

**Instrumentação eletrônica de
apoio para um sistema de
Epitaxia por Feixes Moleculares**

Haroldo Arakaki



Orientador: Prof. Dr. Valentin Obac Roda

Dissertação apresentada ao
Instituto de Física e Química de São Carlos
para obtenção do título de Mestre em Ciências "Física Aplicada"

São Carlos - SP

1994



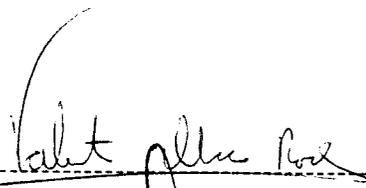
**IFSC UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO**
Instituto de Física e Química de São Carlos

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

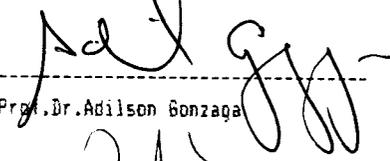
MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE HAROLDO ARAKAKI APRESENTADA
INSTITUTO DE FÍSICA E QUÍMICA DE SÃO CARLOS, DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 29/03/1994

Av. Dr. Carlos Botelho, 1465
Caixa Postal 369
CEP 13560.970 - São Carlos - SP
Brasil

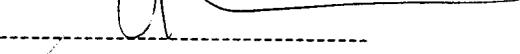
COMISSÃO JULGADORA:



Prof. Dr. Valentin Obac Roda



Prof. Dr. Adilson Gonzaga



Prof. Dr. Edson dos Santos Moreira

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Valentin Obac Roda pela orientação e apoio para a conclusão deste trabalho,

Ao Reinaldo V. da Silva pelo auxílio no desenvolvimento de algumas importantes partes do trabalho,

Ao técnico Carlos Alberto, pelo apoio e amizade, e pelo auxílio na construção do sistema

Ao meu chefe Pierre Basmaji pelo apoio e sugestões

Aos professor Máximo Siu Li pelas sugestões e apoio no início dos trabalhos

A todos os integrantes que passaram ou estão passando pelo grupo, que apesar de terem me requisitado bastante, deixaram algum tempo para concluir este trabalho, dando apoio e importantes sugestões

e

aos meus pais

Resumo

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de instrumentação eletrônica para controle e automação de um sistema de crescimento de semicondutores por Epitaxia por Feixes Moleculares.

Envolve uma variedade de circuitos analógicos e digitais como: um módulo de aquisição de dados e controle baseado em uma UCP Z-80, contendo algumas interfaces digitais e analógicas multiplexadas, e comunicando-se com um microcomputador através de uma interface serial. Envolve ainda o desenvolvimento de controladores de temperatura analógicos tipo P.I.D., atuação por motores de passo e circuitos de condicionamento de sinal.

Abstract

In this work is presented the development of electronic instrumentation for automation and control of a Molecular Beam Epitaxy semiconductor growth system.

A variety of analog and digital instrumentation circuits have been designed and implemented, including a data acquisition and control system based on a Z-80 CPU, which controls some multiplexed digital and analog interfaces and talks to a microcomputer using serial communication. Other circuits have been also developed, including analog temperature controllers, stepper motor actuators and circuits for signal conditioning.

Notações comumente utilizadas

MBE "Molecular Beam Epitaxy" - Epitaxia por Feixes Moleculares

UCP - Unidade Central de processamento

A/D - Analógico para Digital

D/A - Digital para Analógico

PID - Proporcional, Integral Analógico

RHEED - "Reflection High Energy Electron Diffraction"

E/S - Entrada / Saída digitais

RAM - memória de leitura e escrita

EPROM - memória reprogramável apenas de leitura

Marcas Registradas

MECA

IBM-PC

Zilog

Intel

Analog Devices

Intersil

Turbo C

RS 232

ÍNDICE

Introdução	1
Capítulo I - Noções de Crescimento Epitaxial	3
I.1 - Introdução	3
I.2 - Técnicas de Crescimento Epitaxial	4
I.3 - Epitaxia por Feixes Moleculares	6
I.3.1 - Introdução	6
I.3.2 - A técnica de Epitaxia por Feixes Moleculares (MBE)	7
I.3.3 - Materiais utilizados e Aplicações	9
Capítulo II - Sistema de crescimento por MBE	11
II.1 - Descrição do sistema de MBE	11
II.1.1 - Câmara de Introdução	11
II.1.2 - Câmara de crescimento	13
II.1.3 - Câmara de análise	15
II.1.4 - Ambiente de trabalho e preparação	16
II.2 - Equipamentos de caracterização 'in situ'	17
II.2.1 - RHEED	17

II.2.2 - Espectrômetro Quadrupolar de Massa / RGA	18
II.2.3 - Medidor de fluxo	18
II.2.4 - Medidor de pressão	19
II.3 - Ultra alto vácuo	19
II.4 - Suporte para substrato (Manipulador)	22
II.5 - Células de efusão	23
II.6 - Requisitos operacionais	26
Capítulo III - Desenvolvimento de Instrumentação Eletrônica	28
III.1 - Introdução	28
III.2 - Controlador de temperatura	29
III.2.1 - Controlador de temperatura para as células de efusão	30
III.2.2 - Controlador de temperatura para o substrato	40
III.2.3 - Controlador de temperatura para o carrossel	40
III.2.4 - Desempenho obtido	41
III.3 - Módulo de controle e automação	42
III.3.1 - Controlador programável (UCP Z-80)	47
III.3.2 - Interface Analógico/Digital	52
III.3.3 - Interface Digital/Analógica	58
III.3.4 - Interface de sinais digitais	65
III.4 - Registro das oscilações do sinal do RHEED	67
III.5 - Obturadores ('shutters')	70
III.5.1 - Atuação através de motores de passo	71
III.5.2 - Interface de controle	72
III.5.3 - Circuito de controle de motor de passo	73

Capítulo IV - Programas de controle e automação	77
IV.1 - Programas do controlador UCP Z-80	77
IV.1.1 - Rotinas básicas	77
IV.1.2 - Programa principal da UCP	82
IV.2 - Programas para o Microcomputador IBM-PC	85
Capítulo V - Segurança contra falhas	88
V.1 - Introdução	88
V.2 - Falhas consideradas e medidas adotadas	88
V.2.1 - Aquecimento das células	89
V.2.2 - Vácuo nas câmaras	91
V.2.3 - A UCP e o controle de crescimento	92
V.2.4 - Comunicação de dados	94
Capítulo VI - Conclusão	95
VI.1 - Sugestões de idéias e modificações	96
Bibliografia	98

Apêndice

A - Esquemas elétricos

A.1 - Controlador de temperatura

A.1.1 - Mostrador digital

A.1.2 - Amplificador/condicionador de termopar

A.1.3 - Circuito de controle e referência

A.1.4 - Gerador de Rampa e Circuito de potência

A.1.5 - Fonte de alimentação

A.2 - Fonte de corrente para o carrossel

A.3 - UCP Z-80 e interfaces de E/S

A.4 - Interface Analógico/Digital

A.5 - Interface Digital/Analógico

A.6 - Detetor/amplificador para tela do RHEED

A.7 - Acionamento dos obturadores - Motor de passo

A.7.1 - Circuito de controle de motor de passo

A.7.2 - Módulo de potência para motor de passo

A.8 - Interface de Extensão do barramento do micro

A.8.1 - Interface para o microcomputador IBM-PC

A.8.2 - Interface para o bastidor

A.9 - Sensor ótico para sinais digitais

B - Rotinas do controlador programável (UCP Z-80)

C - Programa de teste para microcomputador IBM-PC

Índice de figuras

1.1 - Processo de crescimento por MBE	8
2.1 - Conexões das câmaras do sistema de MBE e bombas de vácuo	12
2.2 - Técnica de RHEED	17
2.3 - Célula de efusão tipo Knudsen	24
3.1 - Configuração de equipamentos do sistema de MBE	28
3.2 - Diagrama geral do controlador de temperatura	31
3.3 - Esquema do circuito de referência	32
3.4 - Amplificador e condicionador de termopar	34
3.5 - Curva do termopar e segmentos de linearização	35
3.6 - Esquema do circuito de controle PID	36
3.7 - Isolação do sinal de disparo para o circuito de potência	38
3.8 - Sinais do circuito de controle de fase	39
3.9 - Esquema de controle direto por microcomputador, através de interfaces de extensão de barramento	43
3.10 - Esquema do bastidor com suas placas e conexões com um microcomputador e o sistema de MBE	44
3.11 - Formato da placa para bastidor	45
3.12 - Sinais dos conectores para placa no bastidor	46
3.13 - Diagrama da UCP Z-80	47
3.14 - Mapeamento de dispositivos de E/S	51
3.15 - Diagrama geral da interface A/D	53
3.16 - Conversão de entrada bipolar para unipolar	54
3.17 - Relação Entrada analógica bipolar × Valor digital	55
3.18 - Diagrama geral da interface D/A	59

3.19 - C.I. utilizado para implementar a memória de entrada	60
3.20 - Idéia de funcionamento da interface D/A	61
3.21 - Circuito de controle de saída da interface D/A	62
3.22 - Diagrama de tempos do circuito de saída da interface D/A	63
3.23 - Sensor ótico para sinais digitais	66
3.24 - Diagrama da montagem para captação do sinal de RHEED	68
3.25 - Exemplos experimentais de oscilações de RHEED	69
3.26 - Calibração de crescimento (GaAs)	69
3.27 - Diagrama do circuito de controle de motor de passo	73
3.28 - Sinais gerados para operação do motor de passo	74
3.29 - Inversão de corrente através de circuito tipo H	75
3.30 - Controle de alimentação do motor de passo	76
4.1 - Tabela de desvio das interrupções	78
4.2 - Fluxograma do programa principal da UCP	83

Introdução

Os semicondutores tem sido um dos responsáveis pela grande revolução tecnológica alcançada pela humanidade no mundo atual. Desde o início da sua utilização e ainda atualmente, a maioria dos dispositivos semicondutores em uso são baseados no Silício e no Germânio.

