

WALDOMIRO NOGUEIRA DOS SANTOS

- . Bacharel em Física Aplicada
Instituto de Física "Gleb Wataghin"
Universidade Estadual de Campinas - 1989
- . Engenheiro Elétrico
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Estadual de Campinas - 1989

MEDIDOR DE DIÂMETRO A LASER

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da UNICAMP para a obtenção do título de "Mestre em Engenharia Elétrica".

Orientador:

Prof. Dr. Oséas Valente de Avilez Filho

Este exemplar corresponde à edição final da
defendida por Waldomiro Nogueira
dos Santos
Julgadora em 09 / 07 / 91

Orientador

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA E MICROELETRÔNICA

MARÇO - 1991



Aos meus avós,
Marcelino e Otília...

Aos meus pais,
Manoel e Mercedes...

À minha esposa,
Márcia.

Agradecimentos:

Ao amigo e colaborador José Roberto, sem o qual este trabalho não se realizaria.

Ao pessoal da república pela colaboração e compreensão.

Aos professores Kiel, Yuzo, Calil e ao Alexandre Hermini pelo apoio, franqueza e amizade.

Ao Prof. Oséas pelo incentivo ao Mestrado, pela orientação do trabalho e pela atenção dedicada.

ÍNDICE GERAL

CAPÍTULO I - Anteprojeto do medidor a laser	5
1.1 - UCP e Memórias	6
1.2 - Chaves Digitais	6
1.3 - Mostrador	8
1.4 - Sistema Laser	8
1.5 - Sistema Vibracional Refletor	8
1.6 - Sistema Óptico	9
1.7 - Filtro Digital	10
1.8 - Lógica de Controle	10
1.9 - Contador e Relógio	11
1.10 - Alarme	11
CAPÍTULO II - Desenvolvimento do Medidor a Laser	12
2.1 - Princípio de Funcionamento	13
2.2 - Hardware	22
2.3 - Software	30
2.4 - Módulos e acessórios mecânicos	35
CAPÍTULO III - Medidas e Caracterização	38
3.1 - Calibração	39
3.2 - Caracterização	39
3.3 - Testes funcionais	43
3.4 - Modo de operação	44
CAPÍTULO IV - Conclusões	46
4.1 - Utilização e desempenho	47
4.2 - Proposições	47
APÊNDICE A - Fotodetetores	48
APÊNDICE B - Lasers Semicondutores	51
APÊNDICE C - Lentes e Espelhos	60
APÊNDICE D - Motor de Passos	62
APÊNDICE E - Fluxogramas de Programa e Rotinas	65
APÊNDICE F - Circuitos Eletrônicos	75
APÊNDICE G - Referências Bibliográficas	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Diagrama em blocos do medidor a laser.	7
Figura 1.2 - Sistema óptico	9
Figura 2.1 - Varredura vertical descendente do feixe.	14
Figura 2.2 - Regiões percorridas pelo feixe laser.	14
Figura 2.3 - Seleção do sinal.	16
Figura 2.4 - Tratamento do pulso.	16
Figura 2.5 - Circuito de comparação.	18
Figura 2.6 - Posições do feixe numa varredura descendente.	18
Figura 2.7 - Gráfico velocidade x deslocamento.	20
Figura 2.8 - Durante o tempo de varredura da medida (tvm) o feixe percorre o diâmetro "d" da lente.	20
Figura 2.2.1 - Correspondência entre os bits do byte escrito e as chaves digitais.	26
Figura 2.3.1 - Fenda em placa de fenolite	32
Figura 2.3.2 - Sinal do fotodetector	32
Figura 2.3.3 - Curva V_r x N_c traçada a partir dos dados de calibração	34
Figura 2.4.1 - Módulo de controle.	36
Figura 2.4.2 - Módulo de varredura.	37
Figura 3.1.1 - Curva V_r X N_c .	41
Figura 3.2 - Região espacial utilizada para a calibração.	42
Figura 3.4.1 - Posição do medidor a laser numa extrusora convencional.	45
Figura B.1 - Processos de transição de um elétron.	53
Figura B.2 - Oscilação laser.	53
Figura B.3 - Estrutura do diodo laser de GaAlAs.	56
Figura B.4 - Estrutura física do diodo laser em "V".	56
Figura B.5 - $\theta \parallel$ e $\theta \perp$	58
Figura B.6 - Astigmatismo do diodo laser.	58
Figura B.7 - Conjunto de lentes para correção do astigmatismo e para colimação do feixe.	59
Figura D.1 - Seqüência de passos (sentido horário).	63

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.2.1 - Constantes do sistema.	24
Tabela 2.2.2 - Variáveis do sistema.	24
Tabela 2.2.3 - Mapeamento do sistema.	25
Tabela 2.4.1 - Mapa de ligação do conector.	36
Tabela 3.1.1 - Dados obtidos para a calibração.	40
Tabela 3.1.2 - Características do medidor a laser.	42
Tabela A.1 - Características do SFH 206K.	50
Tabela A.2 - Características do fototransistor BPW42.	50
Tabela D.1 - Características do motor de passos.	64

INTRODUÇÃO

Um medidor de espessura óptico efetua leituras de dimensões de objetos sem contato físico. Esta característica o diferencia substancialmente dos medidores mecânicos convencionais, onde é necessário o contato entre o aparelho e o objeto. Esse contato deforma a superfície do objeto medido, principalmente se este não possuir uma boa rigidez. No caso de micrômetros convencionais essas deformações podem ultrapassar a precisão do próprio aparelho !

No medidor que desenvolvemos, e que descrevemos neste trabalho, consideramos como pontos importantes o manuseio simplificado, a confiabilidade e o baixo custo, fatores essenciais para que pudesse ser utilizado pelas indústrias nacionais como equipamento de controle de qualidade.

Como aplicação, que nos serviu para testar o projeto desenvolvido, realizamos medidas de espessura de revestimentos de teflon e PVC com os quais se revestem os fios e cabos elétricos. Neste caso, medições precisas em tempo real na saída das extrusoras permitem reduzir os diâmetros para valores próximos ao mínimo permitido pela ABNT, economizando esses materiais ao mesmo tempo em que se obedece às normas de segurança.

CAPÍTULO I

Anteprojeto do medidor a laser

Neste capítulo apresentamos uma descrição suscinta dos blocos funcionais que compõem o medidor de espessura a laser, blocos estes que serão detalhados nos capítulos seguintes e nos apêndices deste trabalho. Na figura 1.1 encontra-se o esquema geral do medidor.

1.1 - UCP e Memórias

A Unidade Central de Processamento (UCP), juntamente com as memórias RAM e EPROM, constituem um sistema básico de processamento que controla e coordena os demais blocos.

O *software* residente na EPROM efetua todos os cálculos aritméticos apresentando o valor do diâmetro (em milímetros) em quatro mostradores de 7 segmentos. O *software* corrige a variação dos valores medidos com a temperatura através de uma autocalibração a ser descrita oportunamente.

1.2 - Chaves Digitais

São usadas como entrada dos valores mínimo e máximo da tolerância permitida para um determinado valor nominal.

Cada conjunto de chaves, formado por quatro unidades, indica ao microprocessador valores limites, fora dos quais o alarme deve ser acionado para indicação de anormalidades no objeto. É a interface de entrada para a comunicação entre o mundo externo e o microprocessador.

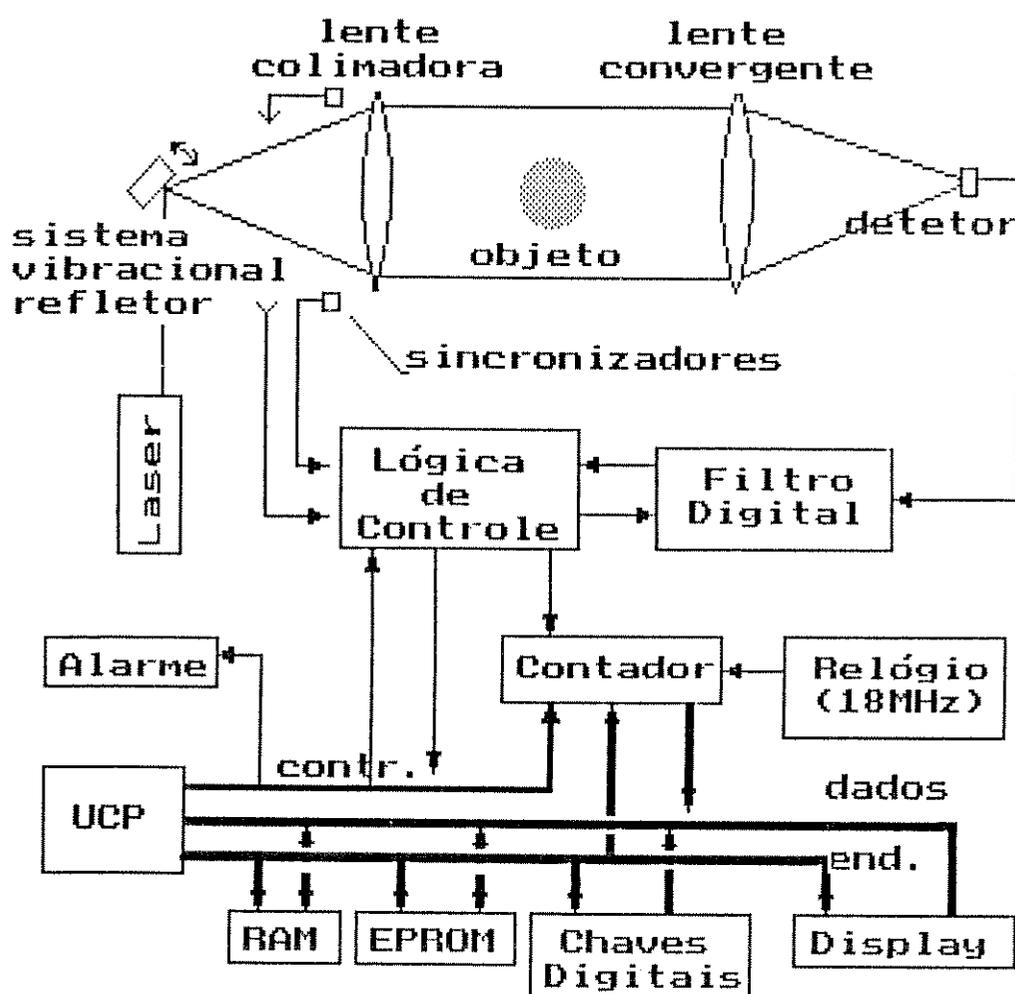


Figura 1.1 - Diagrama em blocos do medidor a laser.

1.3 - Mostrador

Um conjunto de quatro mostradores forma a interface de saída do microprocessador com o mundo externo. O valor mostrado está em centésimos ou em micronésimos de metro, conforme escolha através de uma chave localizada no painel frontal do instrumento.

1.4 - Sistema Laser

O laser deve possuir uma potência de saída constante com o tempo e com as variações da temperatura ambiente. O laser semiconductor utilizado emite em 780nm e possui um circuito de realimentação que lhe garante uma potência constante.

Como todo laser a semiconductor possui um feixe de saída divergente, utilizou-se um conjunto óptico para colimá-lo. O feixe do laser para essa aplicação tem que ser necessariamente colimado pois utiliza uma varredura vertical ponto a ponto para detetar o objeto a ser medido.

1.5 - Sistema Vibracional Refletor

É desejável uma velocidade constante de varredura, pois só assim o tempo durante o qual o objeto impede a passagem do laser será proporcional ao seu diâmetro.

Esta parte mecânica do medidor é a mais susceptível a desgastes físicos, pois está em contínuo movimento através de um motor de passos sendo, portanto, o fator mais determinante da vida útil do aparelho. O espelho utilizado para refletir o laser deve ter boa planicidade e possuir um alto índice de reflexão para o comprimento de onda emitido pelo laser.

1.6 - Sistema Óptico

Consiste, basicamente, além do espelho descrito anteriormente, de duas lentes. A primeira é uma lente colimadora em cujo foco encontra-se o sistema vibracional refletor. Possibilita uma varredura perpendicular à lente e paralela ao eixo do aparelho.

A segunda lente converge o feixe laser a um fotodetector localizado em seu foco. Assim, enquanto o feixe estiver percorrendo as lentes, o fotodetector estará recebendo luz. Se durante esse intervalo o feixe for obstruído por um objeto, esse tempo será detetado e convenientemente convertido em milímetros pelo microprocessador.

Existe ainda um pequeno espelho (vide figura 1.2) que possibilita que o laser se situe no mesmo plano das lentes, porém, abaixo delas. Isto tornou-se prático na medida em que minimizou o tamanho físico do suporte do medidor, além de possibilitar, através de um suporte adequado, um ajuste fino do posicionamento espacial do feixe do laser.

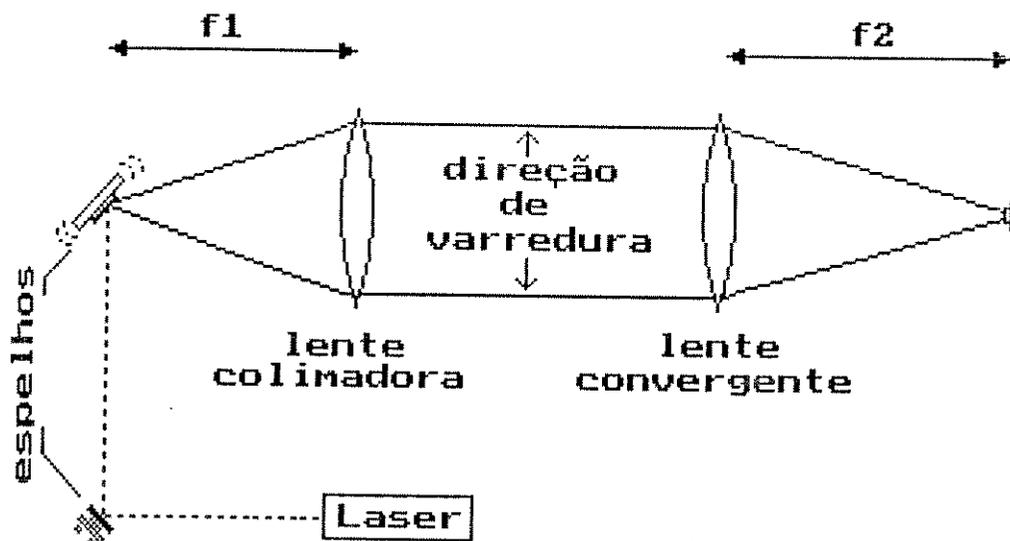


Figura 1.2 - Sistema óptico

1.7 - Filtro Digital

É um circuito digital que seleciona o pulso correspondente ao diâmetro do objeto a ser medido. Em sua entrada recebe o sinal correspondente à varredura completa do feixe, inclusive do sinal correspondente ao percurso fora da lente, apresentando em sua saída apenas o sinal referente ao tempo em que o feixe percorreu o objeto. Cabe lembrar que o aparelho mede somente objetos opacos ao infravermelho.

1.8 - Lógica de Controle

Controla o sistema de medidas no que se refere à seleção da leitura no sentido de baixo para cima ou vice-versa. Ou seja, só permite a passagem do sinal correspondente ao diâmetro num sentido pré-determinado.

Uma vez permitida a passagem deste pulso, só permite a de outro pulso após o processamento integral do primeiro sinal. Isto significa que mesmo que ocorra uma segunda leitura válida do diâmetro, esta lógica aguarda um sinal da UCP indicando a realização completa do processamento. Utiliza dois sensores ópticos sincronizadores nas extremidades da lente colimadora para efetuar uma correta seleção do pulso.

1.9 - Contador e Relógio

O relógio utilizado no contador deve ser de alta frequência a fim de possibilitar uma precisão na ordem de micrometros. A frequência deste relógio está relacionada com a velocidade de varredura. Quanto maior a velocidade maior deverá ser a frequência para uma mesma precisão.

O contador por sua vez tem que ser capaz de contagens em alta frequência sem perdas de pulsos, o que comprometeria a precisão da medida. Deve possibilitar tanto uma contagem referente ao diâmetro quanto referente à fenda, para que possam ser efetuadas as devidas correções dos efeitos da temperatura ambiente, a serem discutidas mais adiante.

1.10 - Alarme

Constitui-se de um sistema de alarmes sonoro e visual, para alertar que a medida excedeu um dos limites pré-programados através das chaves digitais. Sua importância é realçada se o aparelho for usado como elemento de controle de qualidade em tempo real.

CAPÍTULO II

Desenvolvimento do Medidor a Laser

2.1 - Princípio de Funcionamento

2.1.1 - Varredura do feixe e lógica de controle

Utilizamos uma varredura transversal com um feixe puntual a uma velocidade constante, de modo que o tempo correspondente à obstrução do feixe pelo objeto fosse proporcional à dimensão deste.

O circuito de detecção foi projetado de maneira tal que quando não incidir luz no fotodetector sua saída será nível lógico "1", ao passo que quando houver incidência de luz sua saída apresentará nível lógico "0".

A figura 2.1 mostra 4 posições distintas da varredura efetuada pelo feixe. No caso, o feixe está descendo. Ao chegar à borda superior da primeira lente o feixe (após percorrer o caminho óptico indicado na figura) atinge o fotodetector (vide Apêndice A), cuja saída vai para nível lógico "0" (posição 1 na figura 2.1). Continua em "0" até que o feixe atinja o objeto a ser medido (posição 2). Enquanto estiver percorrendo o objeto a saída do fotodetector será "1", retornando à "0" a partir da posição 3. A partir da posição 4 permanece em "1". Assim, o sinal na saída do fotodetector terá o aspecto mostrado na figura 2.2.

Quando o feixe atinge seu limite de varredura inferior, retorna num movimento ascendente, obtendo-se, assim, uma forma de onda simétrica.

