nsetcap
8EA4 85 32 1D     328      mov ncountmean,nsetmean
                        329      ;
8EA7 D2 70        330      setb flagfirst
8EA9 D2 6F        331      setb flagsecond
8EAB D2 7A        332      setb flagbank
8EAD C2 7B        333      clr flagdata
8EAF D2 7C        334      setb flagterm
8EB1 C2 6E        335      clr flagesperaproc
                        336      ;
                        337      ;      aciona anti-saturador
                        338      ;
8EB3 75 2B 09     339      mov ncountoutrange,#nsetoutrange
8EB6 75 37 20     340      mov ncountsat,#nsetsat
                        341      ;
                        342      ;      verifica se deve entrar no modo calibracao ou modo medicao
                        343      ;
8EB9 12 8978'     344      lcall verifcalibra
8EBC 20 6C 05'     345      jb flagcalibra,preparapi00
8EBF 90 9487'     346      mov dptr,#mens005
8EC2 80 03'       347      sjmp preparapi10
8EC4 90 9476'     348      preparapi00: mov dptr,#mens004
8EC7 12 865B'     349      preparapi10: lcall poestringserialc
                        350      ;
                        351      ;      sincronizacao inicial
                        352      ;      espera a proxima ocorrencia de VALID
                        353      ;
8ECA C2 8C        354      esperavarini: clr tr0
8ECC 75 8C" 00     355      mov th0,#0      ; prepara contador posicao
8ECF 75 8A" 00     356      mov tl0,#0
8ED2 30 B2# 02'   357      esperavarini1: jnb initvar,esperavarini2
8ED5 80 FB'       358      sjmp esperavarini1
8ED7 20 B2# 02'   359      esperavarini2: jb initvar,varreduraini
8EDA 80 FB'       360      sjmp esperavarini2
                        361      ;
                        362      ;      disparo de varredura inicial de sincronizacao

```



```

363 ; primeira varredura VALID , iniciando a carga no banco de aquisicao inicial
364 ;
365 varreduraini: clr tr0
366               clr tr1
367               clr flagrange
368               mov th0,#0
369               mov tl0,#0
370               setb tr0 ; dispara contagem posicao
371               setb ledvar
372               clr ledpro
373               mov th1,#0
374               mov tl1,#0
375               setb tr1 ; habilita medida
376               clr ie1 ; elimina eventual requisao ant.
377               clr ie0 ;
378               clr flagvar ; apaga flag de varredura
379 ;
380               dec laserpowerc
381 varreduraini1: lcall iomasterled
382               lcall retrec
383               lcall command
384               jb flagesperaprocc,varreduraini0
385               setb ex1 ; prepara interrupcoes
386 varreduraini0: setb ex0
387               setb ea ; habilita interrupcoes
388               ljmp processacg ; salta para modulo de calculo
389 ;
390 ; espera inicio da varredura
391 ;
392 esperaravar:
393               lcall controlalaser ;durante a espera efetua controle de potencia
394 esperaravar0: jnb initvar,esperavar1
395               sjmp esperaravar
396 esperaravar1: jb initvar,varredura
397               sjmp esperaravar1
398 ;
399 ; inicio de varredura
400 ;
401 varredura: clr tr0
402            clr tr1
403            clr flagrange
404            mov th0,#0
405            mov tl0,#0
406            setb tr0 ; dispara posicao
407            setb ledvar
408            clr ledpro
409            mov th1,#0
410            mov tl1,#0
411            setb tr1 ; habilita medida
412            clr ie1 ; elimina eventual requisao ant.
413            clr ie0 ;
414            clr flagvar ; apaga flag de varredura
415 ;

```

```

8F40 15 2A      416      dec laserpowerc
8F42 12 85AB'    417  varredura1:  lcall iomasterled
8F45 12 867F'    418      lcall retrec
8F48 12 869B'    419      lcall command          ; verifica se existe comando serial acumulado