Em algumas áreas de desenvolvimento atualmente em destaque como telecomunicações e optoeletrônica, as tecnologias tradicionais de produção de dispositivos bem como os próprios materiais (Silício e Germânio) não atendem às necessidades devido a suas características deficientes quanto a velocidade e propriedades óticas. Para suprir essas deficiências, tem sido desenvolvidos estudos com novos tipos de materiais bem como novas técnicas de crescimento de semicondutores.

O trabalho aqui apresentado envolve o estudo e o desenvolvimento de instrumentação eletrônica para controle e automação de uma dessas novas técnicas de crescimento: a técnica de Epitaxia por Feixes Moleculares, usualmente conhecida como MBE ("Molecular Beam Epitaxy").

A técnica de MBE é uma técnica bastante refinada contendo vários parâmetros de crescimento sensíveis, exigindo um preciso controle sobre todos eles para se obter o semicondutor desejado. Nesse contexto, um sistema de controle e automação torna-se imprescindível para permitir o aproveitamento de todo o potencial desta técnica no crescimento de estruturas complexas e precisas. É um trabalho bastante abrangente, envolvendo o estudo e desenvolvimento de uma variedade de circuitos em áreas diferentes (analógicos, digitais, controle de potência, etc.).

No capítulo I desta dissertação é feito uma introdução ao crescimento epitaxial de semicondutores, e uma exposição das técnicas de crescimento existentes.

No capítulo II é feita uma descrição da técnica de MBE e equipamentos associados, bem como do sistema de MBE referente a este trabalho. São ainda abordados os requisitos operacionais da técnica e o seu potencial aplicativo, bem como a importância de um sistema de controle e automação.

No capítulo III é mostrado toda a instrumentação eletrônica desenvolvida para controle e automação: Unidade Central de processamento (UCP), conversores

Analógico/Digital (A/D) e Digital/Analógico (D/A) multiplexados, interfaces digitais de entrada e saída (E/S), comunicação serial RS232, e ainda controladores de temperatura analógicos, acionamento por motores de passo, interfaces de monitoração e controle de sinais digitais, circuitos de condicionamento de sinal, etc.

No capítulo IV, é feita a discussão dos programas desenvolvidos para a UCP, controle das interfaces digitais e analógicas, e do programa de comunicação serial. Foram também incluídos os programas desenvolvidos para o microcomputador IBM-PC, para teste de comunicação com a UCP e operação do sistema de MBE.

No capítulo V, são apresentadas algumas medidas de segurança contra falhas e erros, aplicados a nível de circuitos nos controladores de temperatura e a nível de circuito e programa na UCP, e na comunicação de dados.

No capítulo VI, é feita uma discussão dos resultados do trabalho desenvolvido, bem como algumas sugestões para alterações e melhoria de algumas partes da instrumentação eletrônica implementada.

No apêndice estão expostos os esquemas elétricos detalhados dos projetos desenvolvidos e listagens dos programas da UCP e do micro IBM-PC.

Capítulo I - Noções de Crescimento Epitaxial

I.1 - Introdução

O crescimento epitaxial é uma técnica de crescimento de cristais semicondutores, no qual há uma deposição ordenada dos átomos sobre um substrato monocristalino, formando uma rede cristalina com a mesma orientação que o substrato. Uma rede monocristalina possui uma estrutura simétrica, apresentando propriedades particulares na condução de cargas relacionadas à sua estrutura de rede (simétrica).

Existem atualmente várias técnicas para crescimento epitaxial de dispositivos semicondutores. Em todas elas o crescimento é realizado basicamente através da formação de camadas semicondutoras de $1\mu\text{m}$ a $10\mu\text{m}$ de espessura sobre um *substrato* monocristalino (base sobre o qual será crescido o filme) de $150\mu\text{m}$ a 1 mm de espessura. Durante o crescimento, é possível adicionar impurezas (dopantes) de outros materiais, de tipo P ou N, constituindo as junções. A qualidade e sofisticação dos dispositivos crescidos é determinada pelas seguintes características:

- morfologia (qualidade): monocristalinas e sem defeitos
- presença de contaminantes (impurezas indesejadas) e defeitos que possam alterar as características desejadas (interferir na mobilidade).
- controle de dopagem, para se obter o tipo e a quantidade desejados de portadores de carga.
- controle de espessura
- forma das junções (interfaces).

A qualidade do filme crescido é determinada pela qualidade e características do substrato utilizado tais como presença de defeitos e impurezas e orientação de sua estrutura, bem como a sua preparação para o crescimento. Outros fatores determinantes são a qualidade/pureza dos materiais das fontes de fluxo e o ambiente de crescimento, os quais determinam a incorporação de

contaminantes indesejados no filme crescido, devendo ainda ser citados a temperatura e o controle de espessura do crescimento.

I.2 - Técnicas de Crescimento Epitaxial

As principais técnicas de crescimento epitaxial^(2,6), em ordem de descoberta e atualmente usadas são as seguintes:

- **Epitaxia em Fase Líquida - LPE (“Liquid Phase Epitaxy”):**

Nesta técnica, o substrato é colocado em contato (um banho) com uma solução super saturada contendo os elementos desejados, sob uma atmosfera neutra (Hidrogênio). A taxa de deposição é muito alta (da ordem de $\mu\text{m}/\text{minuto}$) e pode ser depositada sobre grandes superfícies. Não permite um bom controle da espessura, a reprodutibilidade é difícil, e o semiconductor obtido é de baixa qualidade se comparada a outras técnicas.

Suas vantagens são a simplicidade, a alta taxa de crescimento e a ausência de compostos perigosos. Estas facilidades levaram a técnica de LPE a ser utilizada industrialmente, na confecção de dispositivos mais simples.

- **Epitaxia em Fase Vapor - VPE (Vapour Phase Epitaxy) ou CVD (Chemical Vapour Deposition):**

Nesta técnica, o crescimento é conseguido pela reação química dos compostos em fase vapor sobre o substrato aquecido, mantido em um tubo sob o fluxo destes compostos. Este fluxo é formado pelo aquecimento destes compostos em um reator, transportados para o substrato através de um gás neutro (Hidrogênio ou Hélio). A alteração da dopagem é feita pelo controle/troca do fluxo dos compostos gasosos. A taxa de deposição pode ser menor que $1 \mu\text{m}/\text{min}$ e permite a deposição sobre grandes superfícies, com uma boa homogeneidade. A limitação desta técnica é a dificuldade de se obter um controle preciso sobre o fluxo de vapor e conseqüentemente dos parâmetros de crescimento. Esta limitação aliada à

utilização de altas temperaturas do substrato leva a uma interdifusão dos elementos entre as camadas e um alargamento da interface.

Em termos de aplicação comercial/industrial é uma das técnicas mais importantes, comportando uma considerável variedade de reagentes e fornecendo cristais de razoável qualidade e a baixo custo.

- **Deposição de Vapores Químicos Metalorgânicos (MOCVD):**

O MOCVD é um aperfeiçoamento da técnica de C.V.D, que utiliza vapor de compostos organometálicos em um ambiente de baixa pressão ou atmosfera neutra. O MOCVD permite um controle maior do fluxo de vapor e dos parâmetros de crescimento, fornecendo materiais de boa qualidade. É um concorrente da técnica de MBE para crescimento de estruturas não muito complexas.

Utiliza decomposição química a altas temperaturas, resultando em alguns problemas de interdifusão e autodopagem, e existe uma certa complexidade no controle do fluxo de gás. O maior inconveniente MOCVD, é a manipulação dos gases organometálicos, altamente tóxicos.

- **Epitaxia por feixe molecular - MBE (Molecular Beam Epitaxy):**

Na Epitaxia por Feixe Molecular, o crescimento é realizado em uma câmara de ultra alto vácuo (10^{-10} torr) em um ambiente ultra limpo. Utiliza fontes de elementos sólidos ou líquidos para o crescimento, aquecidos em cadinhos dotados de obturadores para controle do fluxo. Esta técnica produz filmes de alta pureza e permite um controle preciso dos parâmetros de crescimento tais como: o controle de espessura, controle de dopagem através do controle do fluxo das células e a obtenção de junções abruptas, conseguidas pelo controle de fluxo e baixa temperatura de crescimento. A maior desvantagem desta técnica é o seu alto custo, além de existirem alguns defeitos de crescimento ainda não definitivamente explicados, e a dificuldade de utilização de alguns elementos, como por exemplo o fósforo (P).

- **Epitaxia por feixe químico - CBE (Chemical Beam Epitaxy):**

O CBE é uma variação da técnica de MBE convencional, basicamente em relação à fonte geradora do feixe molecular. O CBE utiliza algumas fontes sólidas

como no MBE, e outras gasosas como no MOCVD. A pressão de crescimento é um pouco maior que a do MBE devido ao produto da decomposição dos gases, o que pode deteriorar um pouco a qualidade da amostra comparada ao MBE. Sua principal vantagem é permitir uma rápida e fácil troca dos materiais das fontes gasosas utilizados no crescimento sem a necessidade de se abrir o sistema, permite a utilização de compostos fosforados sem problemas, além da eliminação do aquecimento que são fontes de contaminação através de degasagem. É uma técnica muito recente, cuja química/dinâmica de crescimento ainda não é bem conhecida, e muito perigosa devido à toxicidade das fontes gasosas. A utilização destas fontes gasosas exige uma estudo de reações de superfície diferente das do MBE, levando a separação do CBE em uma técnica à parte em relação ao MBE.

I.3 - Epitaxia por Feixes Moleculares

I.3.1 - Introdução

Epitaxia por Feixes Moleculares (MBE) é um termo utilizado para definir o crescimento epitaxial de filmes semicondutores compostos, por um processo envolvendo a reação de um ou mais feixes térmicos de átomos ou moléculas com uma superfície mono cristalina (substrato), em um ambiente de ultra alto vácuo.