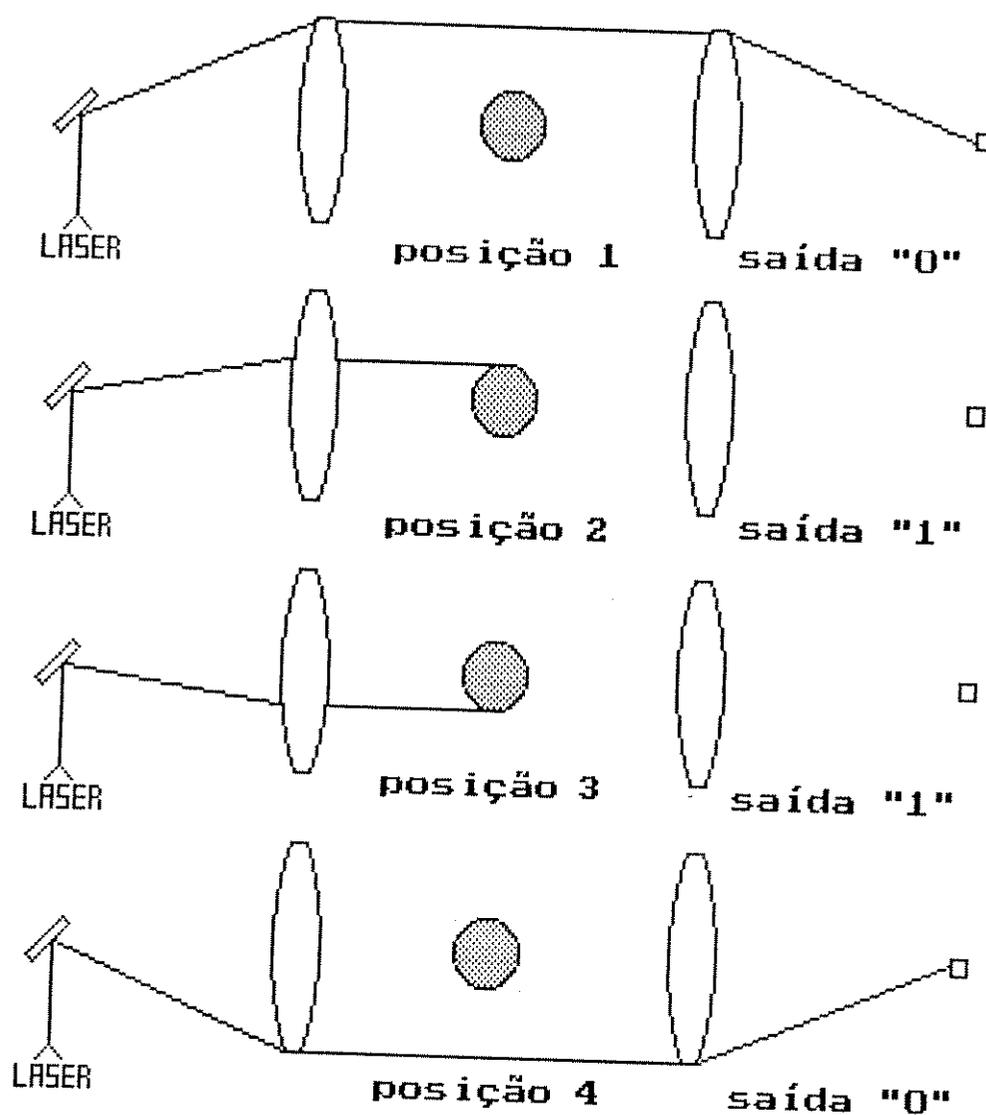


Figura 2.1 - Varredura vertical descendente do feixe.

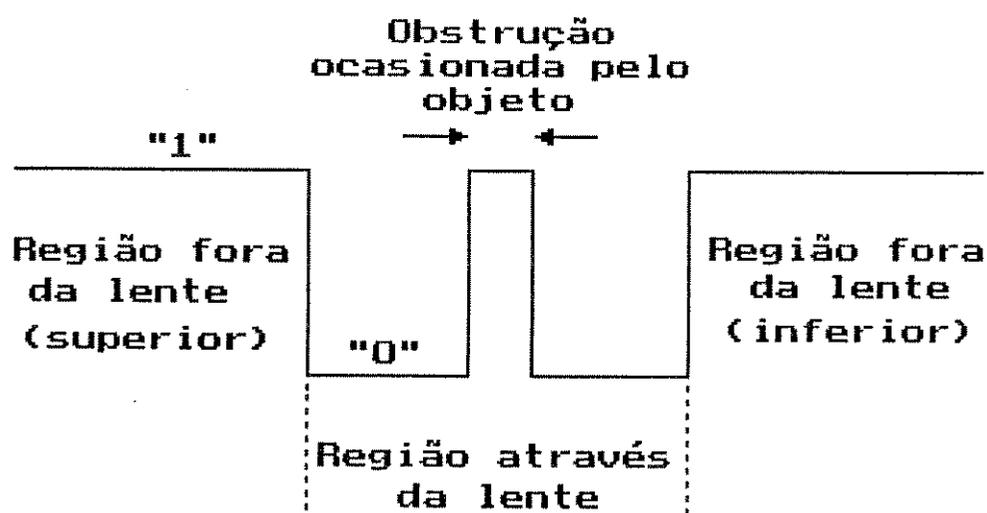


Figura 2.2 - Regiões percorridas pelo feixe laser.

Existem diferenças entre as duas formas de onda obtidas na descida e na subida do feixe, devidas à diferença de velocidades do motor de passo em seus movimentos ascendente e descendente. O sistema de controle seleciona apenas o sinal referente à descida do feixe, enquanto o filtro digital seleciona apenas o pulso referente à obstrução do objeto (ver figura 2.3).

A lógica de controle recebe um sinal de *READY* (pronto) do microprocessador, sem o qual não permite a passagem de nenhum outro pulso. Esse sinal serve para compatibilizar o tempo de processamento do sinal com a aquisição de um novo pulso referente ao valor do diâmetro do objeto. O diagrama em blocos da lógica de controle (que utiliza dois fototransistores localizados nas bordas da lente colimadora) e do filtro digital se encontra na figura 2.4.

O pulso referente ao diâmetro do objeto que está sendo medido é enviado como habilitação de um contador de 16 bits (65536 contagens), trabalhando com um relógio de 18,432 MHz. Ao fim do pulso a contagem fornecida é lida pela UCP e convertida convenientemente em milímetros, sendo então enviada ao mostrador. O medidor de diâmetro utiliza um laser semiconductor (Apêndice B) que possui um circuito de controle cuja realimentação possibilita uma potência constante, independentemente da temperatura ambiente ou do desgaste físico do componente.

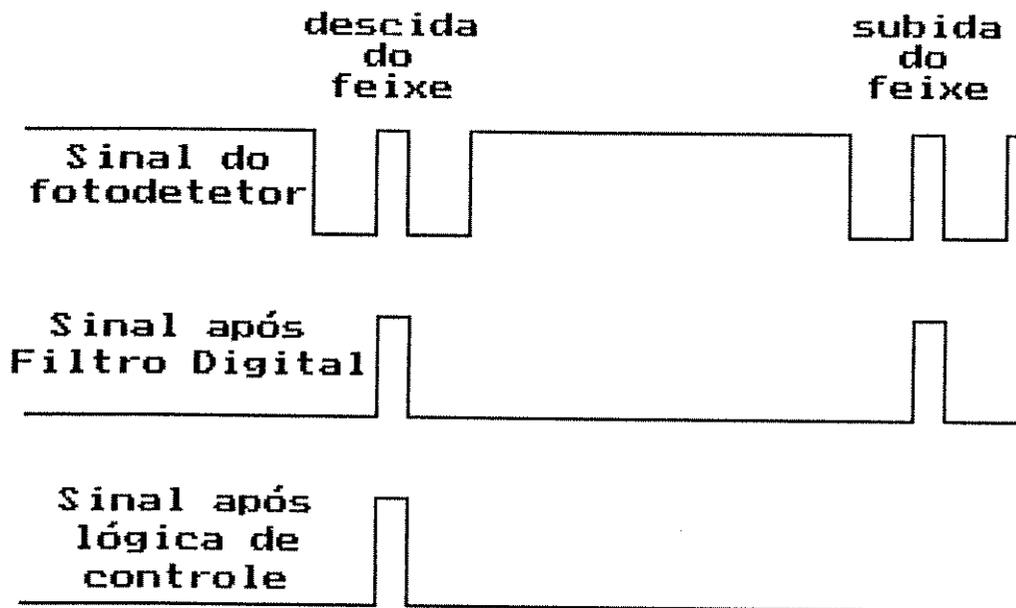


Figura 2.3 - Seleção do sinal.

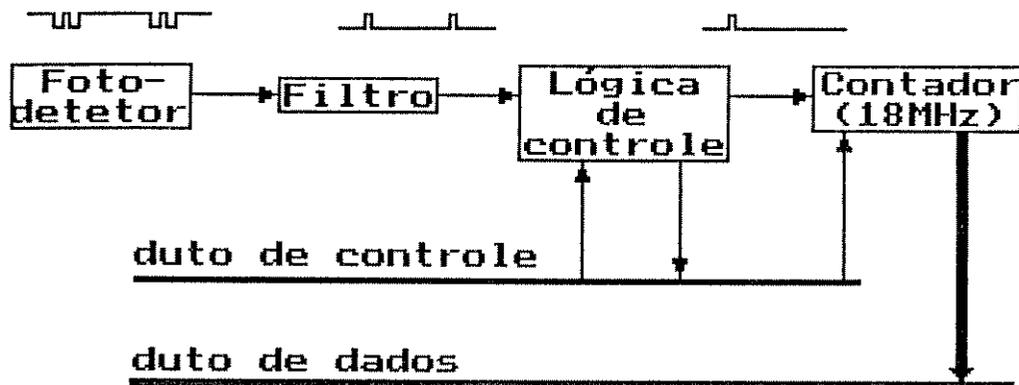


Figura 2.4 - Tratamento do pulso.

Uma potência de saída constante é essencial ao medidor pois caso contrário o ponto de ativação do comparador mudaria, visto que o fotodetector saturaria em tempo diferente ocasionando uma variação na medida do diâmetro do mesmo objeto. O ponto de acionamento é ajustado no comparador (figura 2.5), no qual controla-se a tensão de referência. O circuito também atua como um deslocador de nível.

O sistema óptico, formado pelas lentes colimadora e convergente, pelos espelhos e pelas janelas está descrito no Apêndice C.

2.1.2 - Espessura do Feixe e Disparo do Fotodetector

Há ainda o problema de que o feixe não é delgado, apresentando um diâmetro de cerca de 1 mm, além do fato de não ser circular (vide Apêndice B). O circuito do fotodetector, através de seu ajuste, seleciona o disparo/corte para uma pequena parcela do feixe total.

Este ajuste define a sensibilidade da saída do circuito do fotodetector. A figura 2.6 ilustra o feixe laser percorrendo um determinado objeto. Em (a) a parcela do feixe não obstruída pelo objeto ainda é suficiente para sensibilizar o fotodetector. Ao passar por (b), a pequena fração do feixe deixa de ser suficiente para ativar o fotodetector que só voltará a se sensibilizar em (e).

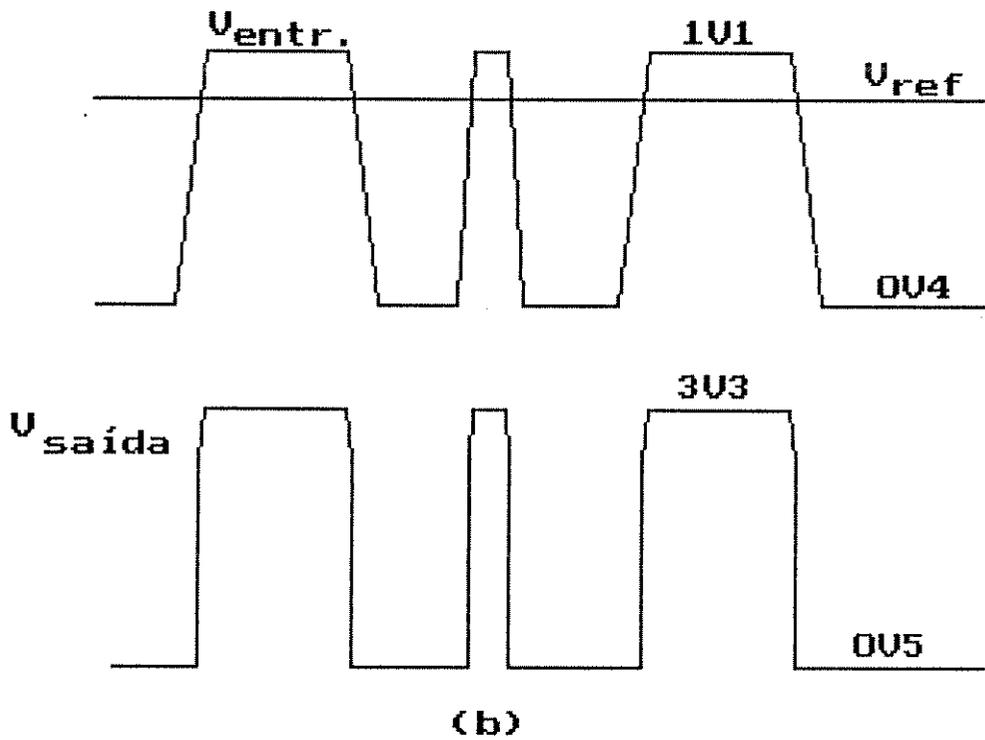
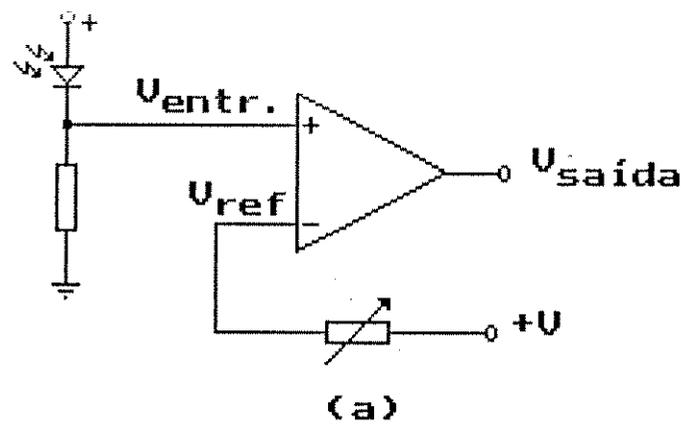


Figura 2.5 - a) Circuito de comparação.

b) Saída do Comparador.

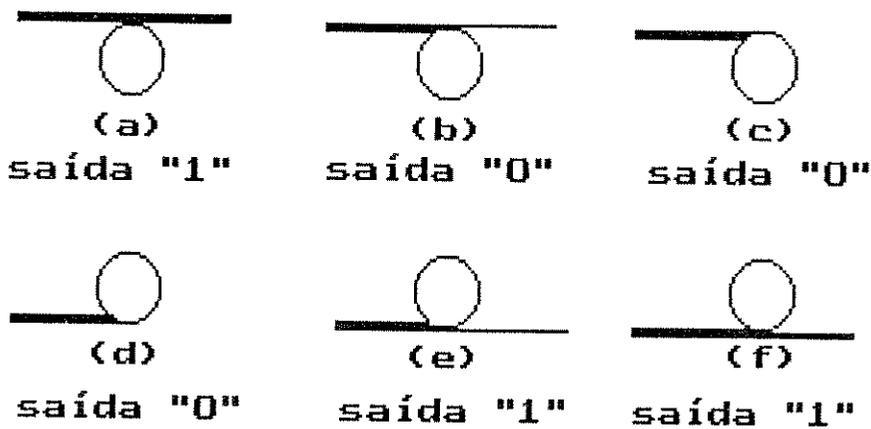


Figura 2.6 - Posições do feixe numa varredura descendente.

2.1.3 - Características da velocidade de varredura

Para se obter a varredura do feixe a mais constante possível utiliza-se um motor de passos (Apêndice C), acionado para se conseguir uma deflexão total de 36° . Deste total, somente $4,4^{\circ}$ correspondem à varredura na lente colimadora.

Depois de dado o pulso no motor de passos, este sofre uma aceleração (Figura 2.7 - região A) até atingir uma velocidade constante (região B), no fim da qual desacelera (região C). Procurou-se fazer coincidir, através do ajuste da posição do motor de passos, a região de velocidade constante com a região na qual será varrida a lente colimadora. Obtendo-se esse ajuste e utilizando-se apenas uma pequena porcentagem da varredura total (cerca de 12%), procurou-se garantir uma velocidade constante para o funcionamento do medidor. Outro cuidado para se manter a velocidade constante encontra-se na frequência de relógio com a qual se excita o motor de passos. Se essa frequência sofrer variações a pequena região utilizada como sendo de velocidade constante pode mudar, e se deslocar para uma outra região onde o movimento de rotação não se faz de forma constante.

A frequência deste relógio é a frequência de varredura do sistema. Quanto maior essa frequência, maior será o número de medidas que se poderá realizar num determinado intervalo de tempo.

A velocidade de varredura limita a precisão da medida no sentido de que, quanto maior seu valor, maior terá de ser o valor do relógio dos contadores para se obter um mesmo número de contagens.

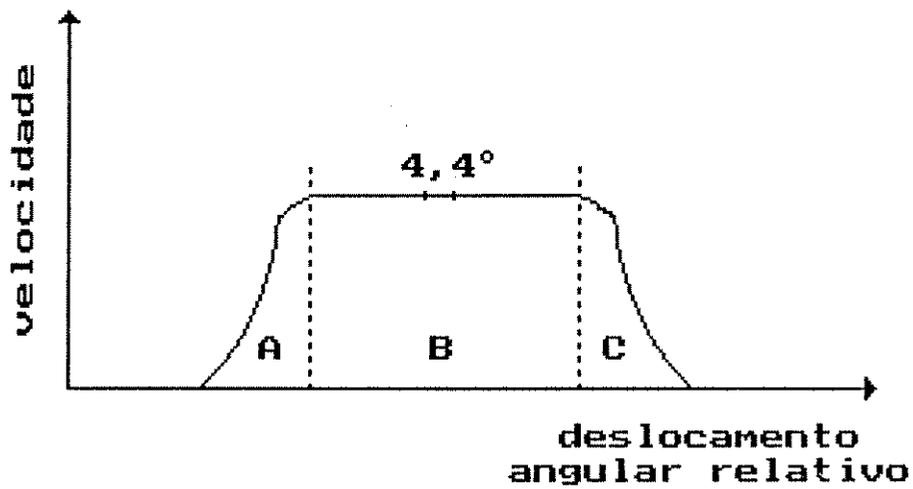


Figura 2.7 - Gráfico velocidade x deslocamento.

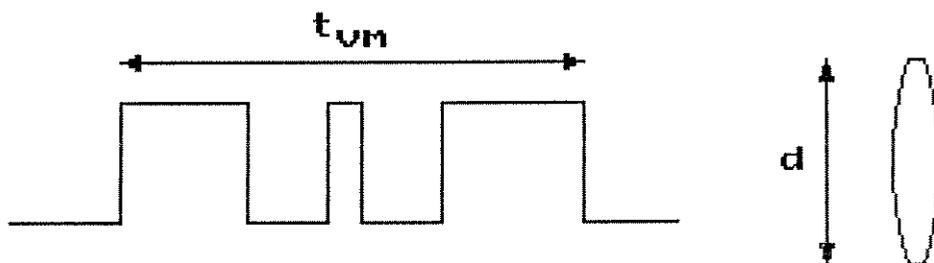


Figura 2.8 - Durante o tempo de varredura da medida (tvm) o feixe percorre o diâmetro "d" da lente.