8F4B D0 83      420      pop dph
8F4D D0 82      421      pop dpl
8F4F D0 E0      422      pop acc
8F51 D0 D0      423      pop psw
8F53 20 6E 02'  424      jnb flagesperaproc,varredura0
8F56 D2 AA      425      setb ex1          ; prepara interrupcoes
8F58 D2 A8      426  varredura0:  setb ex0
8F5A D2 AF      427      setb ea          ; habilita interrupcoes
8F5C 32         428      reti
429 ;
430 ;          ponto de entrada da interrupcao detetora de fim de varredura
431 ;          no fim de VALID , contabiliza as captacoes de medida e poe no
432 ;          banco corrente de armazenamento
433 ;
8F5D C2 A8      434  fimvarredura:  clr ex0
8F5F C2 89      435      clr ie0
8F61 D2 7D      436      setb flagvar
8F63 C2 AA      437      clr ex1
8F65 C2 AF      438      clr ea
8F67 C2 97      439      clr ledvar
8F69 D2 7D      440      setb flagvar
8F6B D2 96      441      setb ledpro
8F6D C2 8C      442      clr tr0
8F6F C0 D0      443      push psw
8F71 C0 E0      444      push acc
8F73 C0 82      445      push dpl
8F75 C0 83      446      push dph
8F77 30 6E 03'  447      jnb flagesperaproc,fimsat1
8F7A 02 9013'   448      ljmp verifprocterm
8F7D 30 7F 03'  449  fimsat1:      jnb flagrange,fimsat2  ;verifica se houve captacao
8F80 02 8FFD'   450      ljmp fimvar2
8F83 20 7E 17'  451  fimsat2:      jb flagmensr,fimvar3
452 ;
453 ;          se flagmens setado, significa que ja'
454 ;          houve nsetoutrange varreduras ruins
455 ;          assumindo medida nao confiavel
456 ;
8F86 74 20      457      mov a,#0100000b
8F88 12 8363'    458      lcall settled
8F8B D2 95      459      setb ledcabalc
8F8D 75 2A 01    460      mov laserpowerc,#1
8F90 75 34 C0    461      mov powerdifl,#0c0h
8F93 75 35 FF    462      mov powerdifh,#0ffh
8F96 C2 72      463      clr flagneg
8F98 D5 2B 5F'   464  fimsat3:      djnz ncountoutrange,fimvar1
8F9B D2 7E      465      setb flagmensr
466 ;
467 ;          default para fora de alcance

```

```

468 ;      verifica flagrange , indicando a existencia de captacao
469 ;      caso nao tenha havido captacao , descarta a varredura
470 ;      caso contrario armazena no banco corrente
471 ;
8F9D 20 7F 35' 472 fimvar3:      jb flagrange,fimvar30
8FA0 85 24 82" 473      mov dpl,acqwidl
8FA3 85 25 83" 474      mov dph,acqwidh
8FA6 74 01      475      mov a,#1h
8FA8 F0        476      movx @dptr,a
8FA9 A3        477      inc dptr
8FAA 74 00      478      mov a,#0h
8FAC F0        479      movx @dptr,a
8FAD A3        480      inc dptr
8FAE 85 82" 24 481      mov acqwidl,dpl
8FB1 85 83" 25 482      mov acqwidh,dph
8FB4 85 22 82" 483      mov dpl,acqposl
8FB7 85 23 83" 484      mov dph,acqposh
8FBA 74 00      485      mov a,#00h
8FBC F0        486      movx @dptr,a
8FBD A3        487      inc dptr
8FBE 74 08      488      mov a,#08h
8FC0 F0        489      movx @dptr,a
8FC1 A3        490      inc dptr
8FC2 85 82" 22 491      mov acqposl,dpl
8FC5 85 83" 23 492      mov acqposh,dph
8FC8 85 20 82" 493      mov dpl,acqcntl
8FCB 85 21 83" 494      mov dph,acqcnth
8FCE A3        495      inc dptr
8FCF 85 82" 20 496      mov acqcntl,dpl
8FD2 85 83" 21 497      mov acqcnth,dph
8FD5 75 2B 01' 498 fimvar30:      mov ncountoutrange,#1
8FD8 74 40      499      mov a,#01000000b
8FDA 12 8363'   500      lcall settled
8FDD D2 6D      501      setb flagsuspeito
8FDF D2 94      502      setb ledcabsus
8FE1 75 36 00   503      mov vstatus,#0
8FE4 30 62 10'  504      jnb flagsat,fimvarsat1
8FE7 D5 37 0D'  505      djnz ncountsat,fimvarsat1
8FEA 75 37 20   506      mov ncountsat,#nsetsat
8FED 90 1002    507      mov dptr,#laserpower+1
508 ;
509 ;      prevencao contra saturacao
510 ;
8FF0 74 00      511      mov a,#0h
8FF2 F0        512      movx @dptr,a
8FF3 90 1001    513      mov dptr,#laserpower
8FF6 F0        514      movx @dptr,a
8FF7 02 900A'   515 fimvarsat1:      ljmp fimvar21
516 ;
8FFA 02 8F13'   517 fimvar1:      ljmp esperarvar
8FFD 74 20      518 fimvar2:      mov a,#01000000b
8FFF 12 8397'   519      lcall clrled
9002 C2 95      520      clr ledcabalc

```