A idéia da utilização do MBE como uma técnica de crescimento de filmes semicondutores finos evoluiu a partir dos estudos de Günther (1958)⁽⁵⁾, com a criação da técnica/método de crescimento a três temperaturas. Esta técnica baseia-se no fato de a pressão de vapor dos elementos do grupo V (tabela de classificação periódica dos elementos) ser muito maior que a do composto III-V. O elemento do

grupo V é elevado a uma temperatura T_1 de forma a manter uma pressão estacionária de saturação em uma câmara de vácuo. A fonte do grupo III é elevada a uma temperatura T_3 muito maior que T_1 , fornecendo um fluxo de átomos/moléculas incidente sobre o substrato, o qual é mantido a uma temperatura T_2 , entre T_1 e T_3 . A temperatura T_2 do substrato (III-V) deve ser alta o suficiente para permitir a condensação do composto, e ao mesmo tempo garantir a reevaporação do excesso (não reagido) do grupo V da superfície do substrato.

O modelo proposto por Günther era muito simples e impreciso, pois não considerava alguns parâmetros cinéticos e geométricos do mecanismo de crescimento. Um modelo válido pôde ser criado a partir dos estudos realizados por J. R. Arthur (Bell Laboratories - USA), sobre a cinética de superfície do Ga e As sobre GaAs, que resultaram na compreensão do mecanismo de crescimento. Os estudos concentraram-se inicialmente em compostos de GaAs, mas os modelos desenvolvidos mostraram-se válidos também para outros compostos III-V como AlAs e InP. Estudos subsequentes com o aperfeiçoamento dos modelos teóricos e dos equipamentos utilizados, e conseqüentemente uma melhoria das características dos materiais crescidos (já na década de 70), mostraram o grande potencial prático desta técnica tanto na fabricação de dispositivos como na investigação de propriedades fundamentais de semicondutores.

I.3.2 - A técnica de Epitaxia por Feixes Moleculares (MBE)

A epitaxia por feixe molecular é essencialmente uma técnica de evaporação em vácuo, com duas principais características: a utilização de ultra alto vácuo, e a obtenção de um monocristal de alta pureza como produto da evaporação. Um filme é formado através da interação de um ou mais feixes moleculares incidindo sobre a superfície cristalina de um substrato aquecido. Estes feixes são obtidos através do aquecimento dos elementos ou compostos em células de efusão, dotados de obturadores para interrupção do feixe.

Um diagrama esquemático do processo é mostrado na figura 1.1 a seguir.

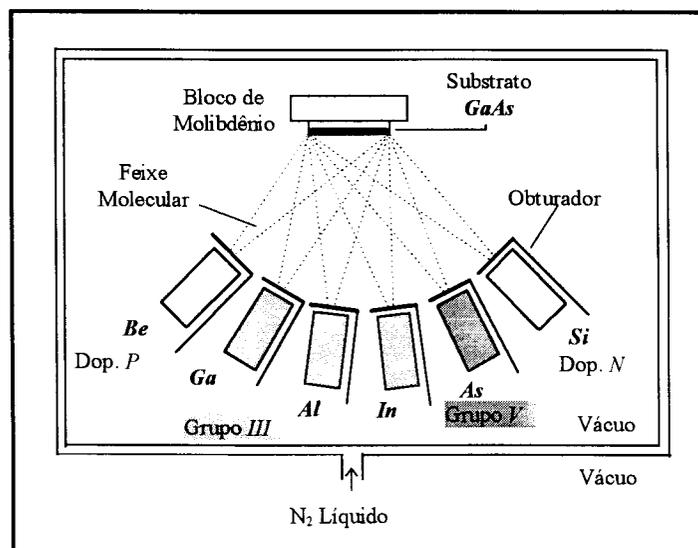


Fig. 1.1 - Processo de crescimento por MBE

O controle sobre o feixe através dos obturadores permite uma troca rápida da espécie do feixe incidente, possibilitando uma brusca alteração na composição ou dopagem do filme que está sendo crescido, o que aliado a uma baixa taxa de crescimento ($< 1\mu\text{m/hora}$) permite um controle sobre a espessura do filme com uma precisão de ordem monoatômica. Sendo ainda um crescimento a baixa temperatura, consegue-se interfaces extremamente abruptas devido a baixa interdifusão nas junções, fundamentais para dispositivos de alta velocidade. Outras características notáveis são: velocidade de crescimento variável (0.1μ a $10\mu/h$), crescimento homogêneo em composição e espessura (planar) e a possibilidade de utilização de materiais com diferentes parâmetros de rede.

Aliada a estas características, uma das grandes vantagens da técnica é a possibilidade de monitoração e controle do crescimento em tempo real (*"in situ"*) através de equipamentos de monitoração de fluxo, taxa de crescimento, impurezas presentes e da qualidade da estrutura em formação.

A taxa de crescimento é controlada basicamente pelo elemento do grupo III, sendo que o do grupo V é utilizado para estabilização da pressão e saturação do ambiente, já que não pode se incorporar sozinho por ter uma temperatura de

evaporação mais baixa que a temperatura de crescimento do substrato. Mas, deve estar presente em uma quantidade compatível com o fluxo do elemento do grupo III, pois caso contrário haveria a deposição em excesso do elemento III não formando o composto III-V desejado.

Cada fonte contém um dos elementos ou compostos necessários ao crescimento do filme, e são dispostas em relação ao substrato de modo a assegurar uma boa uniformidade do filme crescido (distribuição do fluxo). Esta distância varia de 7 cm a 12 cm, dependendo da geometria da câmara (disposição das células em relação ao substrato).

Normalmente é feita uma distinção entre o cristal antes do crescimento (chamado de substrato) e o cristal com o filme crescido (a amostra).

I.3.3 - Materiais utilizados e Aplicações

A linha principal de pesquisas através da técnica de MBE tem se concentrado nos compostos III-V, principalmente em GaAs. A preferência pelo GaAs baseia-se em sua estrutura de rede com 'gap' de transição direto (Si e Ge são indiretos), que lhe confere excelentes propriedades opto eletrônicas e grande velocidade de transição. Estas características intrínsecas, aliadas à refinada técnica de MBE, permite a confecção de dispositivos especiais e complexos muito mais rápidos que os dispositivos tradicionais à base de Silício ou Germânio. Dependendo da qualidade e complexidade exigidas, alguns dispositivos podem ser obtidos apenas por esta técnica, ou no mínimo, melhorar a qualidade e desempenho dos já existentes. Sendo um processo caro e demorado, é utilizado principalmente a nível de pesquisa, e para o estudo e confecção de dispositivos com estruturas muito complexas e especiais, inconcebíveis por outras técnicas.

Os elementos mais utilizados em crescimento por MBE são o Ga (Gálio), Al (Alumínio) e In (Índio) do grupo III e As (Arsênio) e Sb (Antimônio) do grupo V e dopantes tipo n como o Si (Silício) e Ge (Germânio) e tipo p como o Be (Berílio). Estes elementos são de alta pureza (no mínimo 99,9999% = 6N).

Além do compostos III-V já bastante estudados, recentemente tem sido desenvolvidas pesquisas com a utilização de compostos II-VI e IV-VI, abrindo novas perspectivas para esta técnica, muitas de aplicação militar.

As aplicações^(1..5) tem se concentrado em dispositivos na área de telecomunicações, comunicações óticas, e militares. Dentre muitas aplicações, podem ser citadas:

- super redes
- poços quânticos
- HEMT ("High electron mobility transistor"): transistores para aplicações em alta frequência.
- _FET: transistor de efeito de campo com uma porta "gate" muito estreito para aplicações em telecomunicações
- MES-FET ("Metal Semiconductor FET") é um transistor que combina baixo ruído e alta potência, além da alta velocidade.
- MIS-FET ("Metal Insulator FET")

- diodos de chaveamento:
 - diodos "varactor" podem ser contruídos com uma grande variedade de características (CxV) desejadas
 - diodos misturadores ("mixer") são heteroestruturas com camadas muito finas e interfaces extremamente abruptas, para operar em dezenas de Gigahertz (utilizado por exemplo em radiotelescópios)
 - diodos IMPATT ("Impact Avalanche Transit Time"), aplicável como conversor DC/AC de alta frequência e potência, em sistemas de radar

Na área de dispositivos optoeletrônicos:

- guias de ondas ópticos, praticamente sem perdas
- dispositivos de chaveamento ativo eletro óticos
- laser semiconductor de heterojunção dupla (laser DH) na faixa visível, para aplicações principalmente em comunicações por fibras óticas, com uma taxa de transmissão maior que 500 Mbits/seg. O controle de parâmetros permite a construção de lasers com comprimento de onda ajustáveis.
- laser de poços quânticos ("quantum well laser")

Capítulo II - Sistema de crescimento por MBE

II.1 Descrição do Sistema de MBE

Existem várias configurações possíveis para um sistema de crescimento por MBE, basicamente relacionadas à quantidade e função das câmaras no sistema, e à disposição das células de efusão (geometria).

Nas configurações⁽⁴⁾ mais simples são utilizadas duas câmaras, uma de introdução/preparação e uma de crescimento, e eventualmente uma terceira, de análise. Existem sistemas complexos com várias câmaras de crescimento, câmaras de caracterização, câmaras de armazenamento e litografia, e pré-câmaras de introdução/preparação. Todas interligadas e completamente automatizadas.

O sistema de MBE relativo a este trabalho (fig. 2.1) é um modelo da MECA 2000 (França), adquirido pelo grupo de semicondutores do Departamento de Física e Ciência dos Materiais (IFSC - USP). É um sistema pequeno com uma configuração bastante simples, composto por uma câmara de introdução e uma de crescimento separadas por uma válvula tipo gaveta, e com capacidade para até 6 células de efusão. Foi adquirido sem os equipamentos de controle e automação.

A figura 2.1 mostra a conexão das câmaras, com as válvulas de separação e o conjunto de bombas de vácuo:

II.1.1 - Câmara de introdução

A câmara de introdução é utilizada para introdução e troca dos substratos a serem crescidos. É necessária para se evitar a quebra do vácuo e consequente contaminação da câmara de crescimento.

Esta câmara é normalmente dotada de um carrossel com vários suportes para armazenar os substratos ou amostras, permitindo a realização de vários

crescimentos sem necessidade de abrir a câmara para troca dos substratos e amostras. Pelo menos um dos suportes é dotado de uma resistência de aquecimento para a degaseificação do substrato (pré-tratamento térmico). O objetivo deste pré-tratamento é a evaporação de resíduos de vapor de água e impurezas voláteis, antes de ser transferida para a câmara de crescimento, evitando-se assim uma contaminação maior.