2.1.4 - Resolução da medida

A resolução está relacionada com o número de contagens possíveis (mediante determinada velocidade de varredura) durante o pulso correspondente ao diâmetro do objeto. Quanto mais elevada for a contagem maior a resolução alcançada.

A resolução é a razão entre a velocidade de varredura e a frequência do contador. A frequência do contador possui um valor conhecido e bem determinado e a velocidade de varredura é calculada utilizando-se a forma de onda no fotodetector observada no osciloscópio (Figura 2.8).

Sabendo-se o diâmetro d da lente e medindo-se o tempo t_{vm} pode-se calcular a velocidade de varredura V_{var} :

$$V_{var} = (d / t_{vm})$$

eq. 2.1.4.1

A resolução será dada por:

$$\text{Resolução} = (V_{var}/f_{\text{contador}}) = [d / (t_{vm} \cdot f_{\text{contador}})]$$

eq. 2.1.4.2

Para o medidor desenvolvido tem-se os seguintes valores:

$$d = 35 \text{ mm} \quad f_{\text{contador}} = 18,432 \text{ MHz}$$

$$t_{vm} = 0,7 \text{ ms}$$

Fornecendo uma resolução de :

$$\text{Resolução} = \frac{35.10^{-3}}{7.10^{-4} \cdot 18,432.10^6} = 2,71.10^{-6} \text{ m}$$

Se a frequência do contador fosse 24MHz (limite máximo nominal do contador) obter-se-ia:

$$\text{Resolução} = 2,08 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

Por medida de segurança optou-se por uma frequência um pouco mais baixa, pois a perda da contagem de alguns pontos comprometeria uma medida segura, além do fato de 18,432 MHz ser um valor de frequência de cristal oscilador encontrado com facilidade no mercado nacional.

2.2 - Hardware

2.2.1 - UCP e memórias.

O sistema baseia-se no Z80, que é um microprocessador de 8 bits, operando a uma frequência de relógio de 2,304 MHz (circuito 1). Possui ligação padrão com as memórias RAM (6116 - 2K de memória) e EPROM (2732 - 4K de memória).

O circuito 1 assim como todos os circuitos referidos no item 2.2 encontram-se no APÊNDICE F.

O *software* monitor (a ser descrito posteriormente) contido na EPROM atua sobre todo o sistema, analisando e processando os dados colhidos.

Nos últimos 10 bytes desta memória estão contidos determinados valores indicativos para uma correta "auto-calibração" do valor medido. O *software* faz correções usando esses dados como padrões de comparação.

Esses dados foram obtidos com o medidor funcionando em condições ideais de temperatura (22 °C) quando são feitas medidas de blocos-padrão (Capítulo III). Em condições adversas o próprio programa corrige a medida de modo a compensar a variação do diâmetro com a temperatura ambiente.

Os endereços da EPROM usados e sua função estão na tabela 2.2.1. A descrição de cada uma das constantes será feita no item 2.2, que trata do *software*.

A memória RAM é utilizada para guardar resultados temporários do processamento das diversas variáveis que o sistema faz uso. Na tabela 2.2.2 encontram-se os endereços das variáveis do sistema.

2.2.2 - Lógica de seleção

Dois decodificadores 74LS138 realizam a seleção de endereços do sistema (circuito 2). O acesso aos dispositivos é feito através de endereçamento de memória. A escolha destes foi determinada a fim de se poder utilizar um emulador para testes funcionais baseado no microcomputador TK82C.

A tabela 2.2.3 ilustra os endereços e seus respectivos conteúdos.

ENDEREÇO	CONSTANTE
H07FF	INDICATIVA
H07FC - H07FE	ORIGINAL
H07F9	ADITIVA
H07F6 - H07F8	MULTIPLICATIVA

Tabela 2.2.1 - Constantes do sistema.

ENDEREÇO	VARIÁVEL
H17FF a H17EB	stack pointer
H17EA a H17E8	resto-1
H17E7 a H17E5	multiplicador
H17E4 a H17E2	multiplicando
H17E1 a H17DD	resto-2
H17DC a H17D8	dividendo-1
H17D7 a H17D3	divisor-1
H17D2 a H17D1	resto-3
H17D0 a H17CF	dividendo-2
H17CE a H17CD	divisor-2
H17CC a H17CB	mínimo
H17CA a H17C9	máximo
H17C8 a H17C6	nova
H17C5	contador geral
H17C4 a H17C3	valor-milímetro
H17C2	contador aux.

Tabela 2.2.2 - Variáveis do sistema.

ENDEREÇO SELECIONADO	DISPOSITIVO ACIONADO
H0000 - H0FFF	EPROM
H1000 - H17FF	RAM
H1800 - H1FFF	RAM (expansão)
H2000 - H27FF	WR STANDARD
H2800 - H2FFF	RD STANDARD
H3000 - H37FF	READ COUNTER
H3800	DISPLAY 0
H3801	DISPLAY 1
H3802	DISPLAY 2
H3803	DISPLAY 3
H3804	RD EN COUNTER
H3805	EN FENDA
H3806	ALARME
H3807	RESET COUNTER

Tabela 2.2.3 - Mapeamento do sistema.

2.2.3 - Leitura das chaves digitais.

Utiliza-se 8 chaves digitais de saída BCD. Quatro delas indicam o valor mínimo e quatro indicam o valor máximo.

O microprocessador, num ciclo de escrita, endereça as chaves (H2000) e conforme a configuração do byte de dados acessa cada uma das chaves individualmente. Em seguida, num ciclo de leitura (endereço H2800), lê o valor da chave selecionada. A chave é lida quando o bit correspondente no byte escrito é "1". Somente é permitida uma leitura de cada vez. O byte de dados possui a correspondência com as chaves digitais como mostrado na figura 2.2.1.

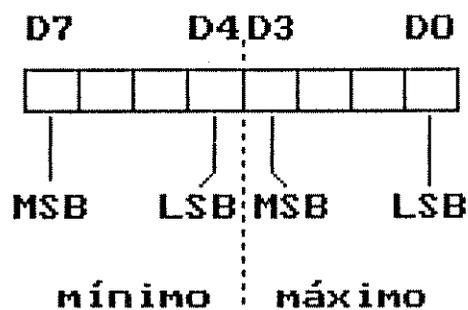


Figura 2.2.1 - Correspondência entre os bits do byte escrito e as chaves digitais.

O circuito de leitura dos valores limites (circuito 3) utiliza dois "buffers" (74LS75) para manter o valor do byte escrito, ou seja, a seleção da chave digital. A leitura é feita através de um "buffer tri-state" ligado ao barramento de dados (74LS365). O conjunto de diodos é usado para evitar curtos entre as chaves.

2.2.4 - Circuito do mostrador de 7 segmentos.

O conjunto de quatro mostradores digitais de 7 segmentos, anodo comum, utilizado como mostrador do valor em milímetros do diâmetro medido, é controlado através dos decodificadores BCD-7 segmentos (74LS47).

Cada mostrador possui um endereço que seleciona um *buffer* (74LS75) que retém o dado na entrada do decodificador correspondente, apresentando assim esse valor no mostrador (circuito 4). Os endereços de seleção estão na tabela 2.2.3 (item 2.2.2). O mostrador 0 é o menos significativo enquanto que o mostrador 3 é o mais significativo.

2.2.5 - Fonte e circuito de controle do laser

A potência de saída do laser semiconductor sofre flutuações devidas à variação de temperatura ambiente. Em virtude desse problema, utiliza-se um circuito de controle automático de potência (CAP). Através de uma realimentação fornecida pelo fotodetector construído conjuntamente com o diodo laser, a potência de saída é mantida constante mesmo com variações de temperatura (vide circuito 5).

2.2.6 - Circuito do sistema vibracional refletor.

O acionador do motor de passos é feito por um único integrado (XR2003). Este integrado possui uma corrente de saída de 500mA.

O relógio de alimentação do motor de passos é obtido a partir de sucessivas divisões da frequência gerada pelo cristal de 3,575611 MHz. Após as divisões o relógio passa a 43Hz, que é a frequência de varredura do sistema.

No circuito 6 encontra-se o esquema elétrico de controle do motor de passos. No eixo de rotação do motor há um suporte mecânico com um espelho que reflete o feixe laser.

2.2.7 - Lógica de controle e filtro digital.

A lógica de controle e o filtro digital selecionam apenas o pulso correspondente ao diâmetro do objeto que está sendo medido. O circuito também possui uma lógica baseada no flip-flop 7474 que não permite o envio de outro pulso ao contador sem que o anterior já tenha sido processado (vide circuito 7).

2.2.8 - Contador de 16 bits.

Um contador de 16 bits registra o número de pontos possíveis dentro do tempo do pulso selecionado. O circuito do relógio necessita de um *lay-out* cuidadoso para evitar ruídos indesejáveis. Trabalha com uma frequência de 18,432 MHz.

O latch 74LS245 liga-se diretamente ao barramento de dados para que se possa ler o valor total da contagem (endereço H3001 para o LSB e H3002 para o MSB).

No circuito 8 encontra-se o esquema elétrico do relógio e do contador de 16 bits.

2.2.9 - Alarme.

O alarme é um monoestável ligado a uma sirene que emite um som característico com duração de cerca de 1 segundo. O endereçamento da posição H3806 da memória é suficiente para dispará-lo.

O monoestável utiliza uma configuração padrão do integrado LM555, cuja corrente de saída é suficiente para acionar a sirene (vide circuito 9).

2.2.10 - Fontes de alimentação.

Todas as tensões de alimentação, obtidas da rede retificada e filtrada por capacitores eletrolíticos, são reguladas por integrados das linhas 78XX e 79XX. Estes integrados reguladores são largamente empregados na alimentação de circuitos lógicos possuindo as características de saída requeridas.

O circuito 10 traz a configuração básica do integrado sendo que para cada tensão regulada utiliza-se o regulador de tensão correspondente.

O principal quesito para o funcionamento do regulador é que a tensão na sua entrada seja pelo menos 3V maior que a tensão a ser regulada.

2.3 - Software

O *software* foi totalmente desenvolvido em linguagem Assembly do microprocessador Z80. A principal dificuldade encontrada deveu-se às operações aritméticas envolvidas na conversão das contagens em milímetros. Para se obter a precisão e rapidez necessárias nos cálculos optou-se por multiplicar os valores iniciais por potências de 10 e, depois de efetuadas as operações, recuperar o resultado dividindo-o pela potência de 10 adequada. Isto tornou os tempos de cálculos suficientemente pequenos para acompanhar o tempo de aquisição de dados. Evitamos o uso de operações aritméticas com ponto flutuante pois, além de complexas, possuem um tempo de processamento relativamente grande quando comparado com o tempo de aquisição.

Uma consequência da opção pela multiplicação por potência de 10 foi o fato de que os valores envolvidos tornaram-se de grande magnitude, exigindo subrotinas capazes de comportar tais valores. Como exemplo citamos a subrotina de divisão de 5 bytes por 5 bytes, capaz de dividir um número da ordem de 10^{12} por outro número da mesma magnitude num tempo de cerca de 11 ms (com o relógio do Z80 em 2,304 MHz). Temos também a subrotina de multiplicação de 3 bytes por 3 bytes que multiplica um número da ordem de 10^7 por outro de 10^7 em 4 ms (para um mesmo tempo de relógio da CPU). O tempo entre duas amostragens é de 23 ms. O *software* realiza uma média de 16 medidas antes de converter a contagem referente ao diâmetro em milímetros. E a cada 8 conversões faz uma média de 16 medidas do valor da fenda para a "autocalibração" do valor.

2.3.1 - "Autocalibração" do valor medido

Com a mudança da temperatura ambiente ocorre uma mudança nas constantes do sistema. A principal delas é o valor da velocidade da varredura. A variação da temperatura no motor de passos provoca uma modificação na sua velocidade de rotação. Essa mudança é suficiente para provocar uma diferença significativa no valor em milímetros apresentado no mostrador.

Para se contornar esse problema o *software* faz uma "autocalibração" a cada 8 conversões das medidas. A calibração inicial do sistema consiste em relacionar o valor do bloco-padrão medido com a contagem final do contador. Isto é feito à temperatura na qual o fabricante do bloco-padrão garante sua precisão ($\pm 0,01 \mu\text{m}$ no caso em que esse medidor foi calibrado). Nestas condições também é registrado o número de contagens correspondente ao pulso total (varredura total do feixe pela lente). Na realidade, existe uma fenda em frente da primeira lente que limita a varredura em 35 mm (ver Figura 2.3.1).

O material (fenolite) com o qual foi construída a fenda possui um pequeno coeficiente de dilatação térmica, causando uma variação insignificante no intervalo de temperatura de trabalho do medidor (0 a 40 °C).

O valor da contagem correspondente à t_{fenda} (figura 2.3.2) é gravado na EPROM (posição H17FC a H17FE). Esse valor é utilizado para a "autocalibração" da medida em outras temperaturas. Após 8 conversões completas enviadas ao mostrador (a cada 3,5 s) o *software* faz uma média de 16 medidas do valor da fenda (essa média é denominada NOVA).

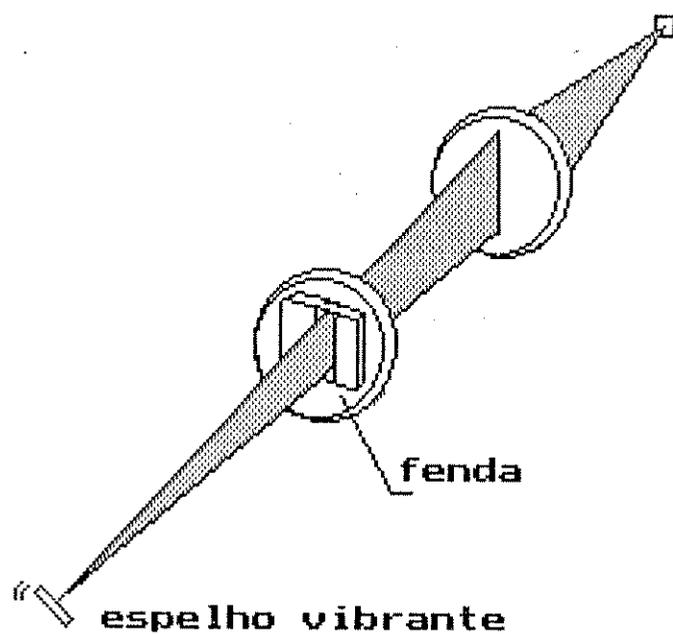


Figura 2.3.1 - Fenda em placa de fenolite

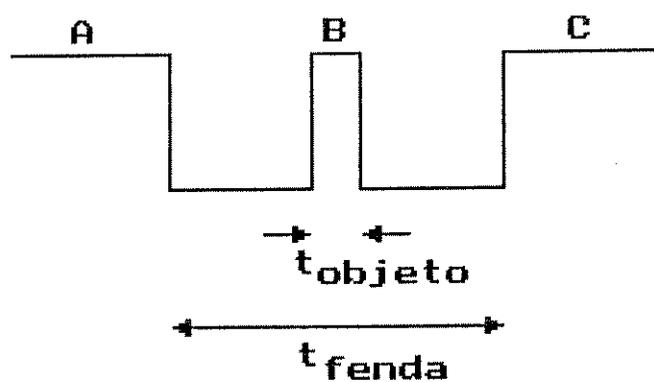


Figura 2.3.2 - Sinal do fotodetector:

A e C: região fora da fenda.

B: região através da fenda.

As próximas 8 conversões utilizarão a razão entre a constante ORIGINAL e a variável NOVA para ajustar qualquer mudança ocorrida:

$$\text{valor_milímetro corrigido} = \frac{\text{ORIGINAL}}{\text{NOVA}} \times \text{valor_milímetro}$$

eq. 2.3.1

Supondo-se que a temperatura mudou de forma a diminuir a velocidade de varredura, o valor de NOVA e de valor_milímetro serão maiores, visto que haverá uma maior contagem de pontos. O quociente (ORIGINAL/NOVA) será menor que a unidade, corrigindo o valor do diâmetro do objeto (valor_milímetro) para menos e de forma proporcionalmente correta. Este procedimento garante que mesmo para grandes variações de temperatura o valor apresentado no mostrador seja corrigido satisfatoriamente, mantendo a precisão da medida.

2.3.2 - Curva de calibração

Quando se efetua a calibração várias correspondências entre o valor do bloco-pradrão em milímetros e o número de contagens são realizadas. A partir desses dados traça-se uma curva (valor real x número de contagens) que será usada na conversão do número de contagens correspondente ao objeto num valor em milímetros, como indicado na figura 2.3.3.

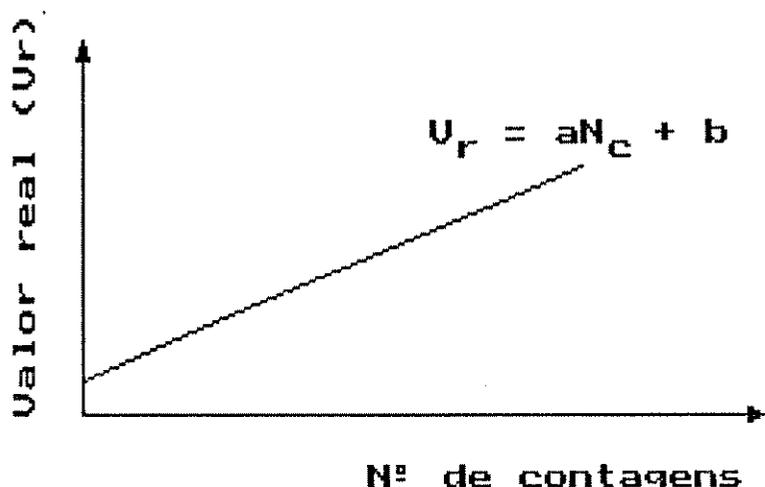


Figura 2.3.3 - Curva V_r x N_c traçada a partir dos dados de calibração

Uma vez conhecida a curva V_r x N_c determina-se os coeficientes **a** e **b**. No processo de conversão o microprocessador lê o valor da contagem, multiplica-o pelo valor de **a**, e soma-o com **b**. O valor encontrado corresponde ao diâmetro do objeto em milímetros. Após cada conversão o valor é "autocalibrado" (para compensação da temperatura) e em seguida enviado ao mostrador.