```

9004 75 2B 09      521          mov ncountoutrange,#nsetoutrange
9007 75 37 20      522          mov ncountsat,#nsetsat
                    523      ;
                    524      ;      verifica se contagem atingida para anti-saturador
                    525      ;
900A C3            526 fimvar21:      clr c          ;verifica se contagem atingida
900B D5 1C 02'     527          djnz ncountcap,fimvar22
900E 80 03'        528          sjmp verifprocterm          ;se nao, volta
9010 02 8F13'     529 fimvar22:      ljmp esperaravar
9013 20 7C 05'     530 verifprocterm:  jb flagterm,changebank ;se processamento terminado,
9016 D2 6E        531          setb flagesperaprocc      ;seguranca contra travamento
9018 02 8F13'     532          ljmp esperaravar
901B C2 6E        533 changebank:  clr flagesperaprocc
901D 85 20 1E     534          mov procntl,acqcntl      ;atualiza numero de dados
9020 85 21 1F     535          mov procnth,acqcnth
9023 74 00        536          mov a,#0
9025 F5 20        537          mov acqcntl,a          ;zera contador aquisicoes
9027 F5 21        538          mov acqcnth,a
                    539      ;
                    540      ;      alternador de bancos de captacao e calculo
                    541      ;
9029 20 7A 2E'     542 chaveia00:      jb flagbank,chaveia1
902C 90 0100       543 chaveia0:      mov dptr,#postack0
902F 85 82" 18     544          mov posptl,dpl
9032 85 83" 19     545          mov pospth,dph
9035 90 0300       546          mov dptr,#widstack0
9038 85 82" 1A     547          mov widptl,dpl
903B 85 83" 1B     548          mov widpth,dph
903E 90 0500       549          mov dptr,#postack1
9041 85 82" 22     550          mov acqposl,dpl
9044 85 83" 23     551          mov acqposh,dph
9047 90 0700       552          mov dptr,#widstack1
904A 85 82" 24     553          mov acqwidl,dpl
904D 85 83" 25     554          mov acqwidh,dph
9050 D2 7A        555          setb flagbank
9052 D2 7B        556          setb flagdata
9054 85 31 1C     557          mov ncountcap,nsetcap
9057 02 8F13'     558          ljmp esperaravar
905A 90 0500       559 chaveia1:      mov dptr,#postack1
905D 85 82" 18     560          mov posptl,dpl
9060 85 83" 19     561          mov pospth,dph
9063 90 0700       562          mov dptr,#widstack1
9066 85 82" 1A     563          mov widptl,dpl
9069 85 83" 1B     564          mov widpth,dph
906C 90 0100       565          mov dptr,#postack0
906F 85 82" 22     566          mov acqposl,dpl
9072 85 83" 23     567          mov acqposh,dph
9075 90 0300       568          mov dptr,#widstack0
9078 85 82" 24     569          mov acqwidl,dpl
907B 85 83" 25     570          mov acqwidh,dph
907E C2 7A        571          clr flagbank
9080 D2 7B        572          setb flagdata
9082 85 31 1C     573          mov ncountcap,nsetcap

```

```

9085 02 8F13'      574          ljmp esperarvar
                    575      ;
                    576      ;      processamento
                    577      ;      versao 4.0      calcula a media de todos os pontos acumulados
                    578      ;      versao multitasker
                    579      ;      flagdata e flagterm comandam o encadeamento entre
                    580      ;      o processo de aquisicao e o de calculo
                    581      ;
9088 20 7B 02'      582 processacg:      jnb flagdata,processacg1 ;verifica se existem dados disponiveis
908B 80 FB'          583                      sjmp processacg
908D C2 7B          584 processacg1:      clr flagdata          ;dados sendo usados
908F D2 91          585                      setb ledcal          ;sinaliza que estao sendo calculados
9091 75 14 00       586                      mov mem0,#0
9094 75 15 00       587                      mov mem1,#0
9097 75 16 00       588                      mov mem2,#0
909A 75 17 00       589                      mov mem3,#0
909D 12 8206'       590                      lcall clracc
90A0 AB 1E          591                      mov r3,procntl
90A2 AC 1F          592                      mov r4,procnth
90A4 85 18 82"      593 processa3:      mov dpl,posptl
90A7 85 19 83"      594                      mov dph,pospth
90AA 75 13 00       595                      mov acc3,#0
90AD 75 12 00       596                      mov acc2,#0
90B0 E0             597                      movx a,@dptr
90B1 F5 10          598                      mov acc0,a
90B3 A3             599                      inc dptr
90B4 E0             600                      movx a,@dptr
90B5 F5 11          601                      mov acc1,a
90B7 A3             602                      inc dptr
90B8 85 82" 18      603                      mov posptl,dpl
90BB 85 83" 19      604                      mov pospth,dph
90BE 85 1A 82"      605                      mov dpl,widptl
90C1 85 1B 83"      606                      mov dph,widthth
90C4 75 0B 00       607                      mov op3,#0
90C7 75 0A 00       608                      mov op2,#0
90CA E0             609                      movx a,@dptr
90CB F5 08          610                      mov op0,a
90CD A3             611                      inc dptr
90CE E0             612                      movx a,@dptr
90CF F5 09          613                      mov op1,a
90D1 A3             614                      inc dptr
90D2 85 82" 1A      615                      mov widptl,dpl
90D5 85 83" 1B      616                      mov widthth,dph
90D8 12 8092'       617                      lcall mul32
90DB 85 17 0B       618                      mov op3,mem3
90DE 85 16 0A       619                      mov op2,mem2
90E1 85 15 09       620                      mov op1,mem1
90E4 85 14 08       621                      mov op0,mem0
90E7 12 804E'       622                      lcall add32
90EA 85 13 17       623                      mov mem3,acc3
90ED 85 12 16       624                      mov mem2,acc2
90F0 85 11 15       625                      mov mem1,acc1
90F3 85 10 14       626                      mov mem0,acc0

```