A câmara de introdução do sistema em questão é dotado de um carrossel com 4 suportes para armazenamento de substratos e amostras, sendo que um deles dispõe da referida resistência de aquecimento.

Após a introdução dos substratos, é feito o bombeamento da câmara até atingir um vácuo próximo ao da câmara de crescimento. Após atingido o equilíbrio, a válvula de separação pode ser aberta para transferência do substrato/amostra. O substrato é colado sobre um bloco de molibdênio com pinos para encaixe nos suportes.

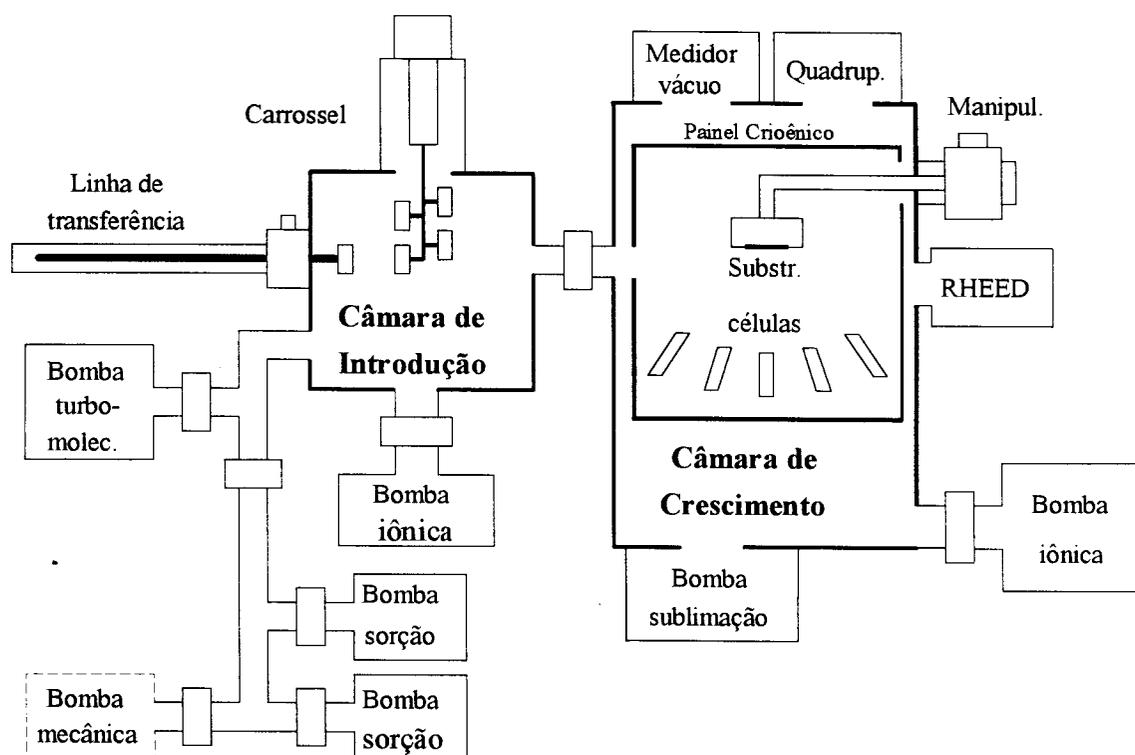


Fig. 2.1 - Conexões das câmaras do sistema de MBE e bombas de vácuo

A transferência do substrato/amostra entre a câmara de introdução e a de crescimento é feita através de uma linha de transferência com sistemas de encaixe tipo baioneta para fixar ou remover o bloco de molibdênio com o substrato (porta-substrato). Existem basicamente dois tipos de linhas de transferência: magnética e mecânica. As linhas de transferência por acoplamento magnético têm o inconveniente de não resistirem a esforços mecânicos, podendo perder o acoplamento e provocar acidentes, como por exemplo ficar atravessada na válvula de separação, a qual deve ser fechada após a transferência. As linhas de transferência mecânicas são mais complexas, mas muito mais confiáveis e fáceis de serem manipuladas. A linha de transferência do sistema em questão era do tipo magnética, trocada posteriormente por uma mecânica, devido aos problemas expostos.

O vácuo nesta câmara é mantido por uma bomba iônica de 50 l/s, tendo ainda uma bomba turbo molecular e uma linha para bombeamento primário (fig. 2.1) composta por 2 bombas de sorção⁽⁴⁾. Todo o sistema de bombeamento é explicado no item II.3.

II.1.2 - Câmara de crescimento

A câmara de crescimento deve ser aberta somente em caso de extrema necessidade, como por exemplo, para recarga das células de efusão e reposição de componentes internos dos equipamentos de medida e bombas de vácuo. Pois uma vez aberta a câmara, são necessários vários dias de limpeza e bombeamento, e busca de eventuais vazamentos até atingir boas condições para o crescimento, além de exigir vários crescimentos iniciais para recalibração dos parâmetros e verificação da incorporação de contaminantes.

Os principais componentes de uma câmara de crescimento são^(1,2):

- fontes de fluxo: para fornecer um feixe atômico/molecular estável e de alta pureza. Existem vários tipos de fontes: células de Knudsen, células de dissociação (“cracking”), fontes de feixes ionizados, eletroquímicos, etc. No caso do MBE, é utilizado convencionalmente a célula de Knudsen. (ver II.5)

- obturadores ('shutters'): individuais para cada célula, permitem o controle/interrupção do fluxo do feixe incidente sobre o substrato. Devem ter ação rápida e causar uma mínima perturbação térmica na célula. Eventualmente, utiliza-se obturadores até no substrato.

- suporte de substrato (manipulador): com resistência de aquecimento e termopar ou pirômetro ótico para leitura de temperatura. De preferência, dotado de um sistema rotativo para garantir uma boa uniformidade do filme crescido, e auxiliar o alinhamento do RHEED (ver II.4).

- monitores de fluxo e crescimento: para fornecer informações sobre a taxa de deposição e estrutura do filme em crescimento. Os principais equipamentos utilizados para isso são: RHEED, medidores de fluxo e vácuo (sensor 'Bayard Alpert') e espectrômetros quadrupolares de massa. (ver II.2)

- bombas de ultra alto vácuo: para garantir um ambiente ideal para o crescimento, eliminando gases residuais que poderiam contaminar o filme crescido. (ver II.3)

Quanto à disposição das células dentro da câmara (geometria), as configurações podem ser: vertical, semi horizontal ou horizontal.

Na configuração vertical, as células são dispostas verticalmente em relação ao substrato, com as seguintes vantagens:

- podem ser carregadas com máximo de seu volume, reduzindo a frequência de abertura da câmara para recarga das células.

- podem ser dispostas bem próximas uma da outra, e sendo praticamente normais ao substrato, a distribuição de fluxo é bastante uniforme. Isto permite uma aproximação maior entre o substrato e as células, resultando em uma menor perda de material e maior taxa de crescimento.

Seria a configuração ideal, não fosse o alto risco de contaminação das cargas, provocado pela precipitação de flocos formados pelos elementos/compostos evaporados.

Devido a esses inconvenientes, a maioria das câmaras existentes atualmente utilizam a configuração semi-horizontal ou horizontal.

A câmara de crescimento do sistema em questão é do tipo semi-horizontal com suas 6 células instaladas em duas flanges a 45° de inclinação. É composta pelos seguintes equipamentos:

- suporte para substrato sem sistema rotativo, com uma resistência de aquecimento de Tântalo e um termopar (cromel/alumel) para leitura da temperatura.

- 6 células de efusão com resistências de aquecimento e termopares (tungstênio/rênio) para leitura da temperatura. Existem 2 tipos: as de alta temperatura que podem atingir até 2000 °C, e as de baixa, até 700 °C.

- obturadores tipo rotativos, individuais para cada célula

- uma bomba iônica de 400 l/s

- uma bomba de sublimação de titânio de 1000 l/s

- medidor de vácuo tipo 'Bayard Alpert'

- equipamentos de caracterização: RHEED e quadruplo/RGA.

II.1.3 - Câmara de Análise

A câmara de análise é uma câmara de ultra alto vácuo que pode ou não estar conectada ao sistema (câmara de introdução ou crescimento). Nela podem ser instalados vários equipamentos capazes de diagnosticar a composição e a qualidade do substrato/amostra. Esta câmara, quando conectada ao sistema, permite fazer uma análise do substrato/amostra antes e depois do crescimento, rapidamente, e sem exposição às contaminações ambientais.

Dentre os equipamentos de medida possíveis de serem instalados na câmara, podem ser citados:

- **SIMS** ("Secondary Ion Mass Spectroscopy"): determina a composição química do substrato e da superfície do filme crescido, e tem caráter destrutivo.

- **AES** ("Auger Electron Spectroscopy"): permite a caracterização da superfície do substrato, e a análise e determinação da composição do filme crescido.

- **XPS** (Espectroscopia de Fotoelétrons induzidos por raio-X):

- **LEED** ("Low Energy Electron Diffraction"):

No sistema em questão existe uma câmara de análise, mas foi montada separada do sistema de MBE. Esta câmara, em estágio de implantação, será dotada apenas do SIMS.

II.1.4 - Ambiente de trabalho e preparação

Usualmente, as câmaras de UHV e equipamentos associados permanecem sob condições ambientais controladas e limpas. A rigor é necessário um ambiente com grau de limpeza classe 1000 ppm (partículas por pé cúbico) a classe 100 ppm, e baixa umidade (< 30%) e temperatura ambiente em torno de 20 °C. Para gerar estas condições ambientais são necessárias instalações especiais de alto custo. Estas condições são necessárias para reduzir contaminações ambientais adquiridas durante a preparação química, transporte e introdução na câmara, e quando da abertura da câmara para recarga das células e/ou reposição de componentes internos dos equipamentos.