O coeficiente **a** é denominado constante MULTIPLICATIVA e **b** constante ADITIVA (pode ser negativa). Juntamente com a ORIGINAL, esses valores são gravados na EPROM nos endereços já especificados na tabela 2.2.1. A constante INDICATIVA indica se a constante ADITIVA deve ser somada ou subtraída.

O software monitor só é gravado em EPROM após determinada a curva de calibração do aparelho pois as constantes acima mencionadas devem permanecer em memória não volátil. Caso contrário, a cada desligamento do aparelho ter-se-ia que entrar novamente com essas constantes, tornando sua utilização incômoda, além de exigir um dispositivo para a entrada dos dados.

2.4 - Módulos e acessórios mecânicos

O medidor se divide em duas partes : módulo de controle e módulo de varredura.

O módulo de controle contém as fontes de alimentação, a placa da UCP e memórias, o circuito do mostrador e das chaves digitais. Na figura 2.4.1 encontram-se esboços frontal e traseiro deste módulo.

O circuito de controle do motor de passos e do laser semiconductor se encontram no módulo de varredura (figura 2.4.2).

O cabo de interconexão entre os dois módulos provê a alimentação necessária ao módulo de varredura e transmite os sinais dos detetores de sincronismo e do fotodetector . O cabo é blindado, possuindo 10 vias e comprimento total de 7 metros. É ligado através de um conector circular de 15 vias com a pinagem mostrada na tabela 2.4.1.

As caixas dos módulos são vedadas a fim de proteger a parte óptica de eventuais contaminações, o que certamente afetaria suas características. A vedação do módulo de controle também é necessária visto que a reação química com elementos corrosivos presentes em alguns ambientes industriais podem afetar os contatos elétricos do sistema.

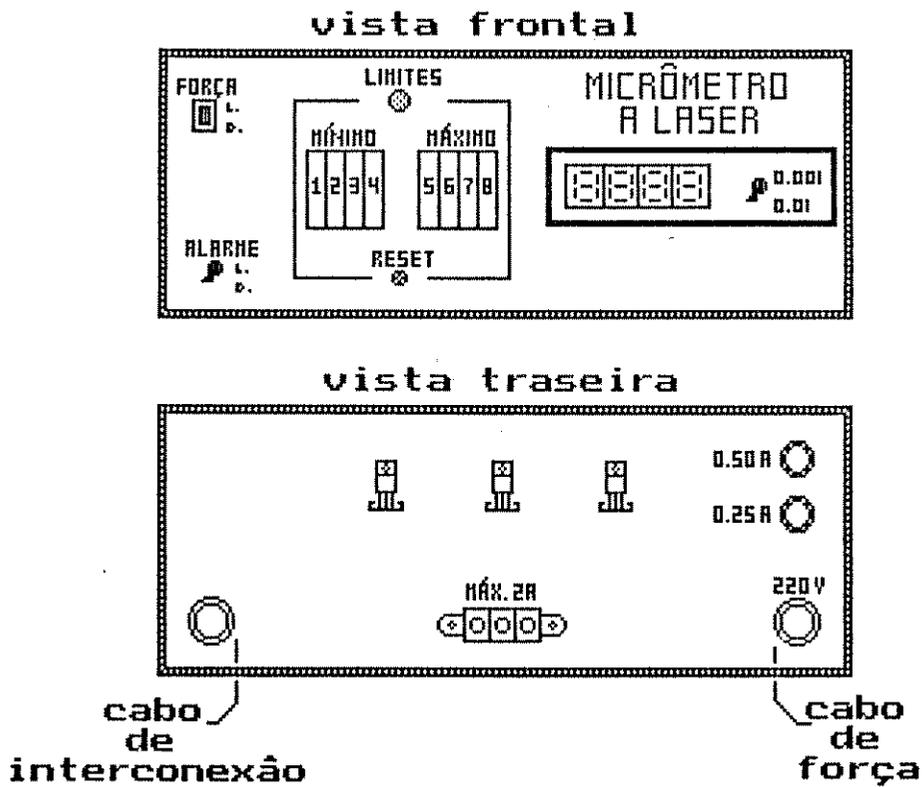


Figura 2.4.1 - Módulo de controle.

COR	PINO	FUNÇÃO
branco	1	-17V
vermelho	12	+17V
preto	13	-
roxo	11	pulso do diâmetro
cinza	6	-
verde	3	sinc. superior
azul	4	sinc. inferior
laranja	15	+34V
terra(cord.)	9+7	terra
preto	1	50V
preto	2, 10	+13V

Tabela 2.4.1 - Mapa de ligação do conector.

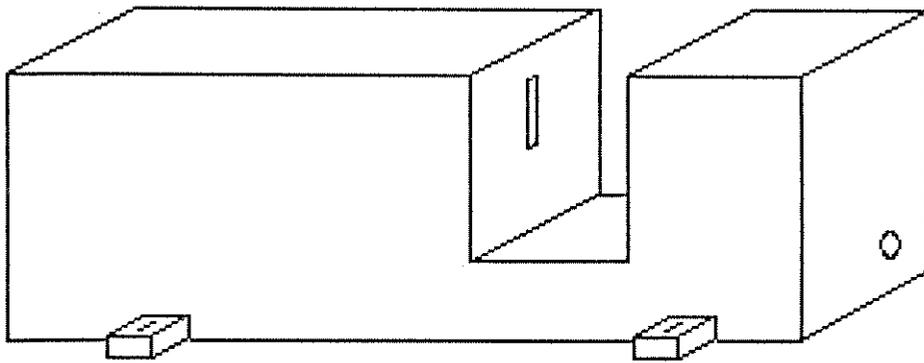


Figura 2.4.2 - Módulo de varredura.

CAPÍTULO III

Medidas e Caracterização

3.1 - Calibração

A uma temperatura constante (22 °C) e utilizando-se blocos-padrão de precisão de 0,01µm (garantida pelo fabricante à temperatura acima mencionada), foram medidos 20 padrões de diferentes tamanhos variando de 0,5 a 30 mm.

Para se obter uma boa calibração foi desenvolvido um *software* específico que apresenta no mostrador o número de contagens correspondente ao diâmetro do objeto que está sendo medido. O *software* também fornece o valor total da contagem correspondente à fenda.

A cada padrão associa-se o valor da contagem sendo que este valor é obtido após uma média de 16 medidas. Ao término das 20 medidas traça-se a curva $V_{\text{real}} \times N_{\text{cont}}$ de onde determina-se os parâmetros da curva mostrada na figura 3.1.1.

3.2 - Caracterização

A partir do gráfico da figura 3.1.1 extraiu-se os seguintes valores para as constantes da curva:

$$V_r = 0,04327636 + 0,00285856 \cdot N_c$$

$$\text{Coeficiente de correlação} = 0,99999982$$

Conseqüentemente as constantes gravadas na EPROM do monitor são:

ADITIVA = 432

ORIGINAL = 12199

MULTIPLICATIVA = 285856

INDICATIVA = 1

medida	valor nominal	n ^o de contagens do bloco	n ^o de contagens da fenda
1	1,000	364	12185
2	1,004	366	12188
3	1,020	371	12194
4	1,040	378	12195
5	1,080	393	12196
6	1,100	400	12196
7	1,300	470	12197
8	1,500	540	12200
9	1,700	609	12198
10	1,900	680	12199
11	2,000	715	12200
12	2,500	889	12204
13	3,000	1064	12202
14	3,500	1239	12204
15	4,000	1415	12203
16	4,500	1590	12206
17	5,000	1764	12203
18	5,500	1941	12207
19	6,000	2114	12208
20	7,000	2464	12208
			média: 12199

Tabela 3.1.1 - Dados obtidos para a calibração.

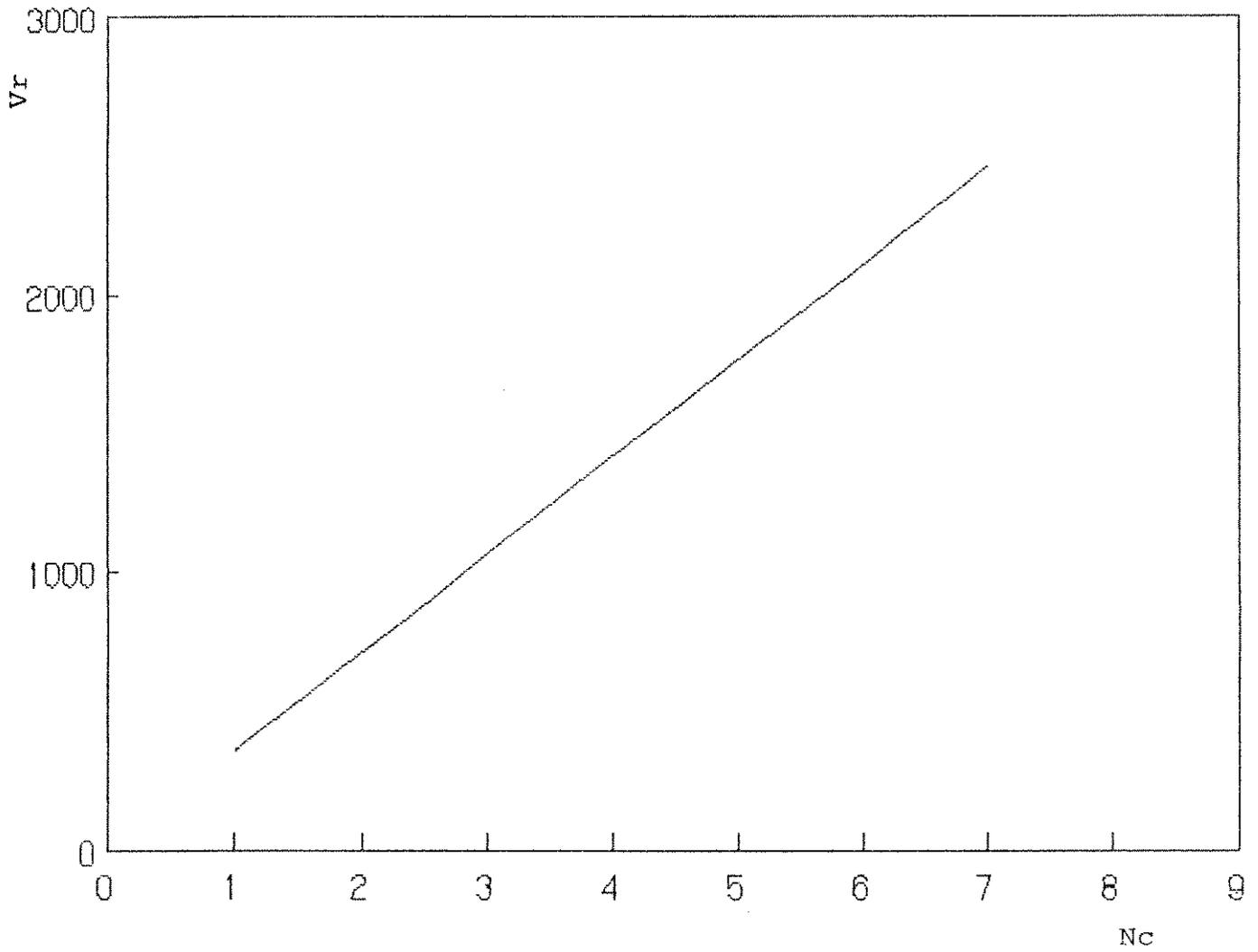


Figura 3.1.1 - Curva V_r X N_c .

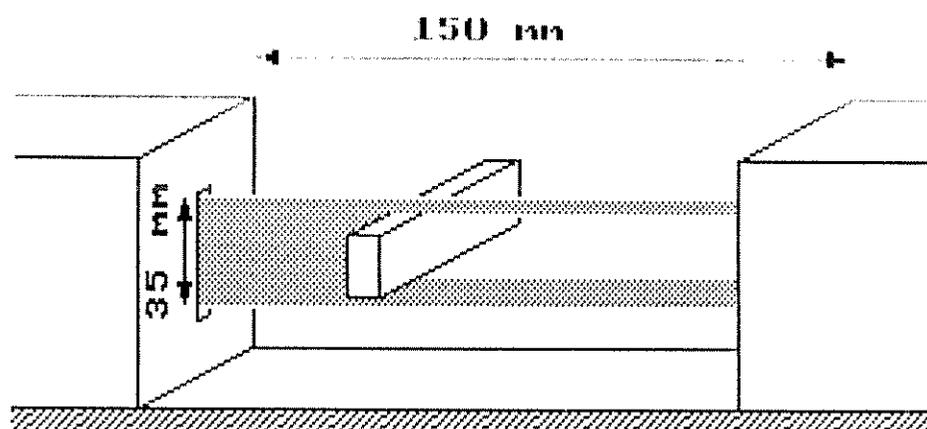


Figura 3.2 - Região espacial utilizada para a calibração.

Todas estas medidas foram obtidas com o objeto estando no centro da região entre as duas janelas.

A diferença da medida entre os limites horizontais é de no máximo 2 μm e entre os limites verticais (abertura da fenda) é de no máximo 3 μm . A repetibilidade de uma mesma medida restringe-se a $\pm 1 \mu\text{m}$, sendo esta variação a mesma para a resolução do aparelho. Em resumo, as características do aparelho para medidas realizadas na região central são:

faixa de medidas: 0,5 a 35 mm

resolução: $\pm 1 \mu\text{m}$

repetibilidade: $\pm 1 \mu\text{m}$

precisão: $\pm 3 \mu\text{m}$

Tabela 3.1.2 - Características do medidor a laser.

3.3 - Testes funcionais

O protótipo do medidor a laser permaneceu trabalhando 24 horas por dia (salvo nos fins de semana) durante 4 meses, sem apresentar problemas de funcionamento ou erros de medida. Foi utilizado em uma fábrica de condutores elétricos no controle de qualidade do diâmetro de fios em tempo real, na saída de extrusoras. Houve uma economia de matéria prima (PVC e TEFLON usados para revestir o fio de cobre) da ordem de 10% (valor calculado pelos próprios técnicos da empresa). Essa economia deveu-se à possibilidade de se trabalhar com diâmetros mais próximos do mínimo permitido pelas normas de segurança.

A parte mais vulnerável do aparelho em termos de vida útil é o motor de passos. Porém, no modo que está sendo utilizado exerce um torque mínimo a uma frequência (43Hz) que é bem abaixo da máxima com que pode trabalhar (1KHz) tornando sua vida útil maior. Além disso, a "autocalibração" efetuada compensa eventuais desgastes mecânicos e/ou eletromagnéticos que porventura ocorram no motor de passos.

É desejável uma limpeza freqüente das duas janelas externas pois estas mantêm um contato direto com impurezas do ambiente de trabalho. Uma vez que a janela se apresente suja, o feixe do laser é atenuado e dispersado, alterando o ponto de disparo do fotodetector ou até mesmo não o sensibilizando.

3.4 - Modo de operação

A operação do medidor é muito simples. Basta ajustar os limites mínimo e máximo toleráveis e ligar o aparelho. Para efetuar este ajuste rotaciona-se as chaves digitais de modo a corresponder àqueles valores . Se se desejar mudar os limites após seu ligamento é necessário , além de um novo ajuste das chaves, apertar o botão de *RESET* para atualizar o sistema com os novos limites.

É interessante manter o objeto no centro da área útil de medição pois, como o aparelho foi calibrado nessas condições, garante-se a precisão anunciada. Como esse medidor foi testado na saída de uma extrusora de fios, o cabo de interconexão entre os módulos utilizados mediu 7 metros, distância entre o ponto de medida (após o resfriamento do fio) e o controle da extrusora (figura 3.4.1).

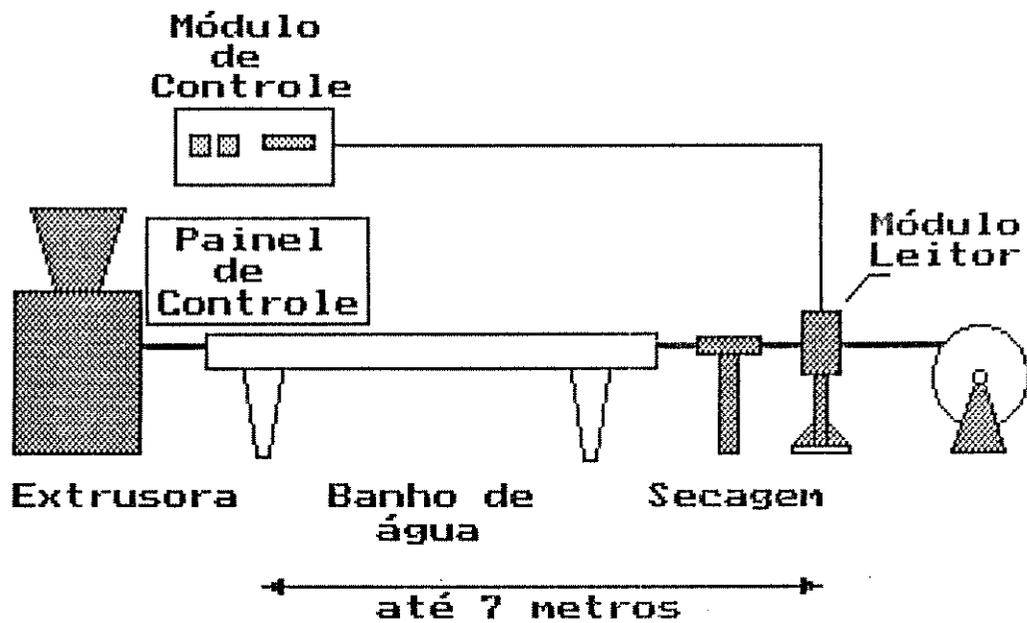


Figura 3.4.1 - Posição do medidor a laser numa extrusora convencional.

Analisando os valores apresentados no mostrador o operador da extrusora ajusta a máquina até obter o diâmetro com o qual irá trabalhar. Neste sistema, o operador é o elo final da realimentação do processo.

CAPÍTULO IV

Conclusões

4.1 - Utilização e desempenho

O medidor a laser mostrou-se muito útil em processos onde uma medida em tempo real e sem contato físico é necessária. Na aplicação estudada o uso do medidor desenvolvido apresenta precisão mais que suficiente para atuar como elemento de controle de qualidade.

Com relação à estabilidade e à confiabilidade exigidas para este tipo de equipamento, pois opera como medidor autônomo em tempo real, durante o processo de produção, podemos dizer que os objetivos pretendidos foram inteiramente alcançados. Realizamos testes de uso do medidor durante quatro meses em linha de produção sem detetar falhas ou perda de precisão.