```

90F6 C3          627          clr c
90F7 EB          628          mov a,r3
90F8 94 01       629          subb a,#1
90FA FB          630          mov r3,a
90FB EC          631          mov a,r4
90FC 94 00       632          subb a,#0
90FE FC          633          mov r4,a
90FF 4B          634          orl a,r3
9100 70 A2'      635          jnz processa3
9102 AB 1E       636          mov r3,procnth
9104 AC 1F       637          mov r4,procnth
9106 12 8206'    638          lcall clracc
9109 20 7A 05'   639          jb flagbank,processa31
910C 90 0700     640          mov dptr,#widstack1
910F 80 03'      641          sjmp processa32
9111 90 0300     642          processa31: mov dptr,#widstack0
9114 85 82" 1A   643          processa32: mov widptl,dpl
9117 85 83" 1B   644          mov widpth,dph
911A 85 1A 82"   645          processa4: mov dpl,widptl
911D 85 1B 83"   646          mov dph,widpth
9120 75 0B 00    647          mov op3,#0
9123 75 0A 00    648          mov op2,#0
9126 E0          649          movx a,@dptr
9127 F5 08       650          mov op0,a
9129 A3          651          inc dptr
912A E0          652          movx a,@dptr
912B F5 09       653          mov op1,a
912D A3          654          inc dptr
912E 85 82" 1A   655          mov widptl,dpl
9131 85 83" 1B   656          mov widpth,dph
9134 12 804E'    657          lcall add32
9137 C3          658          clr c
9138 EB          659          mov a,r3
9139 94 01       660          subb a,#1
913B FB          661          mov r3,a
913C EC          662          mov a,r4
913D 94 00       663          subb a,#0
913F FC          664          mov r4,a
9140 4B          665          orl a,r3
9141 70 D7'      666          jnz processa4
9143 85 13 0B    667          mov op3,acc3
9146 85 12 0A    668          mov op2,acc2
9149 85 11 09    669          mov op1,acc1
914C 85 10 08    670          mov op0,acc0
914F 85 17 13    671          mov acc3,mem3
9152 85 16 12    672          mov acc2,mem2
9155 85 15 11    673          mov acc1,mem1
9158 85 14 10    674          mov acc0,mem0
915B 12 811B'    675          lcall div32
676          ;
677          ;          rotina filtro de limites
678          ;          descarta da media os 2 elementos acumulados maiores e tambem
679          ;          os 2 menores

```