Além dos equipamentos voltados ao crescimento, o sistema tem ainda associado uma sala de tratamento/preparação química, sob as mesmas condições ambientais que o do sistema de MBE. Esta sala é utilizada para preparação do substrato para crescimento, o qual passa por um cuidadoso processo de limpeza e preparação por tratamento químico, utilizando produtos de alta pureza e muitos deles perigosos/tóxicos.

Para reduzir os custos com a instalação de uma sala limpa, alguns sistemas tem isolado apenas um pequeno ambiente limpo ao redor da câmara de introdução. A preparação do substrato poderia também ser feita neste mesmo local, ou em uma capela especial com alto grau de limpeza. De qualquer forma, o objetivo principal é evitar qualquer contato do substrato com um ambiente ou produto contaminado.

No sistema em questão, existe um sistema de ar condicionado dotado de filtros de partículas e controle de umidade e temperatura, mas insuficientes para fornecer as condições ideais. Para solucionar este problema, foi adquirido um sistema de filtragem de fluxo laminar que fornece o ambiente adequado, instalado sobre a câmara de introdução.

II.2 - Equipamentos de Caracterização 'in situ'

A técnica de MBE permite um acompanhamento bastante detalhado e em tempo real ('in situ') do crescimento através de algumas técnicas de medida e análise instaladas na câmara de crescimento, tais como:

II.2.1 - RHEED ("Reflection High Energy Electron Diffraction") :

O RHEED⁽⁴⁾ é o mais importante equipamento de caracterização 'in situ' (em tempo real) do crescimento. A técnica (fig. 2.2) consiste na incidência em ângulo rasante (1 a 2 graus) de um feixe de elétrons monoenergético e colimado gerado por um canhão de 3 a 50 KV, sobre a superfície da amostra em crescimento. O feixe penetra algumas camadas no cristal em crescimento, cuja difração pode ser vista sobre uma tela fosforescente. A imagem da difração formada na tela segue alguns padrões de linhas e pontos (lei da difração de Bragg), relacionadas à estrutura das camadas em crescimento. Além da estrutura, pode se obter outras informações como a morfologia, a uniformidade, a orientação e a taxa de crescimento.

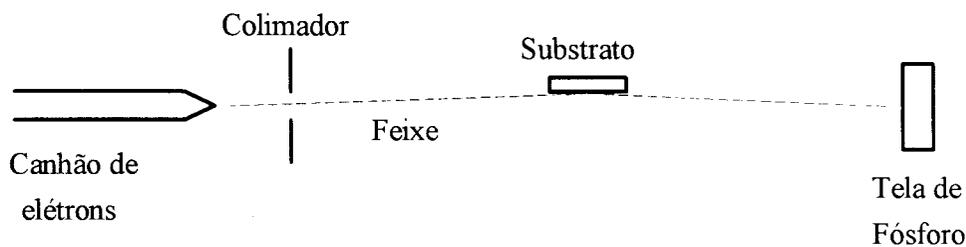


Fig. 2.2 - Técnica de RHEED

A taxa de crescimento é indicada pelas variações da intensidade do sinal na tela (luminosidade), onde cada ciclo corresponde a uma camada crescida. A variação da intensidade pode ser explicada pela variação da refletividade da superfície durante a formação de uma monocamada. Uma camada completa é lisa

dando a máxima refletividade, e à medida que se cresce uma nova monocamada, aumenta a rugosidade da superfície e diminui a intensidade do sinal na tela. A intensidade do sinal chega a um mínimo na metade da camada depositada, voltando a aumentar até um máximo quando a camada estiver completa.

A intensidade, a definição das linhas e seu padrão, dependem da orientação/alinhamento do substrato em relação ao feixe, bem como sua qualidade. A intensidade do sinal depende ainda da intensidade do feixe de elétrons e da qualidade/estado da janela de fósforo. O sinal da tela do RHEED pode ainda ser usado para a calibração da temperatura do substrato: antes do crescimento, deve ser providenciada a desoxidação da superfície, que ocorre a uma temperatura de 580 °C, e corresponde a uma mudança de padrão na tela, de imagem difusa para anéis amorfos, depois para pontos e finalmente para linhas.

II.2.2 - Espectrômetro quadrupolar de massa / RGA (“Residual Gas Analyser”)

Permite a realização de uma análise qualitativa e quantitativa dos elementos presentes na câmara de crescimento. A técnica utilizada pelo espectrômetro consiste na ionização e deflexão das moléculas presentes na câmara através de um alto campo elétrico, os quais são recolhidos por um coletor focalizado gerando uma pequena corrente. Assim, cada valor de intensidade de campo aplicado corresponde a uma diferente massa molecular lida pelo coletor. O valor dessa massa permite a determinação de sua composição, e a intensidade de corrente do coletor fornece a quantidade do material presente na câmara.

Assim, esse equipamento fornece importantes dados sobre as impurezas presentes na câmara, permitindo a determinação de contaminantes e auxiliando a análise da amostra crescida, bem como na detecção de vazamentos. Juntamente com o RHEED, são praticamente indispensáveis em um sistema de MBE.

II.2.3 - Medidor de fluxo (calibrador iônico)⁽⁴⁾

Equipamento não tão essencial quanto os anteriores, é usado para medir o fluxo dos elementos/compostos incidindo sobre o substrato. Este medidor é um 'ion gauge' ('Bayard Alpert') posicionado na linha de fluxo dos materiais, antes de se iniciar o crescimento. Ele permite fazer uma calibração prévia do crescimento, bem como a calibração de *temperatura da células x fluxo incidente*.

II.2.4 - Medidor de pressão

É um medidor do tipo 'Bayard Alpert' para medidas de pressão da câmara de crescimento, com um mostrador analógico de 10^{-3} a 10^{-11} mbar e uma saída analógica correspondente de 0V a 10V. Além da medida de pressão, o medidor pode ser utilizado também como medidor de fluxo para controlar a pressão de saturação do elemento do grupo V (*As*) durante o crescimento.

II.3 - Ultra alto vácuo

O sistema de bombas de ultra alto vácuo é um dos equipamentos mais importantes do sistema de MBE. Pois é o responsável pela manutenção de um ambiente ultra limpo e de ultra alto vácuo, adequado ao crescimento. Para se obter estas condições, os cuidados começam com a escolha de materiais adequados para a construção da câmara, os quais devem resistir a ≈ 200 °C sem sofrer degaseificação, o que poderia contaminar a câmara. O corpo e muitas partes da câmara são construídas em aço inoxidável, limpas por eletropolimento e degaseificadas. Outros materiais muito utilizados são o Tântalo, Tungstênio, Molibdênio e materiais cerâmicos como alumina e o PBN (Nitreto de Boro Pirolítico), que suportam altas temperaturas sem sofrer deterioração.

Para atingir o ultra alto vácuo desejado (ordem de 10^{-11} mbar $\approx 10^{-14}$ atm), o bombeamento é realizado em 3 etapas. A figura 2.1 já mostrada anteriormente, mostra a conexão das bombas nas câmaras:

- Bombeamento primário: inicialização do vácuo a partir da pressão ambiente até 10^{-3} mbar, realizados por bombas de sorção, e eventualmente, auxiliadas por bombas mecânicas.
- Bombeamento secundário (até alto vácuo): realizado por bombas turbo moleculares e bombas iônicas, atingindo uma pressão de 10^{-7} a 10^{-10} mbar
- Ultra alto vácuo: utilização de bombas iônicas e bombas de sublimação de titânio conjuntamente, alcançando-se assim 10^{-11} mbar. Nesta etapa, o painel criogênico fornece um auxílio fundamental.

Bomba mecânica

O uso da bomba mecânica tem sido evitado por liberar resíduos de óleo que podem contaminar o sistema. Mas é de grande utilidade no bombeamento primário devido a sua rapidez e grande capacidade. Para reduzir essa contaminação, são utilizados filtros entre a bomba e a linha de vácuo.

Bomba de sorção

A bomba de sorção consiste em um cilindro de aço inoxidável, contendo várias palhetas de cobre para transferência de calor. O cilindro é carregado com zeolita que tem a propriedade de adsorver gases (até um limite de saturação) quando resfriado, e inversamente, liberar gases quando aquecido. O resfriamento é feito com nitrogênio líquido, em um recipiente de isopor envolvendo o cilindro.

Esse cilindro contém uma válvula de ligação com o sistema para o bombeamento, e uma outra abertura para o ambiente para liberar os gases adsorvidos.

Bomba turbo molecular

Essa bomba pode alcançar alto vácuo (até 10^{-8} mbar), devendo partir de um pré-vácuo de 10^{-3} mbar para reduzir a contaminação. A bomba turbo em si é limpa, mas ela necessita do auxílio de uma bomba mecânica, que pode introduzir contaminações em caso de falha. Atualmente, já existem bombas mecânicas limpas, bombas secas, ou bombas de membrana que podem ser utilizadas como auxiliares para a bomba turbo-molecular.

· Normalmente, ela é utilizada entre o bombeamento primário e o secundário, antes da bomba iônica (nunca em conjunto). O objetivo disso é atingir um alto vácuo mais rapidamente e diminuir o esforço da bomba iônica, além de evitar sua rápida saturação e contaminação.

Bomba iônica

O funcionamento das bombas iônicas é baseado na absorção de moléculas ionizadas por um alto campo elétrico. A idéia consiste na aplicação de uma alta

tensão (alguns KV) entre eletrodos de titânio: um anodo composto por várias células, colocado entre duas placas catodo.

Para aumentar a eficiência da bomba, um imã permanente é colocado de forma a criar um campo magnético de 1 a 2 Kilo Gauss perpendicular aos eletrodos. Este campo leva á formação de uma trajetória helicoidal aumentando o percurso dos ions e consequentemente da probabilidade de ionização, e permite descargas a pressões mais baixas. O alto campo acelera os íons, dando-lhes energia suficiente para penetrar nas placas.

Bomba de sublimação de titânio

O funcionamento dessa bomba baseia-se na alta capacidade de reação do titânio. O titânio tem uma pressão de vapor relativamente baixa e um largo espectro de reação, principalmente com O₂, N₂, CO₂, H₂, CO e vapor de água.