4.2 - Proposições

Poder-se-ia, dando continuidade ao trabalho, desenvolver as interfaces e o *software* necessários para a automatização completa do processo de controle da extrusoras pois apesar da necessidade da presença constante de um operador, as máquinas modernas trabalham a altas velocidades (1000 metros/minuto), quando uma realimentação rápida e precisa torna-se necessária.

A pesquisa de técnicas de interferência, ao invés de varredura com o laser, possibilitaria o desenvolvimento de um medidor para valores menores que 0,5 mm, que também possui grande aplicação nas indústrias.

APÊNDICE A

Fotodetetores

A.1 - Fotodetector de medição.

Constitui-se no principal componente do medidor. Através dele obtém-se o pulso referente ao diâmetro do objeto que está sendo medido.

Para essa finalidade utilizamos um fotodiodo PIN de silício com tecnologia planar que apresenta baixa capacitância de junção e rápido chaveamento (SHF 206K da Siemens), cujas principais características são descritas na tabela A.1.

A.2 - Fotodetetores de sincronismo

Os dois fotodetetores de sincronismo indicam à lógica de controle se o feixe laser está fazendo uma varredura descendente ou ascendente. Neste caso um chaveamento tão rápido quanto ao do item anterior não é necessário. Devido a esse fato utilizamos fototransistores (BPW 42), cujas características elétricas apresentamos na tabela A.2.

Comprimento de onda de máxima sensibilidade: 850 nm
 Campo espectral de sensibilidade: 400 a 1000 nm
 Área sensível à radiação: 7.34 mm²
 Tempo de subida e tempo de descida(*): 350 ns
 Tensão direta: 1,3 V
 Capacitância (f=1000MHz): 72pF

(*) De 10% a 90% e de 90% a 10% do valor final.

($R_L = 1K\Omega$, $V_R = 5V$, $\lambda = 830nm$ e $I = 80 \mu A$)

Tabela A.1 - Características do SFH 206K.

Ângulo de recepção: $\pm 25^\circ$
 Potência total ($T = 55^\circ C$): 100mW
 V_{CEO} : 32 V
 $I_{CEO} < 200$ mA
 $t_{descida}$ ($V = 5$ V, $I = 5$ mA e $R = 100 \Omega$): 1,6 us
 t_{subida} ($V = 5$ V, $I = 5$ mA e $R = 100 \Omega$): 1,6 us
 Comprimento de onda de máxima sensibilidade: 830 nm

Tabela A.2 - Características do fototransistor BPW42.

APÊNDICE B

Lasers Semicondutores

B.1 - Princípio Físico

A transição de um elétron pelos níveis de energia de um átomo ou molécula é ocasionada por três diferentes processos (figura B.1).

O primeiro processo de transição ocorre quando um fóton, com o comprimento dado pela expressão:

$$l = \frac{c}{[E_2 - E_1] / h} \quad \text{equação B.1}$$

onde: l = Comprimento de onda;

c = Velocidade da luz; h = Constante de Planck;

$[E_2 - E_1]$ = diferença entre os níveis de energia,

incide num átomo que possui um elétron no nível de energia E_1 . O fóton é absorvido e o elétron transita de E_1 para E_2 , num fenômeno chamado de absorção induzida (figura B.1.a).

O segundo processo ocorre quando um átomo, que possui um elétron no nível de energia E_2 , transiciona para o nível de energia de menor energia E_1 , emitindo um fóton (com comprimento de onda dado pela equação B.1). Este fenômeno é conhecido como emissão espontânea (figura B.1.b). A luz emitida por um átomo dentro do material não possui nenhuma relação de fase com a luz emitida por outro átomo. A luz é emitida em todas as direções, originando luz incoerente.

No terceiro processo um fóton com comprimento de onda dado pela equação B.1 interage com um átomo que possui um elétron no nível de energia E_2 .

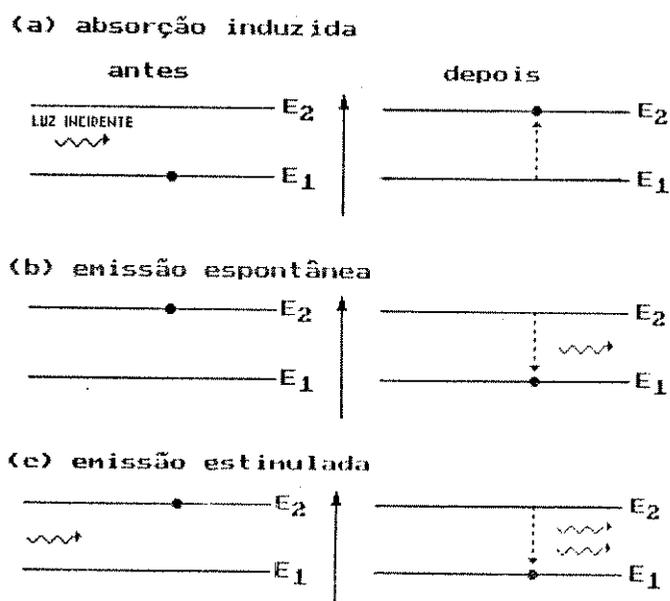


Figura B.1 - Processos de transição de um elétron.

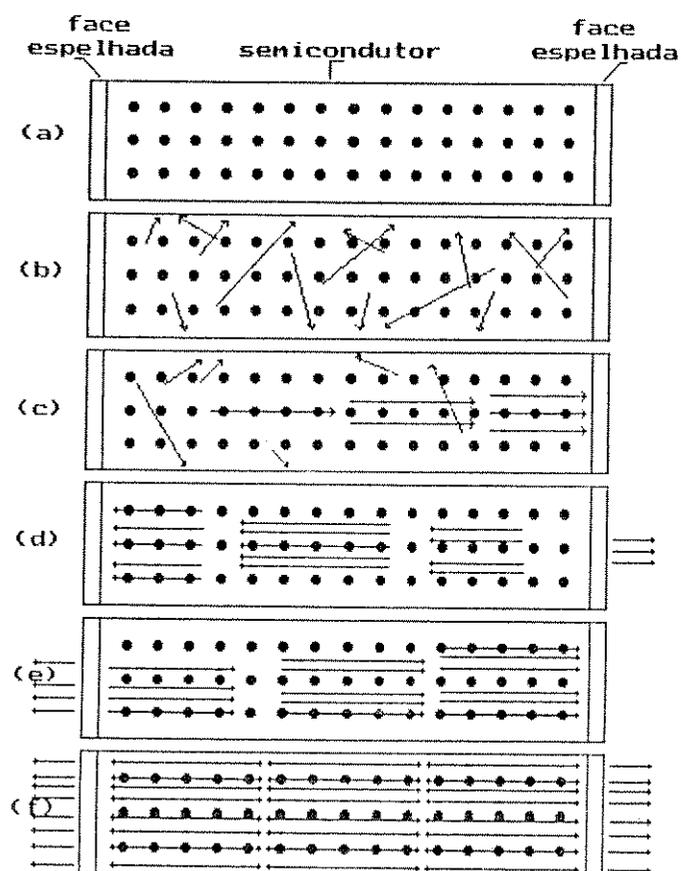


Figura B.2 - Oscilação laser.

O átomo é estimulado a emitir um segundo fóton com o mesmo comprimento de onda e a mesma fase, na mesma direção e sentido do fóton incidente, caracterizando uma emissão estimulada (figura B.1.c). A interferência construtiva desses fótons produz um feixe coerente associado com o laser ("Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation").

No equilíbrio térmico, o número de átomos do material que possui um elétron no nível de energia E_1 é sempre superior ao número de átomos com elétrons no nível de energia E_2 . Conseqüentemente, tem-se mais luz absorvida que emitida. Para se alcançar uma amplificação de luz, devem existir mais elétrons em E_2 que em E_1 . Esta inversão de população é obtida num diodo laser injetando-se corrente na junção PN. No estado de inversão de população, emissões estimuladas predominam sobre a absorção, permitindo a amplificação da luz. Para produzir um feixe laser, a oscilação laser deve não só amplificar a luz como também realimentá-la. A figura B.2.a mostra uma estrutura, conhecida como "Fabry-Perot Resonator", formada na fabricação do laser semiconductor. As faces externas do cristal semiconductor são constituídas por duas superfícies paralelas com características refletoras.

Quando na camada semicondutora, onde se forma a ressonância, há inversão de população, a luz emitida pela emissão espontânea é amplificada e repetidamente refletida pelas faces espelhadas. A luz emitida em qualquer outra direção que não seja paralela ao eixo óptico atravessa as laterais da cavidade ressonante (figura B.2.b).

A luz paralela ao eixo óptico sofre repetidas reflexões nas faces espelhadas (figura B.2.c), estimulando outras emissões e sofrendo uma amplificação (figura B.2.d-e).

A cada reflexão o feixe é parcialmente transmitido através das faces refletoras. A oscilação laser começa quando a luz amplificada torna-se igual a luz perdida pelas laterais da cavidade, pelas faces espelhadas e pela absorção do material semiconductor (figura B.2.f).

B.2 - Diodo laser de GaAlAs

O diodo laser de GaAlAs consiste de uma dupla heterojunção formada por uma camada ativa de $\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y\text{As}$ recoberta por camadas do tipo P e do tipo N de $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$, onde $x > y$ (figura B.3).

Quando uma tensão de polarização direta é aplicada, elétrons e lacunas são injetados na camada ativa. Uma vez que a energia da banda proibida é maior nas camadas que recobrem a camada ativa, os elétrons são impedidos de se difundirem através da junção pela barreira de potencial formada entre a camada ativa e as camadas que a recobrem (figura B.3.b). Os elétrons aí confinados estabelecem uma inversão de população, permitindo a amplificação da luz por emissão estimulada. A figura B.3.c ilustra o ganho de amplificação da luz através da heterojunção. O alto índice de refração da camada ativa, em relação às outras duas camadas, confina a luz emitida (figura B.3.d-e).

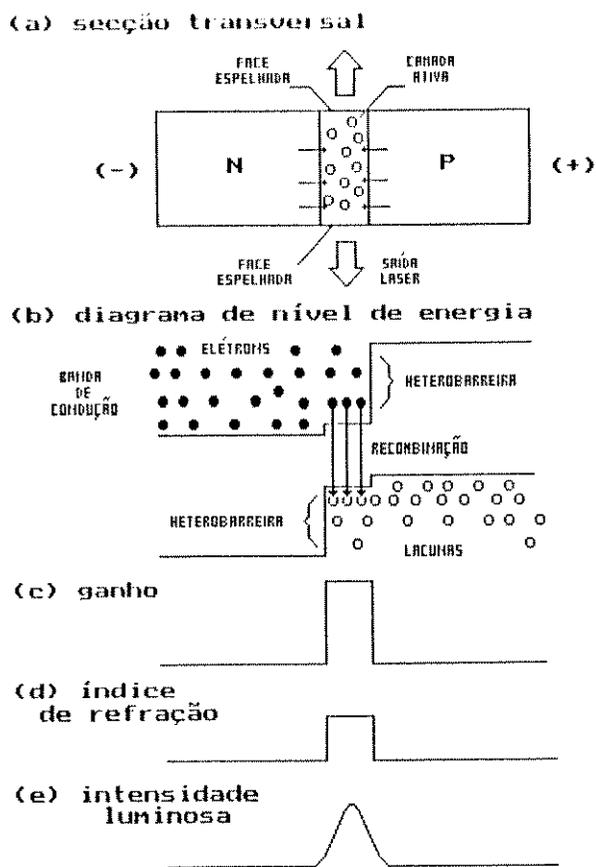


Figura B.3 - Estrutura do diodo laser de GaAlAs.

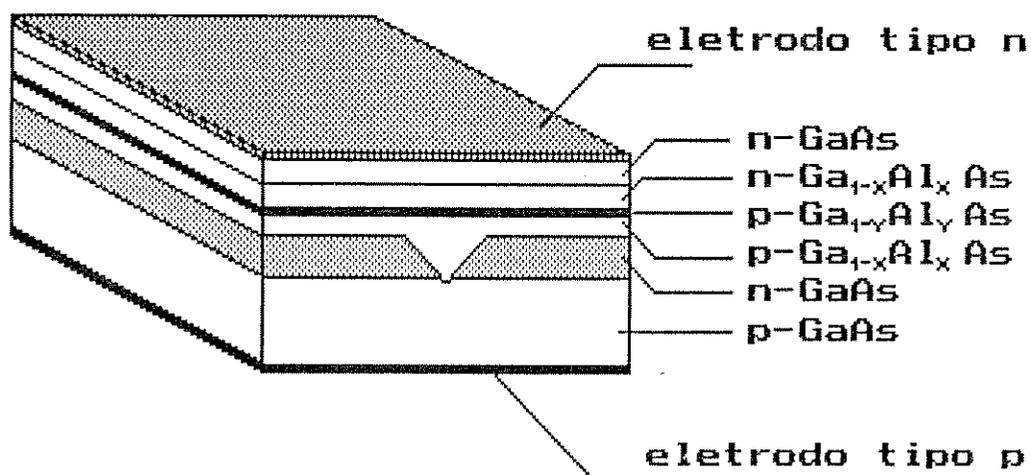


Figura B.4 - Estrutura física do diodo laser em "V".

O diodo laser utilizado no medidor possui uma forma em ∇ no substrato (figura B.4) que serve para confinar a corrente de injeção e a oscilação laser àquela faixa. Esta configuração na estrutura do substrato assegura uma operação no modo transversal fundamental, simples e estável.

B.3 - Divergência e Astigmatismo

O feixe emitido pelo diodo laser apresenta grande divergência, além de apresentar diferentes valores nas direções horizontal e vertical (figura B.5) em relação ao plano óptico da cavidade ativa.

Outro problema apresentado se refere ao astigmatismo. Quando a luz do diodo laser é focalizada por uma lente, a posição aparente do foco difere entre as direção vertical e a direção horizontal. Esta diferença entre os dois pontos é conhecida como astigmatismo (figura B.6). O diodo laser necessita de um conjunto óptico capaz de corrigir e colimar o feixe emitido (figura B.7).

As principais características do diodo laser (SHARP LT022MC) que integra o medidor estão descritas a seguir :

PARÂMETROS	MÍN	TIP	MÁX	UNIDADE
comprimento de onda	770	780	790	nm
corrente de operação		65	100	mA
$\theta \parallel$	8,5	11	16	graus
$\theta \perp$	20	33	45	graus
tempo de vida		$2 \cdot 10^5$		horas

OBS: os valores acima foram medidos a uma temperatura de 30 °C e com potência de 3 mW.

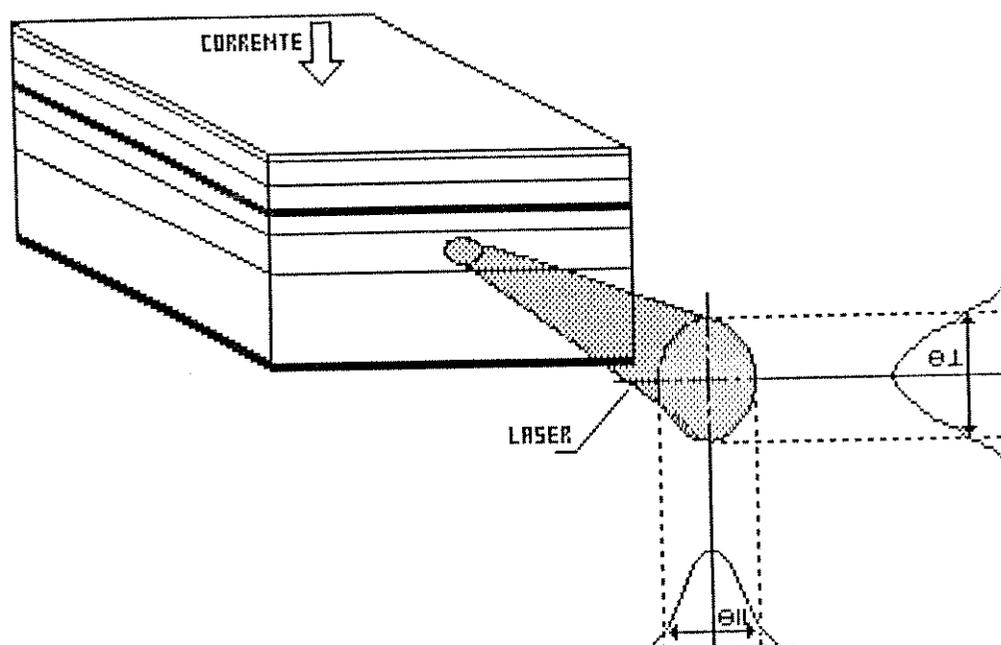


Figura B.5 - $\theta \parallel$ e $\theta \perp$

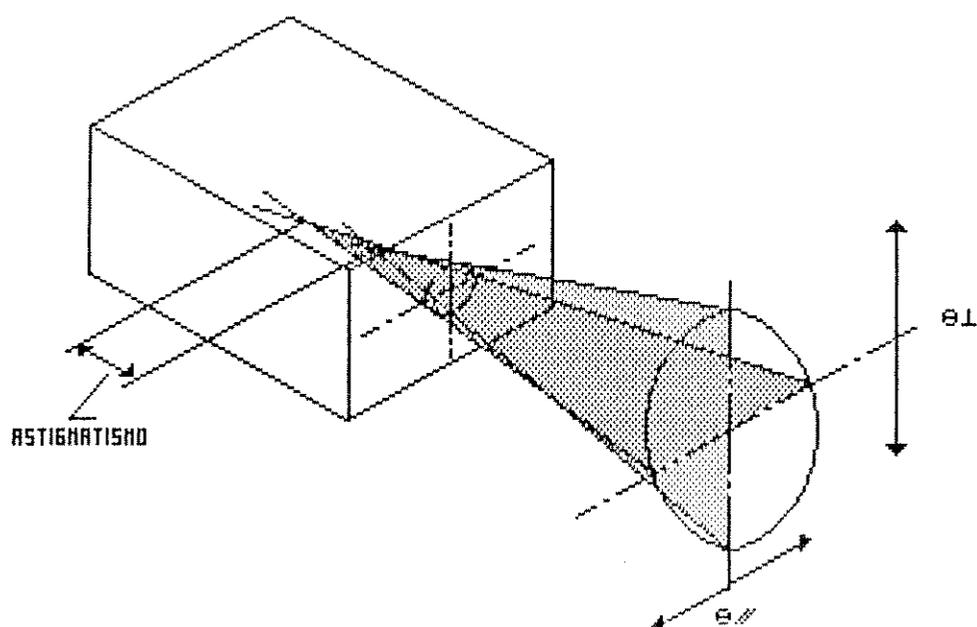


Figura B.6 - Astigmatismo do diodo laser.