```

680 ; Versao 1.0 20/02/92
681 ; ATENCAO:pilhpncc deve se situar dentro de uma pagina
682 ;
915E 30 70 1C' 683 pncc: jnb flagfirst,pncc0
9161 90 1100 684 mov dptr,#pilhpncc
9164 E5 10 685 mov a,acc0
9166 F0 686 movx @dptr,a
9167 05 82 687 inc dpl
9169 E5 11 688 mov a,acc1
916B F0 689 movx @dptr,a
916C 05 82 690 inc dpl
916E E5 10 691 mov a,acc0
9170 F0 692 movx @dptr,a
9171 05 82 693 inc dpl
9173 E5 11 694 mov a,acc1
9175 F0 695 movx @dptr,a
9176 05 82 696 inc dpl
9178 C2 70 697 clr flagfirst
917A 02 92B5' 698 ljmp mensfinalt0
917D C3 699 pncc0: clr c
917E 90 1100 700 mov dptr,#pilhpncc
9181 E0 701 movx a,@dptr ;lsb filtro alto 1
9182 95 10 702 subb a,acc0
9184 05 82 703 inc dpl
9186 E0 704 movx a,@dptr ;msb filtro alto 1
9187 95 11 705 subb a,acc1
9189 50 0C' 706 jnc pncc1 ;se acc> troca
918B 15 82 707 dec dpl
918D E0 708 movx a,@dptr ;lsb
918E C5 10 709 xch a,acc0
9190 F0 710 movx @dptr,a
9191 05 82 711 inc dpl
9193 E0 712 movx a,@dptr ;msb
9194 C5 11 713 xch a,acc1
9196 F0 714 movx @dptr,a
9197 05 82 715 pncc1: inc dpl
9199 C3 716 clr c
919A E0 717 movx a,@dptr ;lsb filtro baixo 1
919B 95 10 718 subb a,acc0
919D 05 82 719 inc dpl
919F E0 720 movx a,@dptr ;msb filtro baixo 1
91A0 95 11 721 subb a,acc1
91A2 40 0C' 722 jc pncc3 ;se acc< troca
91A4 15 82 723 dec dpl
91A6 E0 724 movx a,@dptr
91A7 C5 10 725 xch a,acc0
91A9 F0 726 movx @dptr,a
91AA 05 82 727 inc dpl
91AC E0 728 movx a,@dptr
91AD C5 11 729 xch a,acc1
91AF F0 730 movx @dptr,a
91B0 05 82 731 pncc3: inc dpl
91B2 30 6F 05' 732 jnb flagsecond,pncc41

```

```

91B5 C2 6F          733          clr flagsecond
91B7 02 92B5'       734          ljmp mensfinalt0
91BA E5 1D          735  pncc41:    mov a,ncountmean
91BC 15 E0          736          dec acc
91BE 60 07'         737          jz pnccarm
91C0 05 82          738  pncc5:      inc dpl
91C2 05 82          739          inc dpl
91C4 D5 E0' F9'     740          djnz acc,pncc5
91C7 E5 10          741  pnccarm:    mov a,acc0
91C9 F0             742          movx @dptr,a
91CA 05 82          743          inc dpl
91CC E5 11          744          mov a,acc1
91CE F0             745          movx @dptr,a
91CF 15 1D          746          dec ncountmean
91D1 E5 1D          747          mov a,ncountmean
91D3 60 03'         748          jz pnccmedia
91D5 02 92B5'       749          ljmp mensfinalt0
91D8 90 1102        750  pnccmedia:  mov dptr,#pilhamedia
91DB 12 8206'       751          lcall clracc
91DE 85 32 1D       752          mov ncountmean,nsetmean
91E1 E0             753  pnccsoma:  movx a,@dptr
91E2 F5 08          754          mov op0,a
91E4 A3             755          inc dptr
91E5 E0             756          movx a,@dptr
91E6 F5 09          757          mov op1,a
91E8 75 0A 00       758          mov op2,#0
91EB 75 0B 00       759          mov op3,#0
91EE 12 804E'       760          lcall add32
91F1 A3             761          inc dptr
91F2 D5 1D EC'     762          djnz ncountmean,pnccsoma
91F5 85 32 08       763          mov op0,nsetmean
91F8 75 09 00       764          mov op1,#0
91FB 75 0A 00       765          mov op2,#0
91FE 75 0B 00       766          mov op3,#0
9201 12 811B'       767          lcall div32
768 ;
769 ;
770 ;          chama calculo numerico
771 ;          aqui e feita a trasformacao do numero magico para a medida calibrada
772 ;
9204 12 889D'       773          lcall equacao
774 ;
775 ;          atualiza rede CAN
776 ;
9207 12 8A6A'       777          lcall refresh1
778 ;
779 ;          verifica se alguma tecla foi apertada
780 ;
920A 12 876B'       781          lcall catakey
782 ;
783 ;          atualiza display
784 ;
920D 12 8401'       785          lcall binasciiled

```