Um evaporador de titânio pode ser feito com um filamento de tungstênio envolvido por titânio. A função do tungstênio é manter o titânio fundido no filamento, por tensão superficial. O aquecimento é feito resistivamente com a passagem de uma alta corrente pelo filamento, atingindo uma temperatura de até 1500 °C.

A evaporação leva à formação de um filme de titânio altamente ativo nas paredes do sistema. As moléculas de gás que colidem com este filme, reagem com o titânio formando um composto sólido estável, reduzindo a pressão do sistema.

Esta bomba é a responsável pela obtenção do ultra alto vácuo e um ambiente ultra limpo, devido a sua capacidade de bombeamento de moléculas pesadas que não são eliminadas pela bomba iônica. É sempre utilizada juntamente com outra bomba (normalmente a iônica) e somente em alto vácuo.

Câmara/painel criogênico

O painel criogênico tem tripla função:

- isolamento térmico entre as células
- redução da constante térmica da célula, facilitando o seu controle
- é um importante sistema auxiliar de bombeamento, já que evita a degasagem/evaporação das paredes da câmara, e ao mesmo tempo que capturam as moléculas no ambiente que dirigem-se a partes mais frias da câmara para se fixarem.

II.4 - Suporte para substrato (Manipulador)

O manipulador instalado no sistema permite três graus de liberdade lineares (X, Y e Z) e um rotativo para posicionar para crescimento ou transferência. É dotado de um suporte para substrato com filamento de tântalo para aquecimento do substrato e um termopar para leitura de temperatura. O termopar é disposto normalmente sob o bloco, de uma forma que garanta um bom contato térmico e repetitividade de medida. Em alguns casos, é utilizado um pirômetro ótico para a leitura de temperatura, para o qual, deve-se retirar uma das células para posicionamento do pirômetro.

A forma e disposição do filamento de aquecimento são importantes, devendo garantir uma boa uniformidade de aquecimento e evitar a formação de campos que possam interferir no feixe do RHEED.

Os suportes variam de 2" a 5" de diâmetro, dependendo da geometria da câmara e das células de efusão (distribuição de fluxo).

Existem ainda os suportes com recursos de rotação do substrato, que permitem uma maior uniformidade na deposição das camadas, e também, ajustar o alinhamento do substrato em relação ao RHEED para visualizar a reconstrução em várias direções.

No nosso caso, que não dispõe deste recurso de rotação, o substrato deve ser colado previamente alinhado, e durante a transferência, colocá-lo na posição correta.

II.5 - Células de efusão

As células de efusão⁽¹⁾ (fig. 2.3) são pequenos fornos nos quais é feito o aquecimento dos elementos utilizados no MBE, e dotados de obturadores para interrupção do fluxo. Os elementos são colocados em cadinhos de grafite de alta pureza ou de nitreto de boro pirolítico (PBN), encaixados em um suporte na célula. Envolvendo este suporte, é enrolada uma resistência de Tântalo para o aquecimento, com aproximadamente 0.5Ω . A temperatura na célula pode chegar a até $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$, e a leitura é feita através de um termopar de Tungstênio/Rênio (W-5%Re x W-26%Re) que pode suportar até $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ no vácuo⁽⁷⁾.

Na escolha do cadinho, os de grafite têm a vantagem do baixo custo e pequena inércia térmica. A sua maleabilidade permite a construção de cadinhos com um contato térmico bom e preciso, resultando em uma boa precisão de leitura e estabilidade térmica. Os problemas no uso do grafite são a sua difícil degaseificação e reatividade com os elementos. Já o PBN, tem um alto custo e pouca maleabilidade, e uma inércia térmica maior, que prejudica a medida e o controle de temperatura. Apesar disto, são preferidas por não apresentarem os problemas descritos acima, do cadinho de grafite. Eventualmente são também utilizados cadinhos de quartzo para as células de baixa temperatura, os quais apresentam baixa inércia térmica.

As células de efusão são construídas com materiais que suportam altas temperaturas, sem sofrer deterioração ou degaseificação, que poderia contaminar os elementos e a amostra crescida. Normalmente são utilizados a alumina e PBN como isolantes, e o tântalo. As células são termicamente isoladas/refrigeradas através de uma câmara/painel criogênica envolvente, o que ajuda a melhorar a resposta térmica da célula e evita o aquecimento das paredes adjacentes que poderia levar a uma degaseificação e contaminação da câmara.

Algumas células podem ser construídas para operarem apenas em baixas temperaturas (até $700\text{ }^{\circ}\text{C}$), utilizando-se outros tipos de materiais mais baratos que suportam até esta temperatura sem problemas.

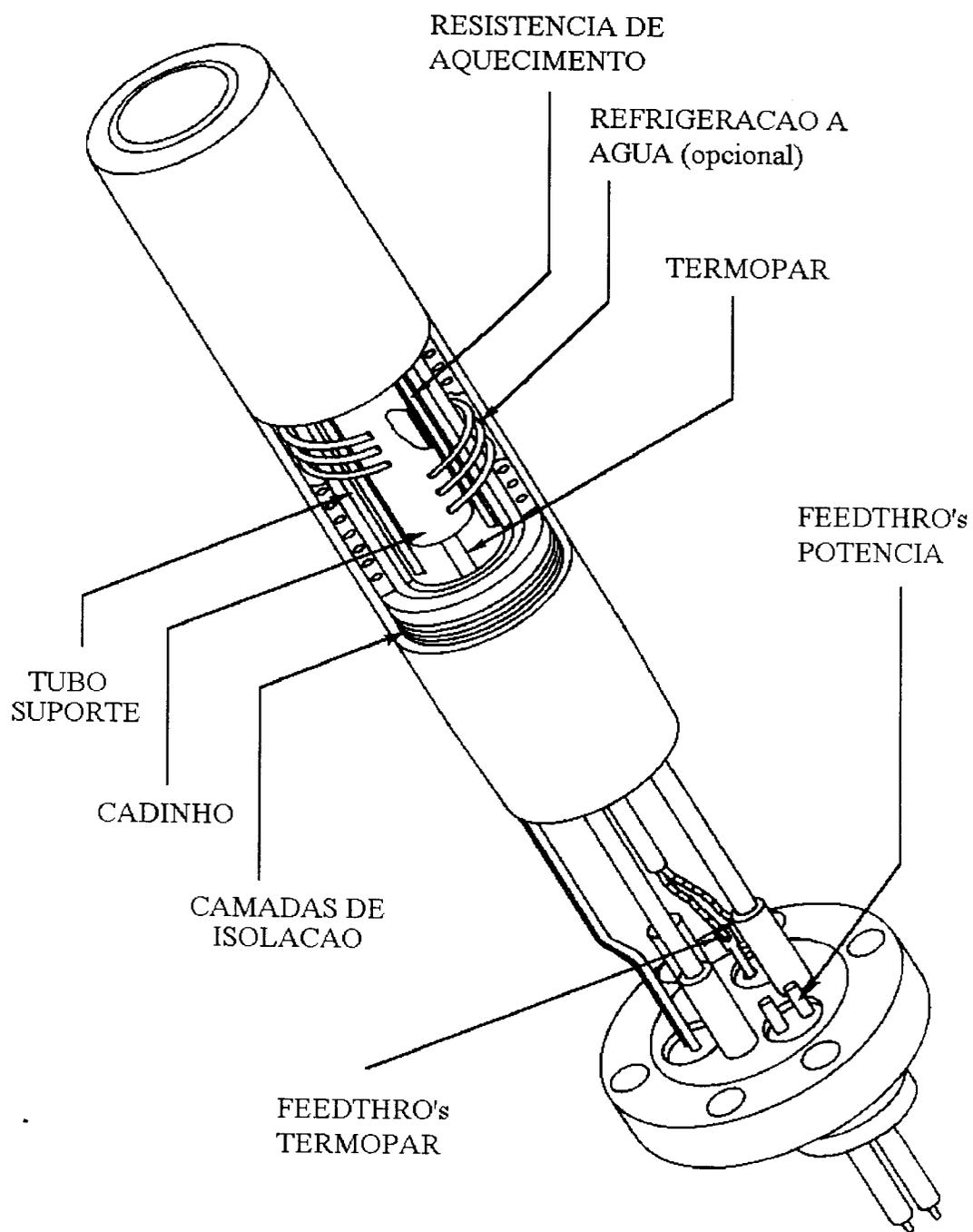


Fig. 2.3 - Célula de Efusão tipo Knudsen

Na construção de uma célula, devem ser observados os seguintes requisitos: resposta térmica rápida, uniformidade de aquecimento, isolamento térmico e precisão de leitura (contato térmico). Existem ainda outros fatores a serem observados, como a geometria da célula e o nível do elemento no cadinho, que determinam a distribuição do fluxo (feixe molecular) de saída da célula. Algumas células de Arsênio possuem um dispositivo especial em sua extremidade de saída que providencia a quebra das moléculas de As_4 para As_2 , o qual possui um coeficiente de adesão maior, reduzindo o desperdício. Os cadinhos são também feitos em várias geometrias e tamanhos (capacidade).

Os requisitos acima interferem diretamente no desempenho de qualquer sistema de controle de temperatura. Uma resposta térmica lenta dificulta o controle, além de exigir um longo tempo de estabilização. Já um contato térmico deficiente ou aquecimento não uniforme pode levar a uma leitura errônea da temperatura.

As exigências operacionais das células são a estabilidade e a repetitividade de temperatura. A faixa de temperatura de trabalho da célula varia de 250 °C até 1500 °C, dependendo do elemento ou composto a ser aquecido. Por exemplo, a faixa de trabalho do Arsênio é em torno de 300 °C e o do Silício, em torno de 1300 °C.

A técnica de MBE exige um controle e estabilidade em torno de ± 0.5 °C, pois os fluxos de alguns elementos são muito sensíveis à temperatura. A variação de alguns graus pode alterar consideravelmente a composição/característica do filme crescido. Adicionalmente, devido à baixa taxa de crescimento ($\mu\text{m}/\text{hora}$), um crescimento pode durar até um dia inteiro.