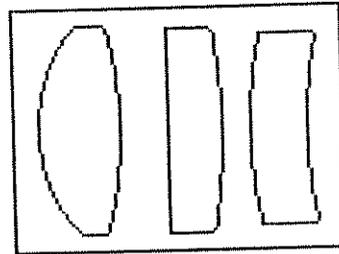


Figura B.7 - Conjunto de lentes para correção do astigmatismo e para colimação do feixe.

APÊNDICE C

Lentes e Espelhos

C.1 - Lentes

São lentes $F\theta$ que auxiliam na linearização da varredura do feixe laser. Cada lente é composta por um duplete com uma lente positiva e uma lente negativa feitas de vidro *crown* e *flint*, respectivamente. O duplete corrige as aberrações esféricas.

As duas lentes possuem um diâmetro de 50 mm, sendo que a lente colimadora possui um foco de 260 mm enquanto que a lente convergente possui um foco de 100 mm. Utiliza-se apenas a região central da lente, pois esta região apresenta menos defeitos de fabricação.

C.2 - Espelhos

Os espelhos utilizados para refletir o feixe laser são planos e aluminizados na primeira superfície. Possuem uma forma quadrangular de 8 mm x 8 mm com espessura de 2,5 mm. Sua planicidade (medida com relação à raia amarela do sódio $\lambda = 5893$ Angstroms) é de 1/2.

APÊNDICE D

Motor de Passos

O motor de passos se caracteriza pelo fato de responder aos pulsos a ele aplicados com uma movimentação angular discreta do seu eixo conhecida como "passo".

A operação desse motor depende da seqüência com a qual a alimentação é aplicada a suas fases. Pode-se obter movimentos horários e anti-horários, dependendo da manipulação da seqüência enviada às fases. A oscilação necessária para a varredura do feixe laser do medidor é obtida através da seqüência de pulsos. A seqüência para se obter uma rotação de no sentido horário é mostrada a seguir:

PASSO	CHAVE			
	A	B	C	D
1	ON	ON		
2		ON	ON	
3			ON	ON
4	ON			ON

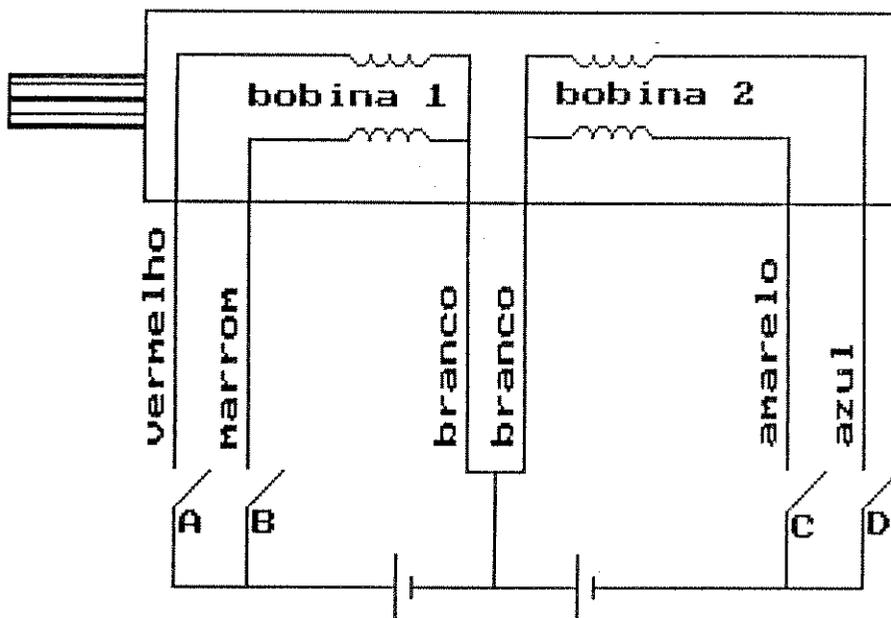


Figura D.1 - Seqüência de passos (sentido horário).

O motor de passos utilizado no medidor é o SP-18 da Singer do Brasil cujas características são:

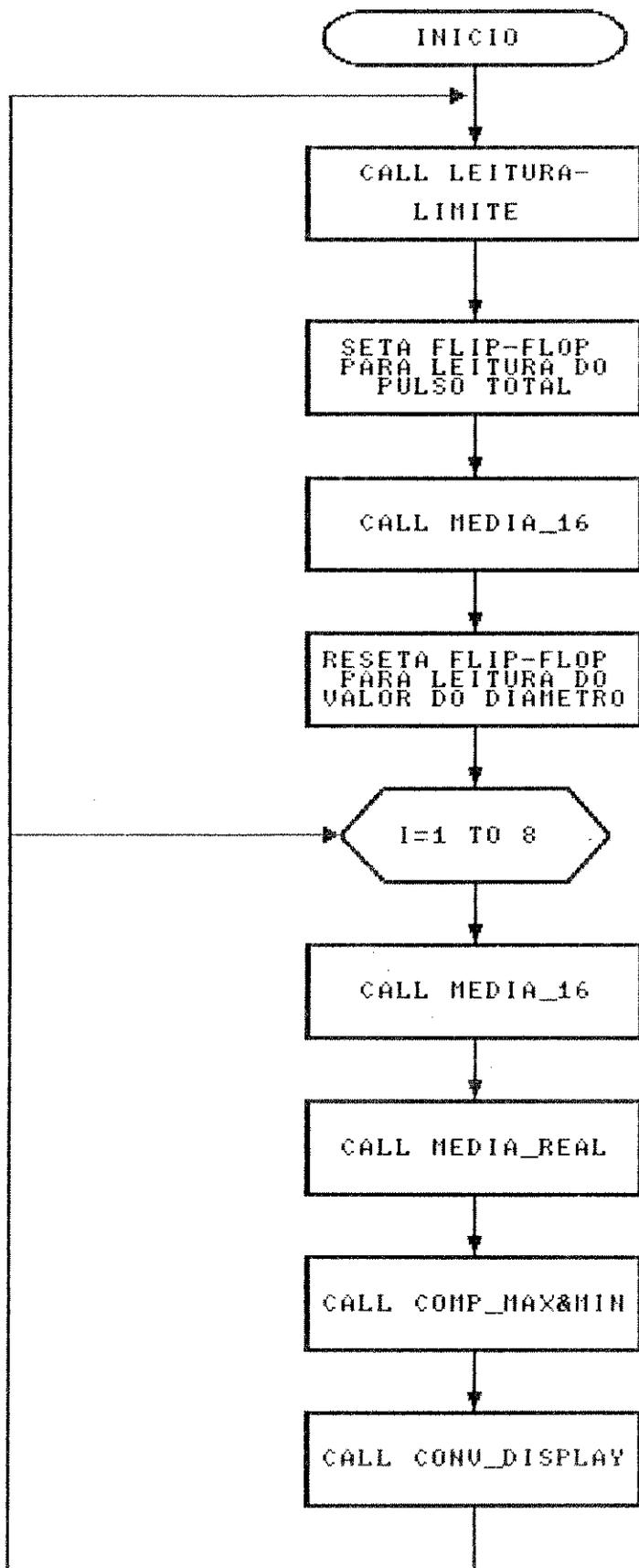
Tipo de motor: ímã permanente
Passos por revolução: 20
Ângulo de passo: 18°
Fases: 4 (enrolamento bifilar)
Isolação: CLASSE E (120°C)
Resistência: (por fase a 25°C): $17,0 \Omega \pm 10\%$
Cabos de saída (6x): 26 AWG (80°C)
Mancais: bronze sinterizado
Lubrificação: impregnação à óleo
Indutância (por fase a 25°C): $12,5 \pm 3 \text{ mH}$
Torque estático: $23,5 \pm 4,7 \text{ mN.m}$
Corrente nominal (por fase): 0,350 A
Elevação de temp. ao ar livre: 65°C a 2,3 W máx.
Inércia do rotor: $4,0 \pm 0,4 \text{ g.cm}^2$
Jogo radial do eixo: 0,050 máx.
Jogo axial do eixo: 0,500 máx.
Peso: 90 g
Precisão do passo: $\pm 10\%$ (não cumulativo)

Tabela D.1 - Características do motor de passos.

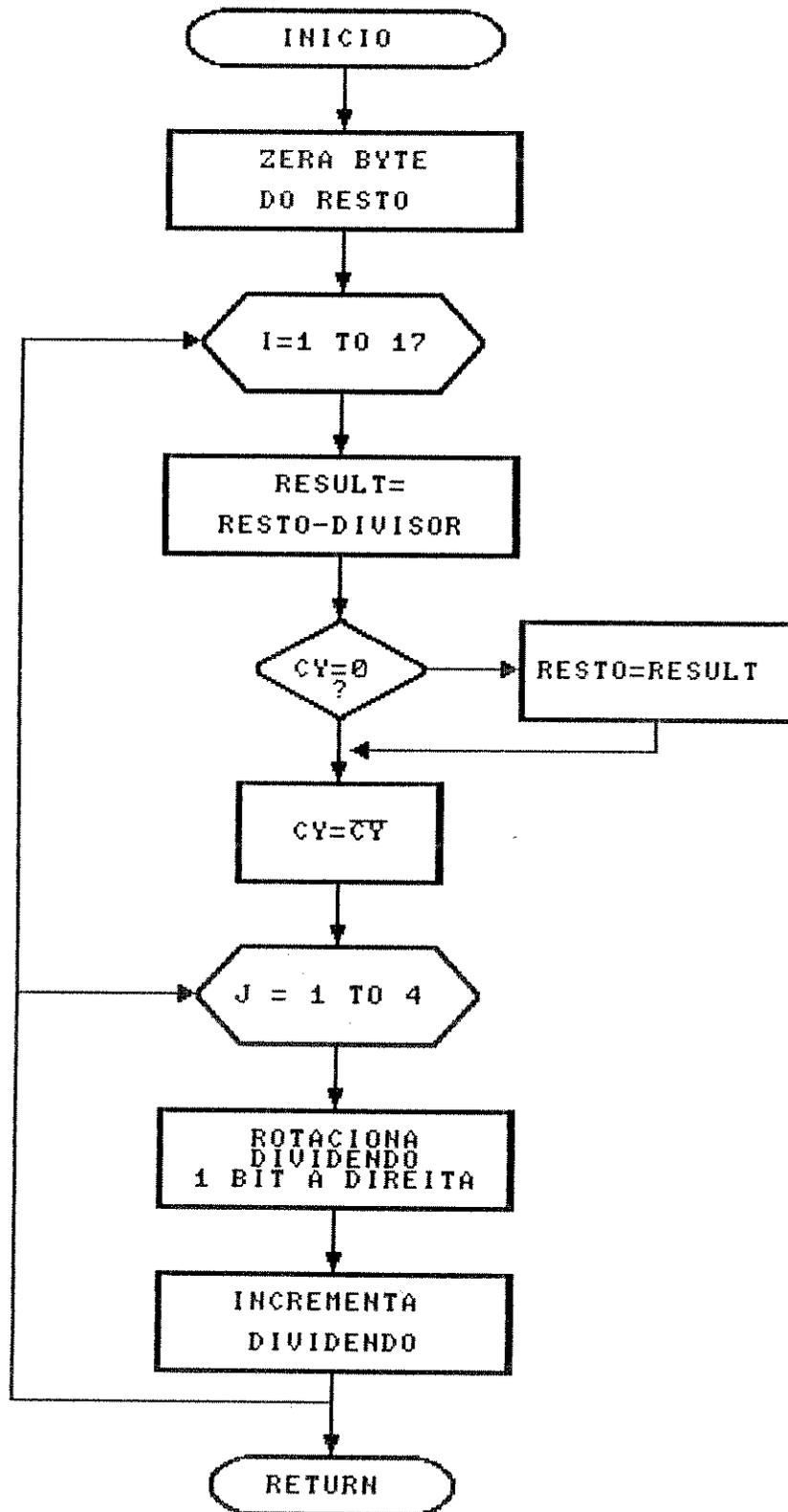
APÊNDICE E

Fluxogramas de Programas e Rotinas

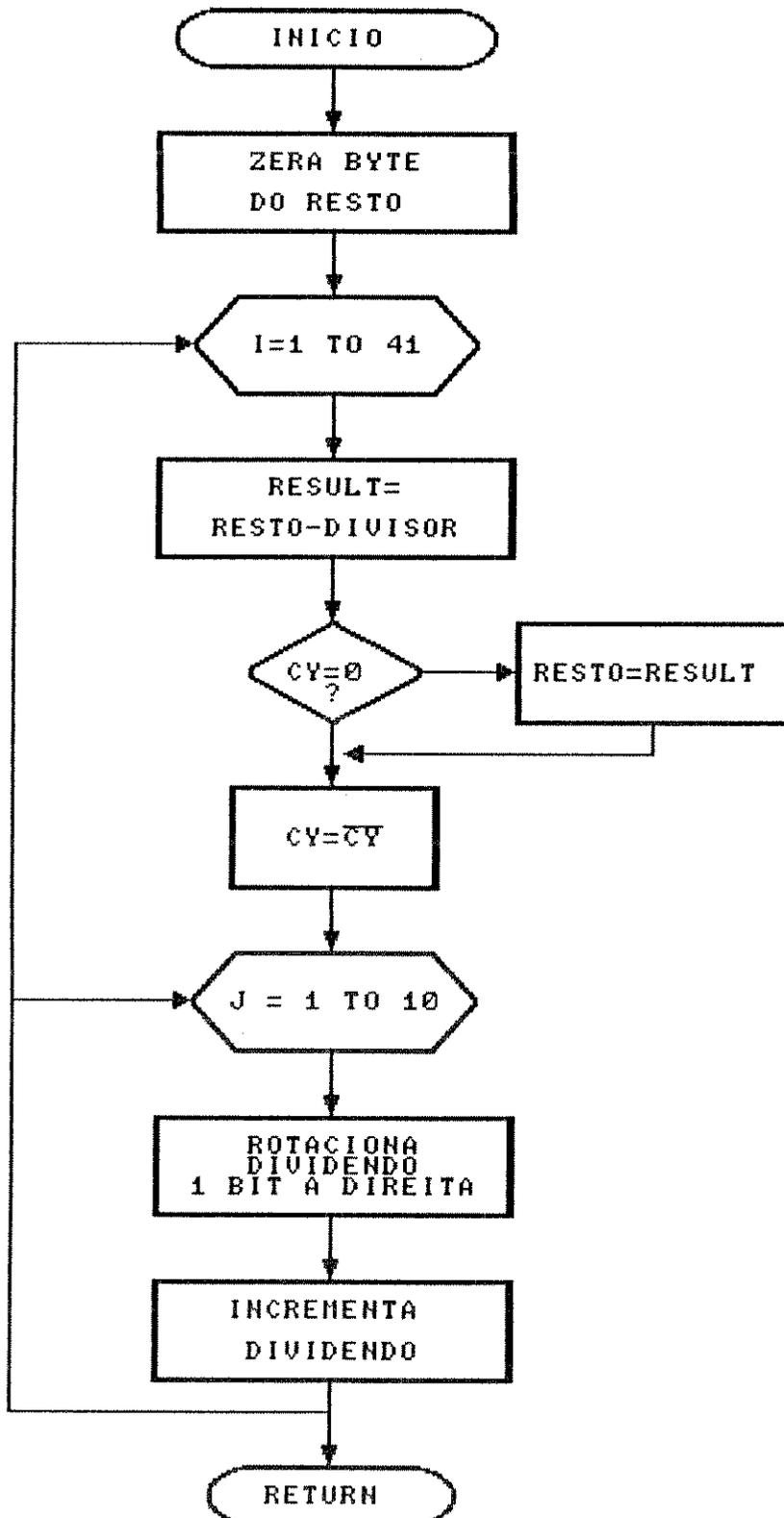
PROGRAMA PRINCIPAL



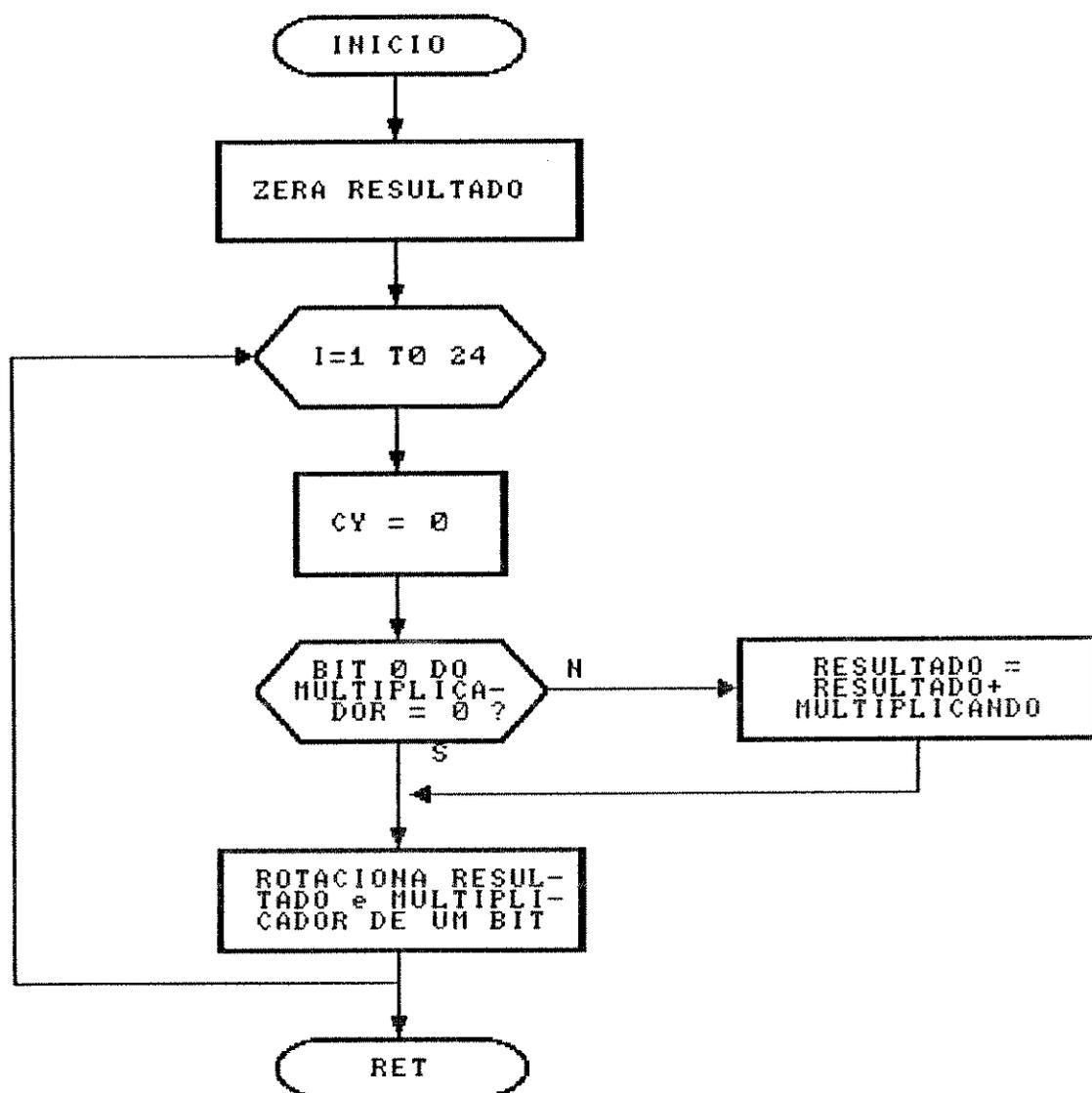
DIUISAO DE 2 BYTES POR 2 BYTES (DIU 2/2)