```

786 ;
787 ;      blink led medida
788 ;
9210 74 80      789 blinkled:      mov a,#10000000b
9212 12 83CD'    790                      lcall cplled
9215 B2 93      791                      cpl ledcabmed
792 ;
793 ;      poe na serial a medida , caso solicitada
794 ;
9217 90 0000      795                      mov dptr,#0
921A 74 20      796                      mov a,#space
921C F0      797                      movx @dptr,a
921D A2 78      798                      mov c,flagonce
921F 72 76      799                      orl c,flagcontinuous
9221 50 0E'      800                      jnc naomandaseria0
9223 74 03      801                      mov a,#3
9225 12 823F'    802                      lcall binascii
9228 75 83" 00   803                      mov dph,#0
922B 75 82" 00   804                      mov dpl,#00      ;nao pula o blinker
922E 12 8636'    805                      lcall poestringserial
9231 12 8792'    806      naomandaseria0: lcall catamedia      ;atualiza numero de captacoes e media
9234 85 32 1D    807                      mov ncountmean,nsetmean
9237 85 31 1C    808                      mov ncountcap,nsetcap
923A D2 70      809                      setb flagfirst
923C D2 6F      810                      setb flagsecond
811 ;
812 ;      atualiza leds no display
813 ;      envia tambem mensagens de erro pela serial
814 ;
815 ;      Cabeca medidoras disposicao dos leds
816 ;
817 ;      0      out of range
818 ;      1      erro serial/transmitter full
819 ;      2      erro can
820 ;      3      blinker medida
821 ;      4      medida suspeita
822 ;      5      command error
823 ;
824 ;      mensagem de erro via led
825 ;      versao 1      16/03/92
826 ;
923E 74 7F      827      naomandaserial: mov a,#01111111b
9240 12 8397'    828                      lcall clrled
9243 C2 94      829                      clr ledcabsus
9245 12 8AB7'    830                      lcall verifstatus
9248 30 68 0D'    831      mensfinalc1:  jnb flagerrorcan,mensfinalc2
924B C2 68      832                      clr flagerrorcan
924D 74 10      833                      mov a,#00010000b
924F 12 8363'    834                      lcall settled
9252 90 9494'    835                      mov dptr,#menserr8
9255 12 865B'    836                      lcall poestringserialc
9258 30 6A 0D'    837      mensfinalc2:  jnb flagerrorcanbus,mensfinalc3
925B C2 6A      838                      clr flagerrorcanbus

```