As células de efusão são dotadas de obturadores ('shutters') que permitem uma brusca interrupção do fluxo. Ou seja, a alteração brusca da composição ou dopagem do filme em crescimento (junções/interfaces abruptas), possibilitando ainda a inserção de camadas muito finas, de ordem até monoatômica (δ). Mas para isso, um controle rápido com tempo preciso é fundamental: o tempo de atuação dos obturadores deve ser bem menor que o tempo de deposição de uma monocamada atômica, que pode ser menor que 1 segundo.

Os obturadores são normalmente construídos com material refratário, para minimizar a reação com o material que está sendo evaporado. A sua operação pode ser de ação rotativa ou linear

II.6 - Requisitos operacionais

Para realizar o crescimento de algum semiconductor, os parâmetros básicos de controle são:

- Temperatura da célula de efusão, que irá determinar o fluxo do material incidindo sobre o substrato e a sua taxa de crescimento. Para alguns materiais, o controle e estabilidade de temperatura devem ser bastante precisos, pois a variação de alguns graus corresponde a várias unidades percentuais de variação na dopagem.

- No caso do elemento do grupo V (As ou Sb), o controle é feito sobre a pressão de saturação do elemento na câmara, variando-se sua temperatura.

- Temperatura do substrato. A temperatura do substrato não é tão crítica, admitindo a variação de alguns graus sem alterar as características do filme crescido.

- Controle dos obturadores: o acionamento dos obturadores deve ser rápido e preciso, afim de se obter junções abruptas. Para o crescimento de estruturas complexas, deve-se ter um controle de deposição de ordem monoatômica. Assim, considerando uma velocidade de 1 monocamada/seg, o tempo de atuação do obturador deve ser muito rápido, idealmente $< 100 \text{ ms}$. Para preencher este requisito, são normalmente utilizados atuadores eletro-pneumáticos. Pode-se utilizar atuadores mais lentos como motores de passo ou DC com redutor, sendo que neste caso haveria a necessidade de reduzir a taxa de crescimento para obter dispositivos mais complexos e de boa qualidade.

Durante o crescimento, podem ser utilizadas diferentes temperaturas de crescimento para o substrato e as células. Assim, deve-se ter os parâmetros de controle bem ajustados para se conseguir a máxima velocidade de resposta possível, o qual, depende muito da constante térmica das células e do substrato.

Além destes parâmetros a serem controlados durante o crescimento, devem ainda ser monitorados e arquivados para posterior consulta algumas informações importantes tais como a pressão na câmara, o espectro de impurezas fornecidas

pelo quadrupolo, e informações fornecidas pelo RHEED como taxa de crescimento e padrão de reconstrução.

Outro aspecto de fundamental importância é a reprodutibilidade de crescimento, ou a estabilidade com o tempo, a qual pode ser afetada por vários fatores como o nível dos elementos nas células, variação da contaminação na câmara, diferenças na preparação do substrato, etc.

A idéia de se adquirir um sistema de MBE despojado e desenvolver a instrumentação necessária para a sua operação foi fundamentada nos seguintes fatores: baixo custo, desenvolvimento de tecnologia, e a facilidade de manutenção.

Foi necessário desenvolver praticamente toda a instrumentação referente ao controle e automação do crescimento, como indicado pelo quadro pontilhado na figura 3.1. Foram desenvolvidos e implementados os seguintes itens:

- 1 - Controladores de temperatura P.I.D. analógicos, para o substrato e células de efusão.
- 2 - Módulo de controle e automação, composto pelos seguintes itens:
 - Unidade Central de Processamento (UCP) baseado no microprocessador Z80 para controle das interfaces e comunicação de dados
 - interface Analógico/Digital bipolar de 14 bits com 8 canais de entrada
 - interface Digital/Analógica unipolar de 12 bits contendo 8 canais de saída
 - interfaces de alarme e monitoração do sistema
 - interfaces digitais de controle e acionamento
- 3 - Circuito para captação e condicionamento do sinal na tela do RHEED
- 4 - Acionamento dos obturadores através de motores de passo.

III.2 - Controlador de temperatura

Os controladores de temperatura foram desenvolvidos para o controle de temperatura das células de efusão, do substrato e do carrossel do sistema de MBE. Esses controladores são analógicos, podendo funcionar autonomamente ou ser controlados externamente através da aplicação de uma tensão de referência. O controle é feito pelo método proporcional, integral e diferencial (P.I.D.), implementados através de amplificadores operacionais, com o qual se consegue uma estabilidade de até ± 0.5 °C dentro da faixa de operação de cada célula. Foram montados em módulos (bastidores) para fixação em RACK padrão 19" (2 controladores por módulo).

Os objetivos fundamentais no controle das células são a estabilidade, velocidade de resposta e a repetitividade de temperatura. O parâmetro que mais afeta o controlador para atingir estes objetivos é a constante térmica da célula, que determina o seu desempenho quanto à velocidade e estabilidade.

III.2.1 - Controlador de temperatura para as células de efusão

Como já foi descrito no item II.5, as células de efusão são pequenos fornos utilizados para aquecer os elementos e gerar os feixes moleculares. O aquecimento é feito através de uma resistência de Tântalo de ≈ 0.5 a 2.5Ω (dependendo da célula) enrolada em torno do cadinho, e a leitura da temperatura do elemento é feita através de um termopar de Tungstênio - Rênio (W-5%Re x W-26%Re). A faixa de temperatura de trabalho da célula varia de de 250 °C até 1500 °C, dependendo do elemento:

As - 250 a 350 °C

Ga - 850 a 1150 °C

In - 550 a 850 °C

Al - 1000 a 1300 °C

Si - 1100 a 1400 °C

Existem quatro tipos de células diferentes instaladas no sistema de MBE, cada uma com características próprias. Do total de seis células, duas foram adquiridas juntamente com o sistema, uma foi construída no próprio laboratório, uma foi adquirida da Rússia, e outras duas adquiridas posteriormente da própria MECA 2000, um modelo diferente das primeiras.

A figura 3.2 mostra o diagrama em blocos do controlador de temperatura construído, onde cada bloco corresponde a uma placa de circuito impresso interligadas através de cabos conectores. Isto permite uma rápida e fácil substituição de placas em caso de problemas.

Como mostra a figura 3.2, o controlador de temperatura é constituído pelos seguintes blocos:

- mostrador de 3 1/2 dígitos \Rightarrow 2000 °C de fundo de escala
- referência estável de tensão \Leftrightarrow temperatura

- amplificador de termopar - com compensação de temperatura ambiente e linearização da curva do termopar.
- circuito de controle P. I. D.
- circuito de potência com controle de fase e gerador de rampa sincronizada com a rede.

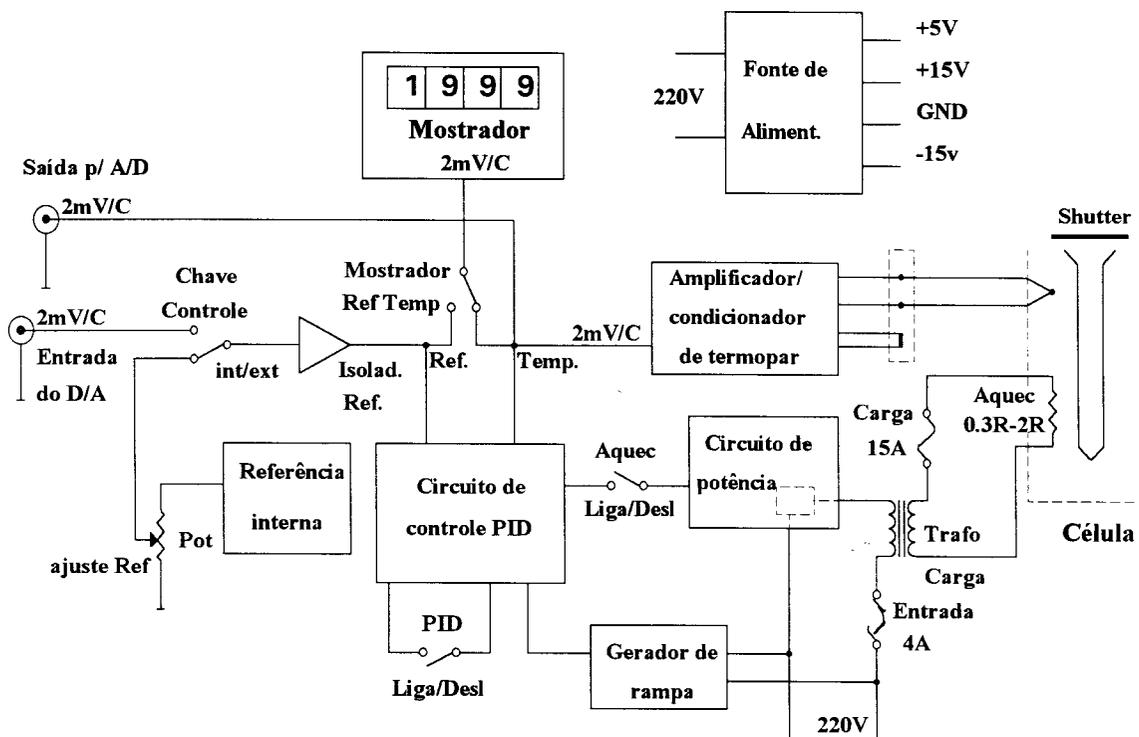


Fig 3.2 - Diagrama do controlador de temperatura

Mostrador de 3 1/2 dígitos

O mostrador consiste basicamente em um conversor analógico digital bipolar (Intersil ICL 7107) com saída direta para mostrador de 3 1/2 dígitos, ou seja, 2000 níveis (≈ 11 bits). A saída é composta por acionadores ('drivers') para "display" de LEDs de 7 segmentos. O conversor é do tipo integrador, com uma velocidade de conversão ou taxa de amostragem de ≈ 300 ms. Necessita de poucos componentes externos para seu funcionamento, para o qual bastam apenas 8

resistores e capacitores, e um circuito de referência para ajuste de seu fundo de escala.