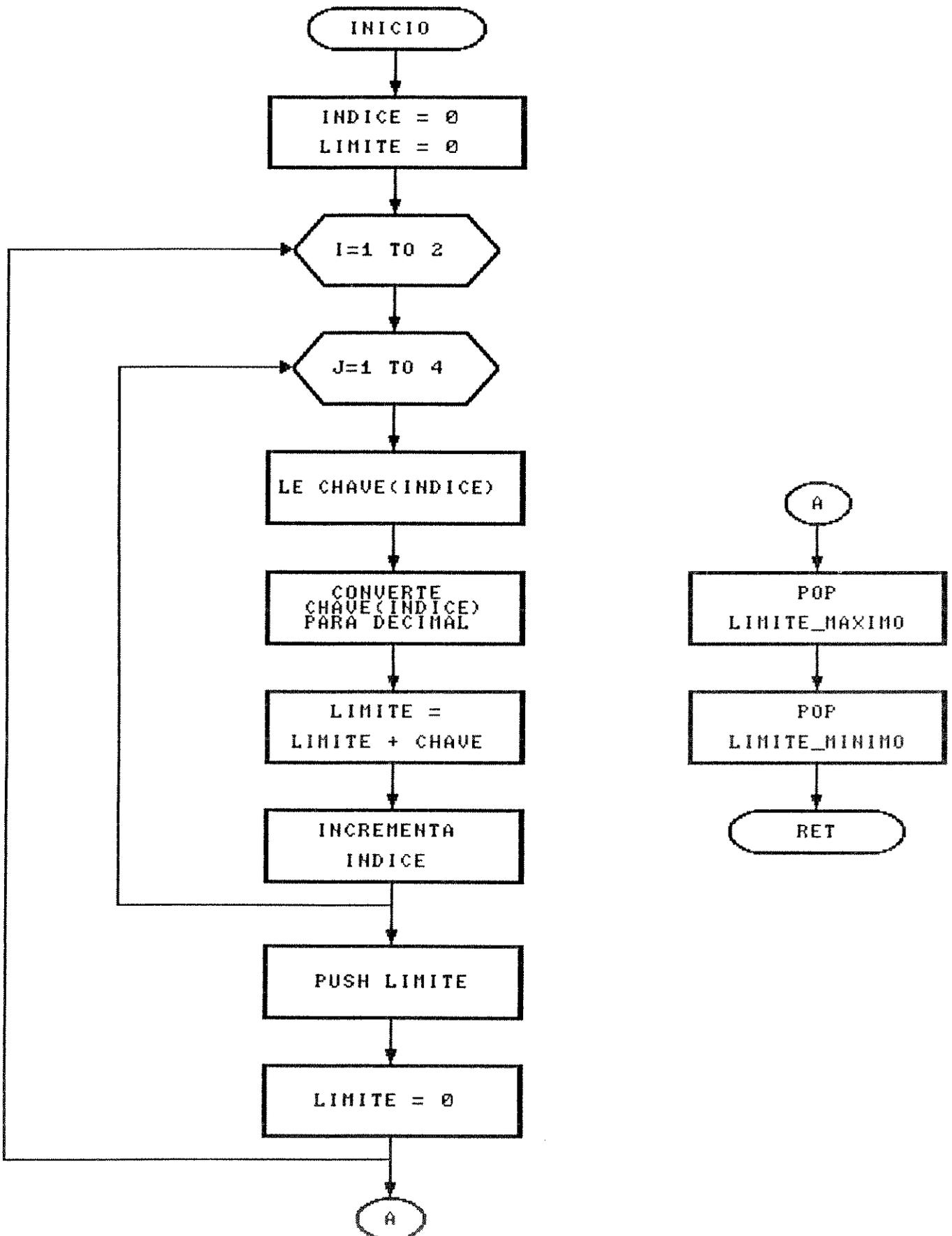
DIVISAO DE 5 BYTES POR 5 BYTES (DIV 5/5)