```

925D 74 10      839      mov a,#10000b
925F 12 8363'   840      lcall settled
9262 90 94A2'   841      mov dptr,#menserr9
9265 12 865B'   842      lcall poestringserialc
9268 30 69 0D'  843      mensfinalc3: jnb flagerrordpram,mensfinal0
926B C2 69      844      clr flagerrordpram
926D 74 10      845      mov a,#10000b
926F 12 8363'   846      lcall settled
9272 90 94AE'   847      mov dptr,#menserr10
9275 12 865B'   848      lcall poestringserialc
9278 30 79 07'  849      mensfinal0  jnb flagtransbufful,mensfinal1
927B C2 79      850      clr flagtransbufful
927D 74 08      851      mov a,#01000b
927F 12 8363'   852      lcall settled
9282 30 77 0D'  853      mensfinal1: jnb flagerrorcom,mensfinal10
9285 C2 77      854      clr flagerrorcom
9287 74 04      855      mov a,#100b
9289 12 8363'   856      lcall settled
928C 90 941E'   857      mov dptr,#menserr4
928F 12 865B'   858      lcall poestringserialc
9292 30 6D 0E'  859      mensfinal10: jnb flagsuspeito,mensfinal2
9295 74 40      860      mov a,#1000000b
9297 12 8363'   861      lcall settled
929A D2 94      862      setb ledcabsus
929C C2 6D      863      clr flagsuspeito
929E C2 7E      864      clr flagmensr
92A0 75 36 FF   865      mov vstatus,#0ffh
92A3 30 75 0F'  866      mensfinal2: jnb flagerroruart,mensfinalt
92A6 C2 75      867      clr flagerroruart
92A8 74 08      868      mov a,#01000b
92AA 12 8363'   869      lcall settled
92AD 30 6C 05'  870      mensfinal3: jnb flagcalibra,mensfinalt
92B0 74 02      871      mov a,#10b
92B2 12 8363'   872      lcall settled
92B5            873      mensfinalt:
92B5 D2 7C      874      mensfinalt0: setb flagterm ;avisa que o processamento foi terminado
92B7 C2 91      875      clr ledcal ;sinaliza fim do processamento
92B9 12 8A15'   876      lcall rec0
92BC 12 869B'   877      lcall command
92BF 02 9088'   878      ljmp processacg
9299            879      ;
9299            880      ;      interrupcao1      medidor de distancia
9299            881      ;      capta a posicao e largura,armazena nas pilhas correspondentes
9299            882      ;      Versao 4.1      20/02/92      ;alteracao no controle de potencia
9299            883      ;
92C2 C2 AA      884      medida:      clr ex1
92C4 C2 8E      885      clr tr1
92C6 D2 90      886      setb ledhead0
92C8 C0 D0      887      push psw
92CA C0 E0      888      push acc
92CC C0 F0      889      push b
92CE C0 82      890      push dpl
92D0 C0 83      891      push dph

```

92D2 C0 00	892	push 00
92D4 C0 01	893	push 01
92D6 C0 02	894	push 02
92D8 C0 03	895	push 03
92DA C0 04	896	push 04
92DC C0 05	897	push 05
92DE C0 06	898	push 06
92E0 E5 8C	899	medida1: mov a,th0
92E2 85 8A" F0"	900	mov b,tl0
92E5 B5 8C F8'	901	cjne a,th0,medida1
92E8 FB	902	mov r3,a ;msb posicao
92E9 AC F0	903	mov r4,b ;lsb posicao
92EB AD 8D	904	mov r5,th1 ;msb largura
92ED A9 8D	905	mov r1,th1
92EF AE 8B	906	mov r6,tl1 ;lsb largura
92F1 AA 8B	907	mov r2,tl1
92F3 75 8D" 00	908	mov th1,#0 ;prepara redisparo
92F6 75 8B" 00	909	mov tl1,#0
92F9 D2 8E	910	setb tr1
92FB E5 2A	911	mov a,laserpowerc
92FD B4 01 17'	912	cjne a,#01,medida12
9300 C2 72	913	clr flagneg
9302 90 1000	914	mov dptr,#lasersetpoint
9305 E0	915	movx a,adptr
9306 F5 F0	916	mov b,a
9308 C3	917	clr c
9309 EE	918	mov a,r6
930A 95 F0	919	subb a,b
930C F5 34	920	mov powerdifl,a
930E ED	921	mov a,r5
930F 94 00	922	subb a,#0
9311 F5 35	923	mov powerdifh,a
9313 40 02'	924	jc medida12 ;largura medida menor que setada
9315 D2 72	925	setb flagneg ;largura medida maior que a setada
9317 C3	926	medida12: clr c ;multiplica por 2 a largura
9318 EE	927	mov a,r6
9319 33	928	rlc a
931A FE	929	mov r6,a
931B ED	930	mov a,r5
931C 33	931	rlc a
931D FD	932	mov r5,a
931E C3	933	clr c ;soma
931F EA	934	mov a,r2
9320 2E	935	add a,r6
9321 FA	936	mov r2,a
9322 E9	937	mov a,r1
9323 3D	938	addc a,r5
9324 F9	939	mov r1,a ;salva 3/4 largura
9325 C3	940	clr c ;salva e multiplica por 2
9326 EE	941	mov a,r6
9327 33	942	rlc a
9328 FE	943	mov r6,a
9329 ED	944	mov a,r5

932A 33	945	rlc a
932B FD	946	mov r5,a
932C 85 24 82"	947	mov dpl,acqwidl ;salva largura*8
932F 85 25 83"	948	mov dph,acqwidh
9332 EE	949	mov a,r6
9333 F0	950	movx @dptra,a
9334 A3	951	inc dptra
9335 ED	952	mov a,r5
9336 F0	953	movx @dptra,a
9337 A3	954	inc dptra
9338 85 82" 24	955	mov acqwidl,dpl ;salva ponteiro
933B 85 83" 25	956	mov acqwidh,dph
933E 78 02	957	mov r0,#2 ;prepara posicao*8
9340 C3	958 medida13:	clr c
9341 EC	959	mov a,r4
9342 33	960	rlc a
9343 FC	961	mov r4,a
9344 EB	962	mov a,r3
9345 33	963	rlc a
9346 FB	964	mov r3,a
9347 D8 F7'	965	djnz r0,medida13
9349 85 22 82"	966	mov dpl,acqposl ;prepara pointer
934C 85 23 83"	967	mov dph,acqposh
934F C3	968	clr c ;subtrai 3/4 largura
9350 EC	969	mov a,r4
9351 9A	970	subb a,r2
9352 F0	971	movx @dptra,a
9353 A3	972	inc dptra
9354 EB	973	mov a,r3
9355 99	974	subb a,r1
9356 F0	975	movx @dptra,a
9357 A3	976	inc dptra
9358 85 82" 22	977	mov acqposl,dpl ;salva ponteiro
935B 85 83" 23	978	mov acqposh,dph
935E 85 20 82"	979	mov dpl,acqcntl
9361 85 21 83"	980	mov dph,acqcnth
9364 A3	981	inc dptra
9365 85 82" 20	982	mov acqcntl,dpl
9368 85 83" 21	983	mov acqcnth,dph
936B D2 7F	984	setb flagrange
936D D0 06	985 naopresta:	pop 06
936F D0 05	986	pop 05
9371 D0 04	987	pop 04
9373 D0 03	988	pop 03
9375 D0 02	989	pop 02
9377 D0 01	990	pop 01
9379 D0 00	991	pop 00
937B D0 83	992	pop dph
937D D0 82	993	pop dpl
937F D0 F0	994	pop b
9381 D0 E0	995	pop acc
9383 D0 D0	996	pop psw
9385 C2 90	997	clr ledhead0

```

9387 C2 8B          998          clr ie1          ;eventual resquicio
9389 D2 AA          999          setb ex1
938B 32             1000         reti
                        1001         ;
                        1002         ;          mensagens
                        1003         ;
938C 0D 4F 70 74 6F 1004  mens001:      db      CR,"Optoeletronica S/A ",esc
9391 65 6C 65 74 72
9396 6F 6E 69 63 61
939B 20 53 2F 41 20
93A0 20 1B
93A2 0D 4D 65 64 69 1005  mens002:      db      CR,"Medidor-de-Distancia-V2.0-1994",esc
93A7 64 6F 72 2D 64
93AC 65 2D 44 69 73
93B1 74 61 6E 63 69
93B6 61 2D 56 32 2E
93BB 30 2D 31 39 39
93C0 34 1B
93C2 0D 6F 6B 1B      1006  mens003:      db      CR,"ok",esc
93C6 0D 46 30 2D 52    1007  menserr0:      db      CR,"F0-RAM.FAILURE      ",esc
93CB 41 4D 2E 46 41
93D0 49 4C 55 52 45
93D5 20 20 20 20 20
93DA 20 1B
93DC 0D 46 31 2D 4E    1008  menserr1:      db      CR,"F1-NO.SCAN      ",esc
93E1 4F 2E 53 43 41
93E6 4E 20 20 20 20
93EB 20 20 20 20 20
93F0 20 1B
93F2 0D 57 30 2D 4F    1009  menserr2:      db      CR,"W0-OUT.OF.RANGE      ",esc
93F7 55 54 2E 4F 46
93FC 2E 52 41 4E 47
9401 45 20 20 20 20
9406 20 1B
9408 0D 57 31 2D 54    1010  menserr3:      db      CR,"W1-TRANSMITTER.FULL ",esc
940D 52 41 4E 53 4D
9412 49 54 54 45 52
9417 2E 46 55 4C 4C
941C 20 1B
941E 0D 57 32 2D 43    1011  menserr4:      db      CR,"W2-COMMAND.ERROR      ",esc
9423 4F 4D 4D 41 4E
9428 44 2E 45 52 52
942D 4F 52 20 20 20
9432 20 1B
9434 0D 57 33 2D 55    1012  menserr5:      db      CR,"W3-UART-FRAMING      ",esc
9439 41 52 54 2D 46
943E 52 41 4D 49 4E
9443 47 20 20 20 20
9448 20 1B
944A 0D 57 34 2D 55    1013  menserr6:      db      CR,"W4-UART-PARITY      ",esc
944F 41 52 54 2D 50
9454 41 52 49 54 59
9459 20 20 20 20 20

```

```
945E 20 1B
9460 0D 57 35 2D 55      1014  menserr7:      db      CR,"W5-UART-OVERRUN      ",esc
9465 41 52 54 2D 4F
946A 56 45 52 52 55
946F 4E 20 20 20 20
9474 20 1B
9476 0D 6D 6F 64 6F      1015  mens004:      db      CR,"modo-calibracao",esc
947B 2D 63 61 6C 69
9480 62 72 61 63 61
9485 6F 1B
9487 0D 6D 6F 64 6F      1016  mens005:      db      CR,"modo-normal",esc
948C 2D 6E 6F 72 6D
9491 61 6C 1B
9494 0D 57 36 2D 43      1017  menserr8:      db      CR,"W6-CAN-ERROR",esc
9499 41 4E 2D 45 52
949E 52 4F 52 1B
94A2 0D 57 37 2D 43      1018  menserr9:      db      CR,"W7-CAN-BUS",esc
94A7 41 4E 2D 42 55
94AC 53 1B
94AE 0D 57 38 2D 43      1019  menserr10:     db      CR,"W8-CAN-DPRAM",esc
94B3 41 4E 2D 44 50
94B8 52 41 4D 1B
                                1020  ;
                                1021  ;
                                1022  ;
                                1023      END
```

No lines contained errors.

No lines contained warnings.