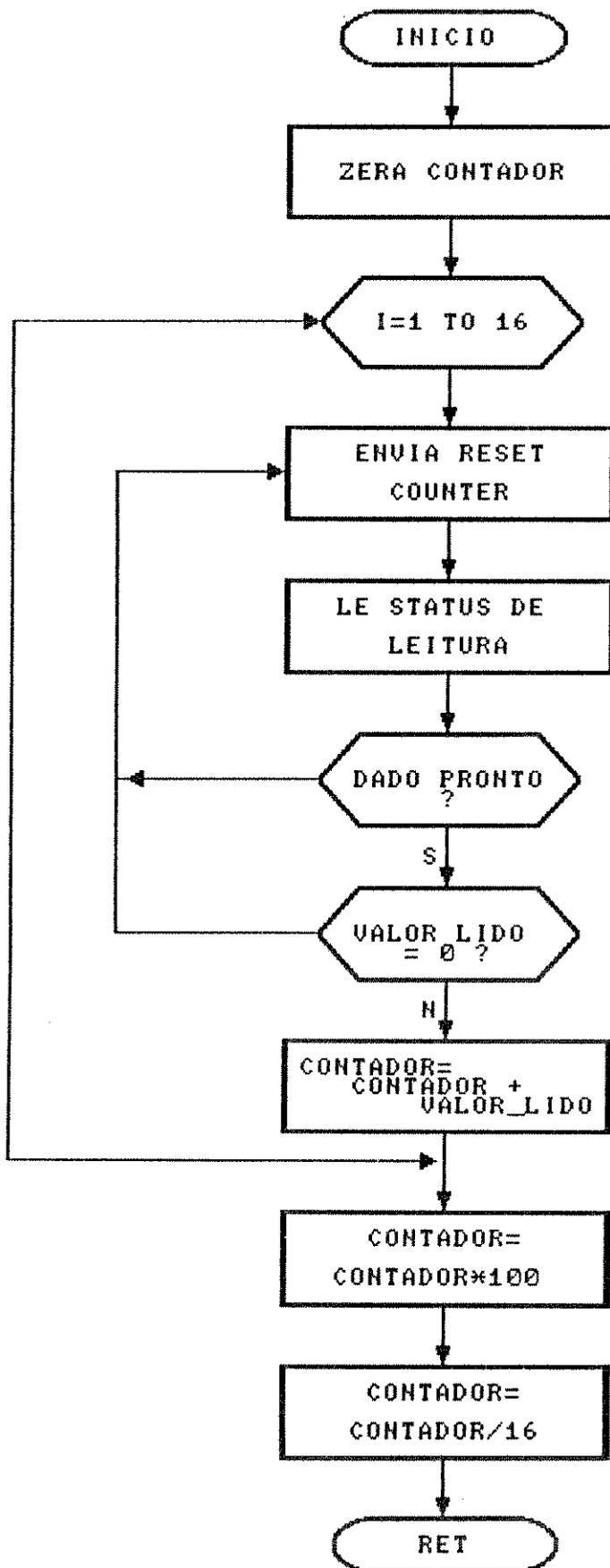
MULTIPLICACAO 3x3 BYTES



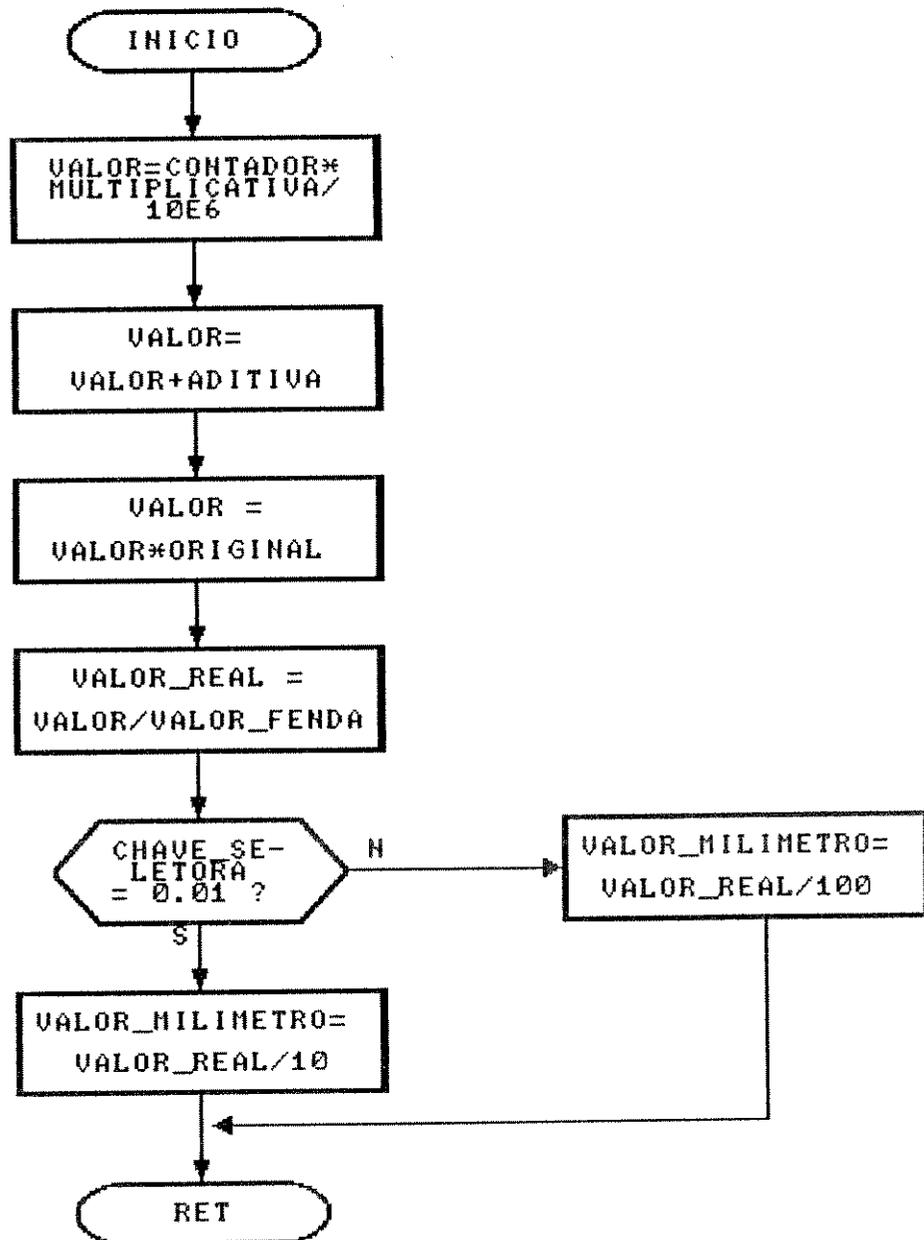
LEITURA DOS LIMITES



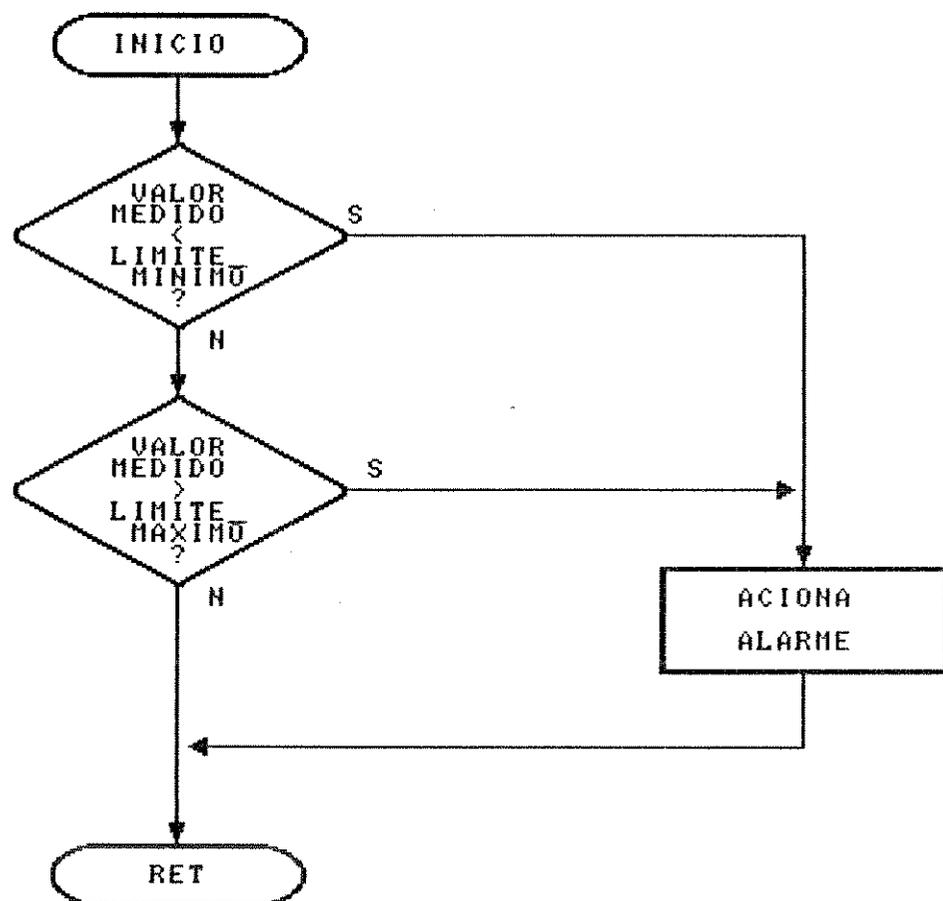
MEDIA_16



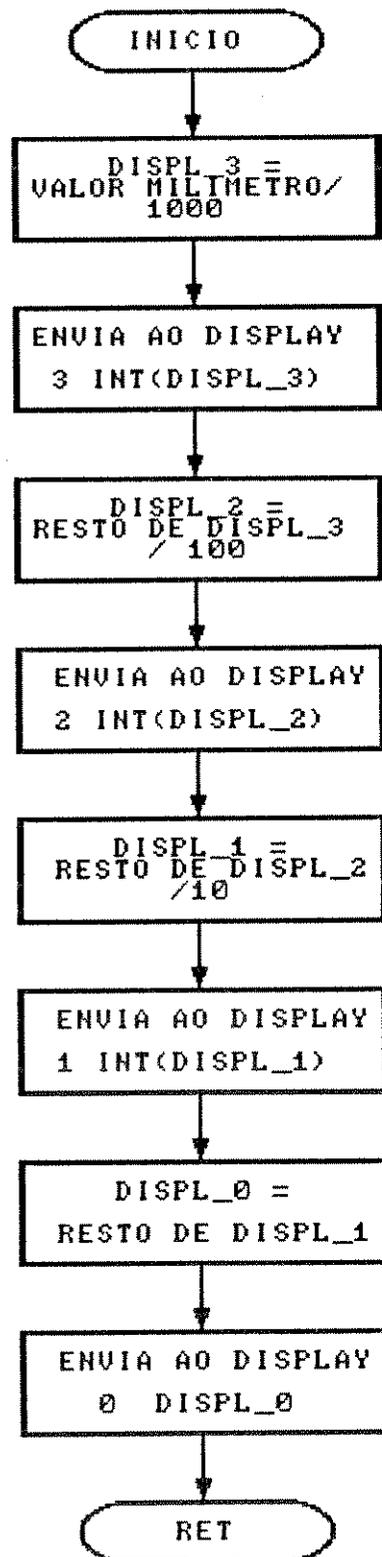
MEDIA REAL



COMPARA MAXIMO E MINIMO

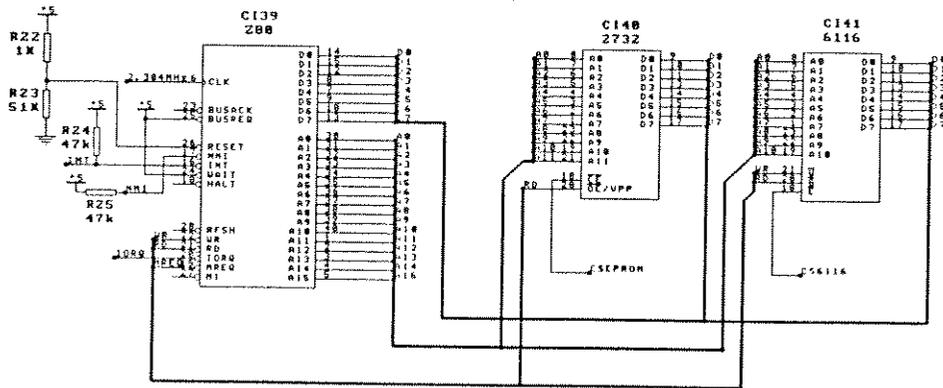


ESCRITA NO DISPLAY

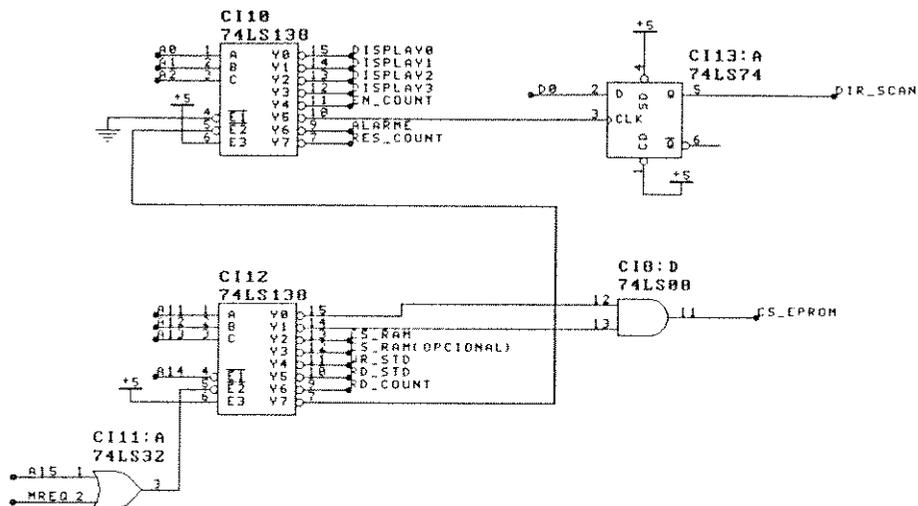


APÊNDICE F

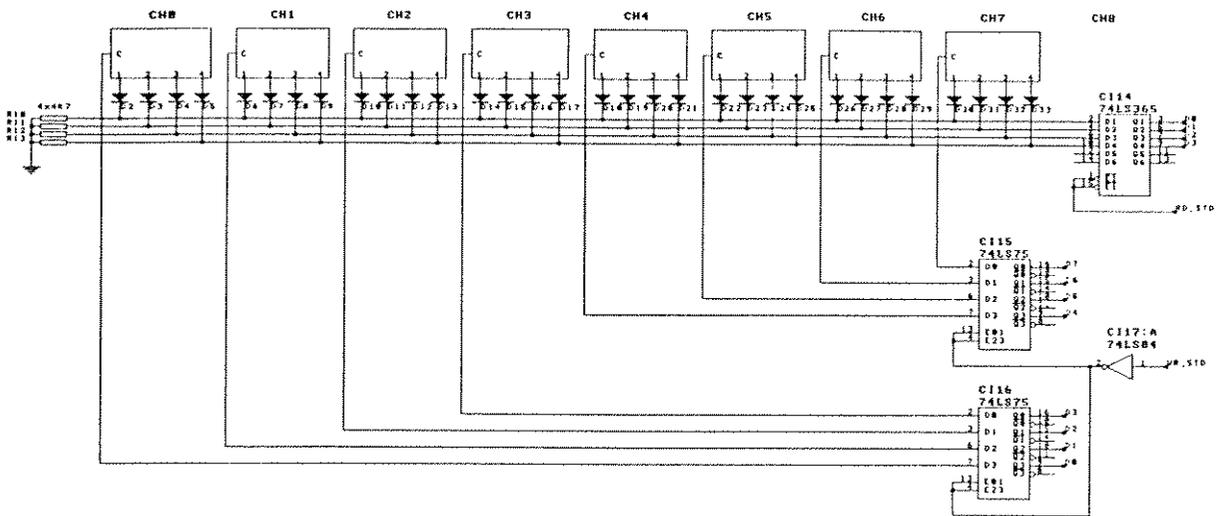
Circuitos Eletrônicos



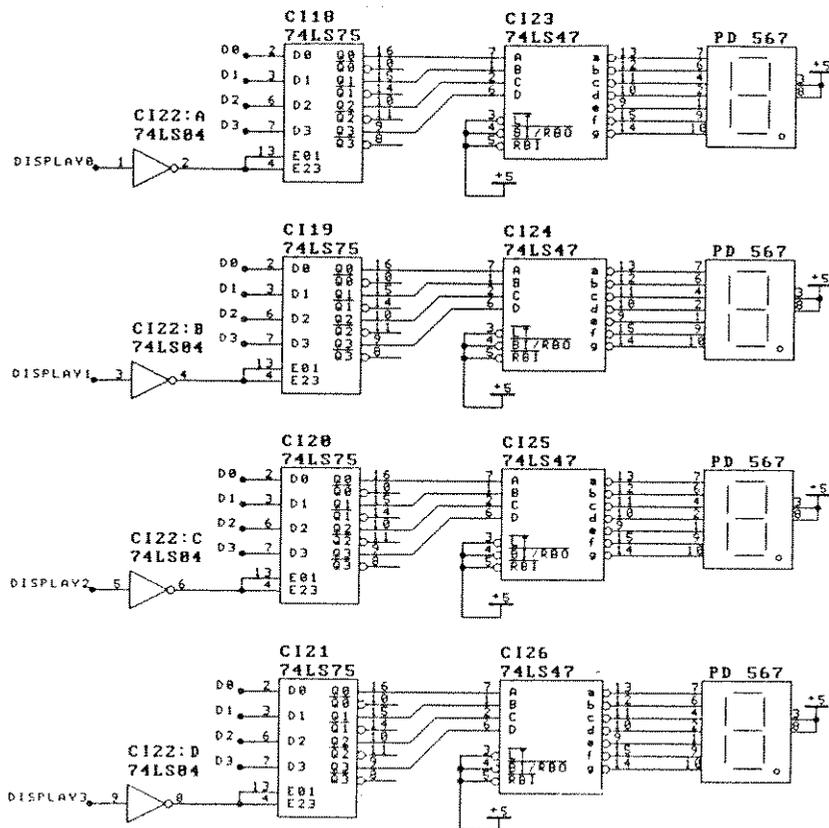
Circuito 1 - UCP e Memórias.



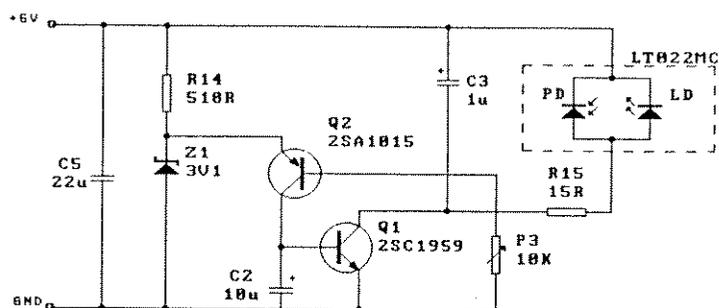
Circuito 2 - Lógica de Seleção.



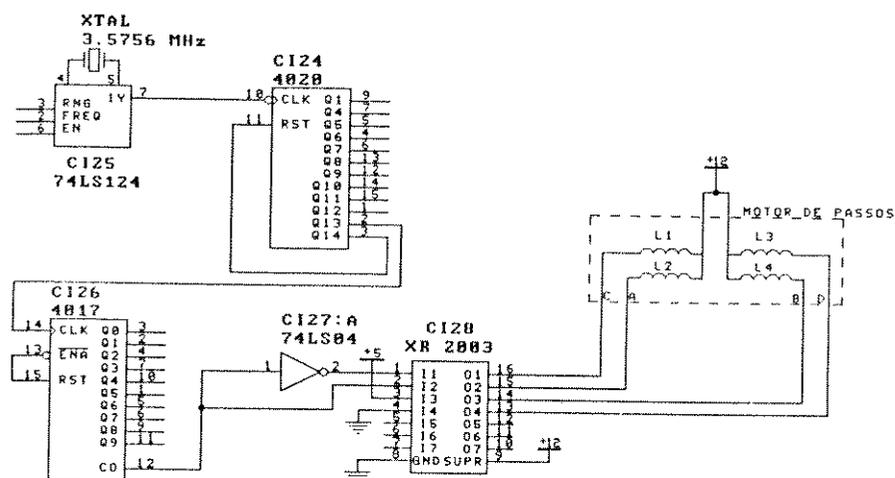
Circuito 3 - Chaves Digitais.



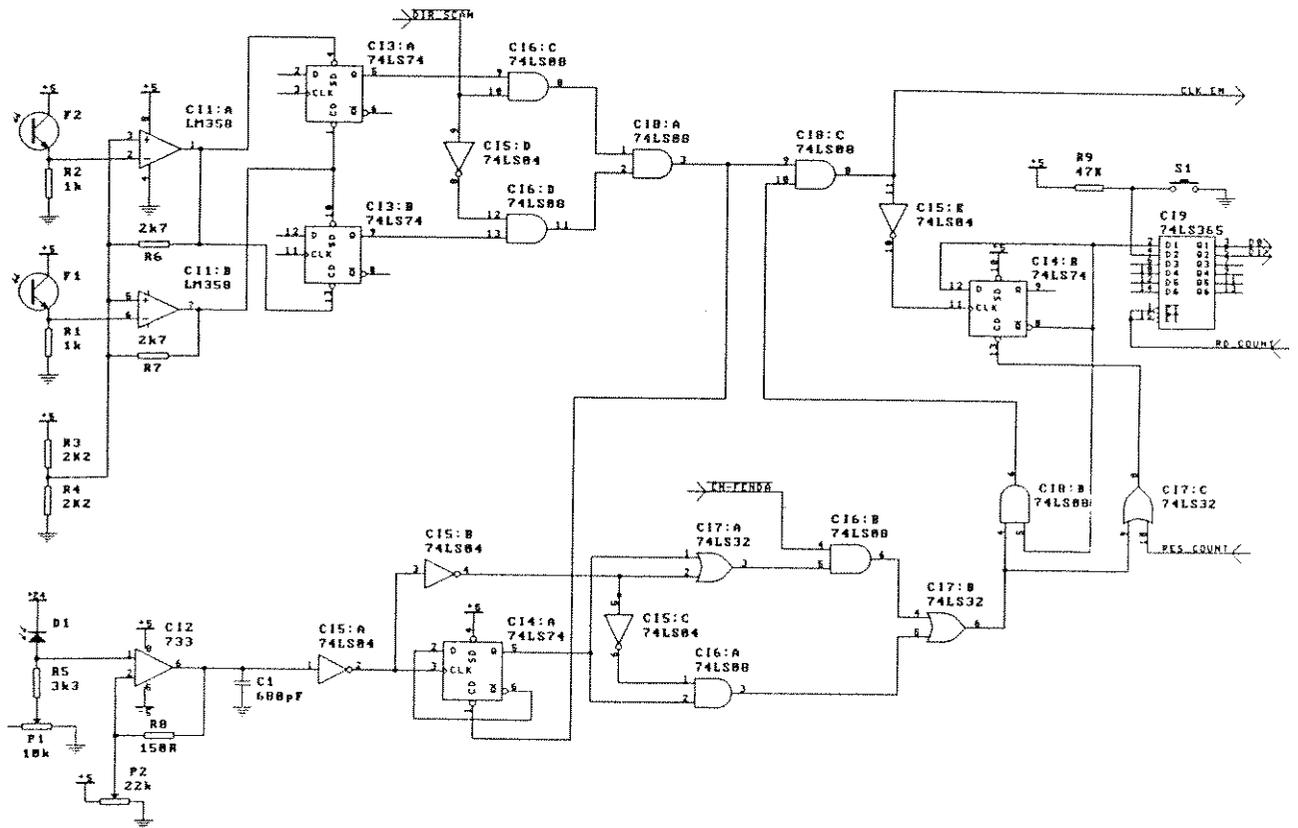
Circuito 4 - Mostrador de 7 Segmentos.



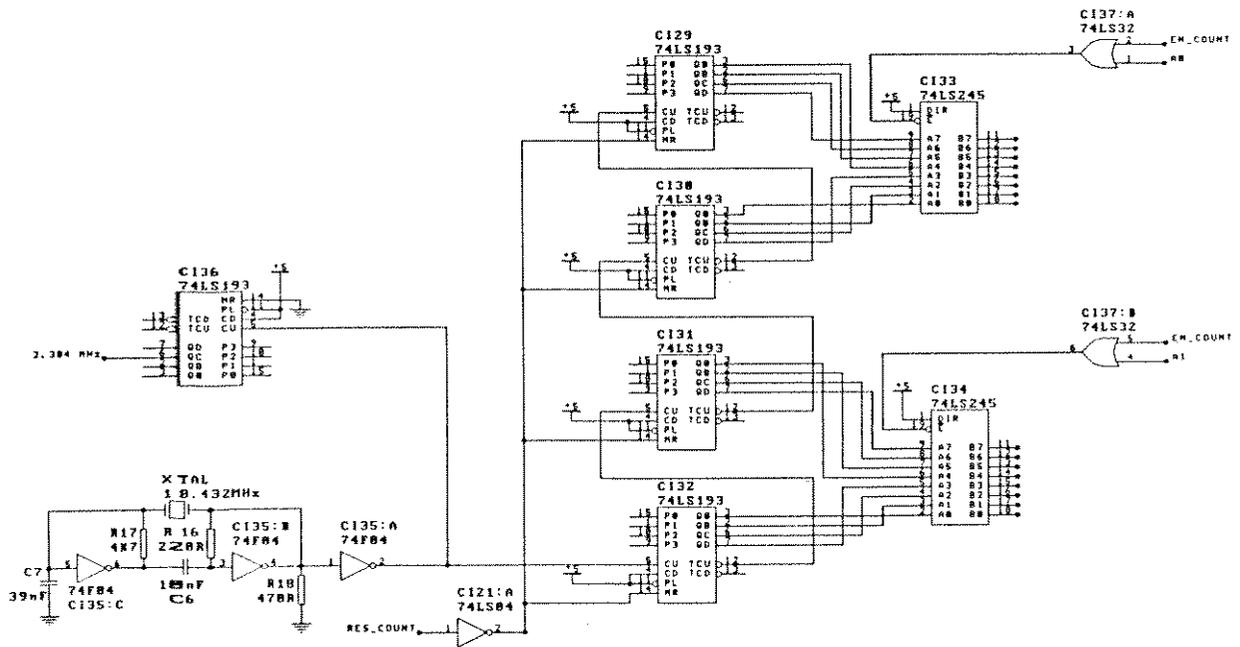
Circuito 5 - Controle Automático de Potência (CAP).



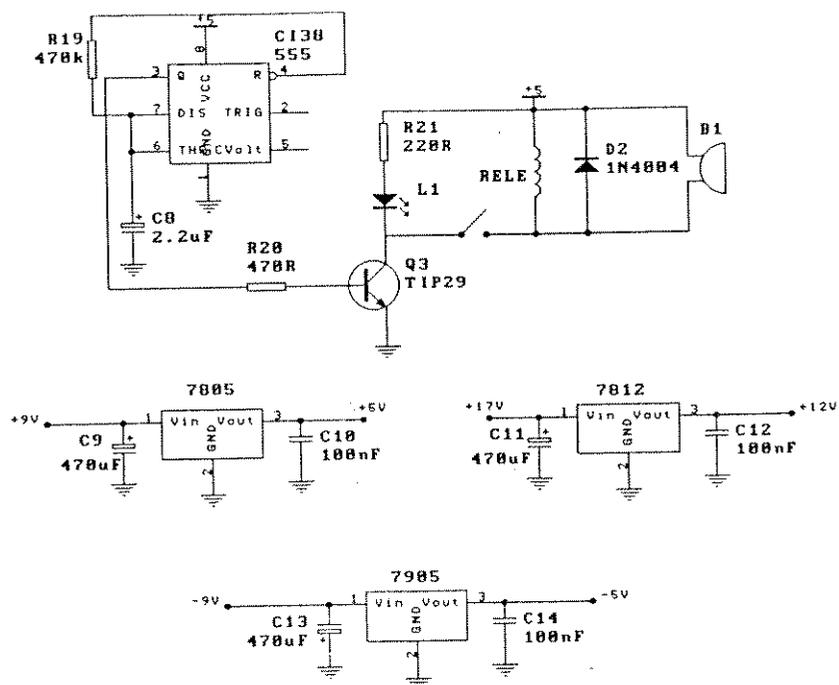
Circuito 6 - Sistema Vibracional.



Circuito 7 - Lógica de Controle e Filtro Digital.



Circuito 8 - Contador e relógio.



Circuito 9 - Alarme e Fontes de Alimentação.

APÊNDICE G

Referências Bibliográficas

- 1 . Beiser, Leo, *Laser scanning and recording: developments and trends*, Laser Focus/Electro-Optics, February, 1985 p. 88-96.
- 2 . Carson, Robert W., *Laser measures diameter of moving strand of wire*, Product Engineering, July 1, 1968 p. 50-52.
- 3 . *CMOS Integrated Circuits*, Motorola Inc., 1978
- 4 . Crane, L. C. A., and Sierins, J. V., *Microcomputer controlled scanning of a laser beam at constant speed*, J. Phys. E. Sci. Instrum., v. 17, 1984, p. 363-367.
- 5 . Cypriano, L. B., *Microprocessador Z80 - Software*, Livros Érica Editora Ltda., v.2, 1986, 330 p.
- 6 . Cypriano, L. B. and Cardinali, P. R., *Microprocessador Z80 - Hardware*, Livros Érica Editora Ltda., v.1, 1983 178 p.
- 7 . Gayakward, Ramakant and Sokolov, Leonard, *Analog and digital control system*, Prentice-Hall Inc. 1988, 660p.
- 8 . *Diodo receptor para o infravermelho*, Folheto Informativo, Icotron - Tecnologia Siemens.
- 9 . Jones, Barry E., *Instrumentation, measurement and feedback*, McGRAW-HILL Book Company (UK) Limited , 1977, 283p.
10. Kozlov, V. V., *Optical method of checking diameters with a photosensitive raster lattice*, Measurement Techniques v.26 n.6, June 1983, p. 458-460.
11. Kramer, Charles J., *Holographic laser scanners for nonimpact printing*, Laser Focus, June 1981, p.70-82.
12. Kuntz, David, *Specifying Laser Diode Optics*, Laser Focus -Electro-Optics, March 1984, p. 44-54.
13. *Linear Circuits- Amplifiers, Comparators and Special Functions*, Data Book, v.1, Texas Instruments, 1989.
14. *Linear Circuits- Voltage Regulators and Supervisors*, Data Book, v. 3, Texas Instruments, 1989.
15. *LS/S/TTL Logic*, Data Book, National Semiconductor Corporation - 1987.
16. Marcova, L. A. and Mikheev, V. P., *Optical systems of laser scanners*, Sov. J. Technol., v. 49, Sept. 1982 p. 548-550.

17. Marshall, Gerald F., *Laser Beam Scanning*, Marcel Dekker, Inc. 1985, 423p.
18. Parr, E. A., *Projetos eletrônicos com o CI 555*, Seleções Eletrônicas Editora Ltda., 1979, 153 p.
19. Pawliszyn, Janusz, *LEDs and laser diodes in schlieren optics methods*, Rev. Sci. Instrum. 58(2), February 1987, p. 245-248.
20. Pelta, Edmund R., *Sawer motors in optical scanning systems*, Photonics Spectra, November 1986, p. 125-130.
21. Sharupich, L. and Tugov, N., *Optoeletronics*, Mir Publishers, 1987, 222 p.
22. Sullivan, Sean, *Laser scanning for better images*, Photonics Spectra, November 1986, p. 105-110.
23. *TLCS-Z80 Development system manual*, Toshiba Corporation September 1988, 369 p.
24. Weichel, H.; Danne, W. A. and Pedrotti, L. S., *Laser Safety in Laboratory*, AJP v.42, November 1974 p. 1006-1013.
25. West, P., *Automatic non-contacting measurement of fine filaments*, Research, v. 4, 1971, p. 6-8.