O mostrador foi ajustado para fornecer a leitura da temperatura do termopar diretamente em °C, fornecido pelo amplificador/condicionador de termopar (2.0 mV/ °C). Para isto bastou ajustar sua referência para 4 Volts, equivalentes a 2000 °C de fundo de escala. Além do acompanhamento da temperatura da célula, o mostrador é utilizado para monitorar o ajuste da temperatura de referência ('set point'). Foi instalada uma chave para selecionar entre a temperatura de referência e a temperatura da célula, como indicada na figura 3.2.

O esquema elétrico completo do mostrador está exposto no apêndice A.1.1.

Referência de tensão

A tensão de referência para o controlador de temperatura é baseado num regulador de tensão de precisão, dotado de um diodo zener de referência de 6.3V de alta estabilidade, com compensação térmica (o CI LM723).

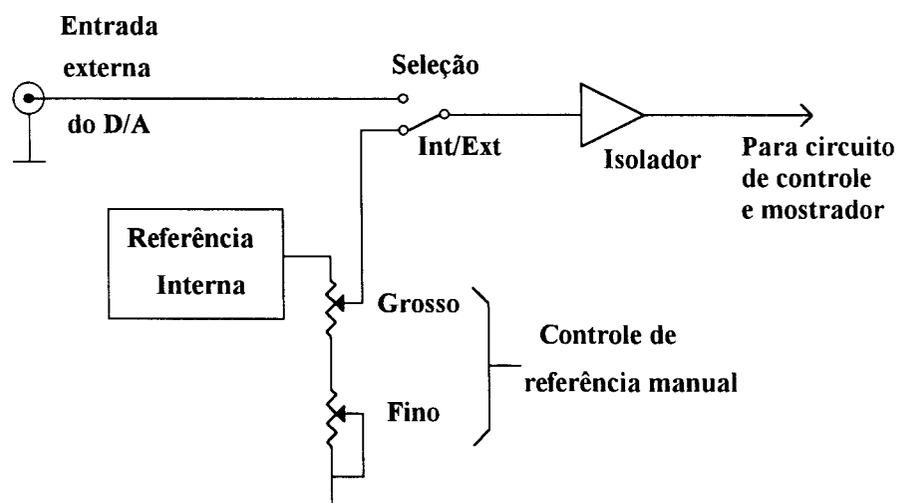


Fig. 3.3 - Esquema do circuito de referência

A tensão de referência ou 'set point' de temperatura (fig. 3.3) é ajustada através de dois potenciômetros multivoltas, sendo um para posicionamento grosso e outro para o fino. Para evitar variações devido a carregamento do circuito, essa tensão é isolada ('buffer') por um amplificador operacional antes de ser utilizada no circuito. O ajuste da tensão de referência pode ser monitorado através do mostrador, com leitura direta em temperatura (°C).

Amplificador e circuito de linearização de termopar

Uma amplificação linear da tensão do termopar resultaria em um erro de leitura direta de até ± 30 °C (ver fig. 3.5). Com a implementação de um circuito de linearização⁽⁸⁾, esse erro foi reduzido para menos que ± 0.5 °C na faixa de interesse (região de trabalho de cada célula).

A tensão do termopar (fig. 3.4) é amplificada em aproximadamente 200 vezes e sua curva de transferência linearizada através de um gerador de funções não lineares, baseado em redes de resistores e diodos. O método, chamado de aproximação por segmentos de retas, consiste basicamente na alteração do ganho do amplificador (redução ou aumento) quando a tensão de entrada atinge determinados valores chamados de pontos de quebra ("break point"), resultando em segmentos de retas de ganhos diferentes. Os circuitos de alteração de ganho foram implementados na entrada do amplificador, utilizando os tipos⁽⁸⁾ 'shunt' para redução e 'série' para aumento do ganho.

A linearização foi implementada utilizando-se 6 segmentos, composto por dois pontos de redução e 3 pontos de aumento de ganho (ver fig. 3.5). Com isto, foi conseguindo um ajuste da curva do termopar com um erro máximo de leitura de ± 0.5 °C na região de interesse (150 °C a 1500 °C). A saída do circuito fornece uma tensão de 2.0 mV/ °C, linear.

O circuito de compensação de temperatura ambiente para o termopar (fig. 3.4) foi implementado através de um sensor de temperatura tipo PTC (coeficiente positivo de temperatura) (KTY 84 - Philips), colocado junto à junção fria no conector de entrada do termopar. O sinal do sensor é amplificado e somado ao sinal do termopar, após a linearização.

Com esta compensação e mais o circuito de linearização, consegue se uma precisão de leitura de $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$. Esta precisão pode no entanto não corresponder à temperatura real na célula de efusão, pois existe um erro de precisão inerente ao termopar, que pode chegar a até $8 \text{ }^\circ\text{C}$ para altas temperatura ($1500 \text{ }^\circ\text{C}$). De qualquer forma a precisão de leitura não é tão importante, mas sim a repetitividade, já que é feita uma calibração de crescimento baseado nos equipamentos de caracterização. Normalmente, cada sistema de MBE tem sua própria calibração.

No amplificador do termopar foi incluído um circuito de proteção contra termopar aberto, que consiste simplesmente na colocação de um resistor entre uma das entradas e a alimentação. Quando o termopar abrir, a leitura saturará para um valor de temperatura positivo, levando o circuito de controle a cortar o aquecimento da célula. A escolha de um sensor para a temperatura ambiente tipo PTC ao invés de um NTC (coeficiente de temperatura negativo) foi fundamentada na mesma idéia (saturação positiva em caso de falha).

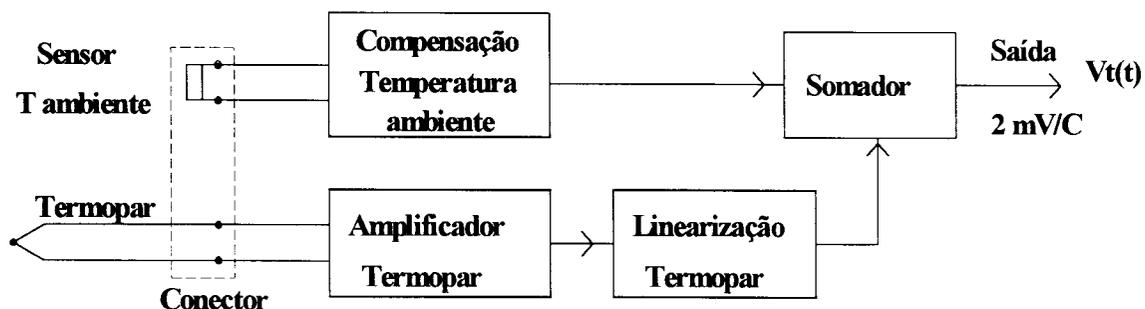


Fig. 3.4 - Amplificador e condicionador de termopar

O esquema do amplificador de termopar mais os circuitos de compensação e linearização estão detalhados no apêndice A.1.2.

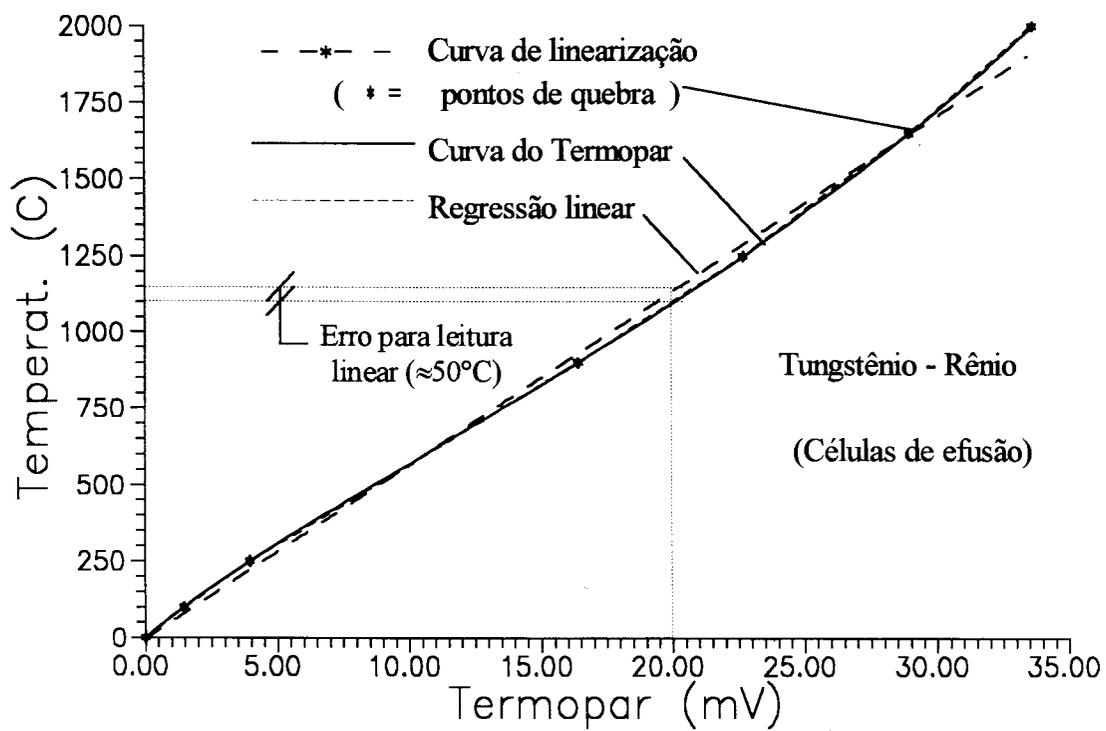


Fig. 3.5 Curva do termopar e segmentos de linearização

Controle P. I. D.

O circuito de controle⁽⁹⁾ consiste em um amplificador de erro, mais os circuitos proporcional, integral e diferencial. A figura 3.6 mostra o diagrama geral do circuito PID utilizado.

Alguns pontos que merecem atenção especial em um circuito PID são o amplificador e o integrador de erro, que devem ter boa estabilidade e precisão, e devem ser cuidadosamente ajustados. O ajuste incorreto dessas partes pode levar a uma estabilização fora da temperatura de referência ('set point'). O ajuste adequado dos parâmetros é a parte mais crítica de um controlador tipo P.I.D., para se obter a melhor resposta possível.

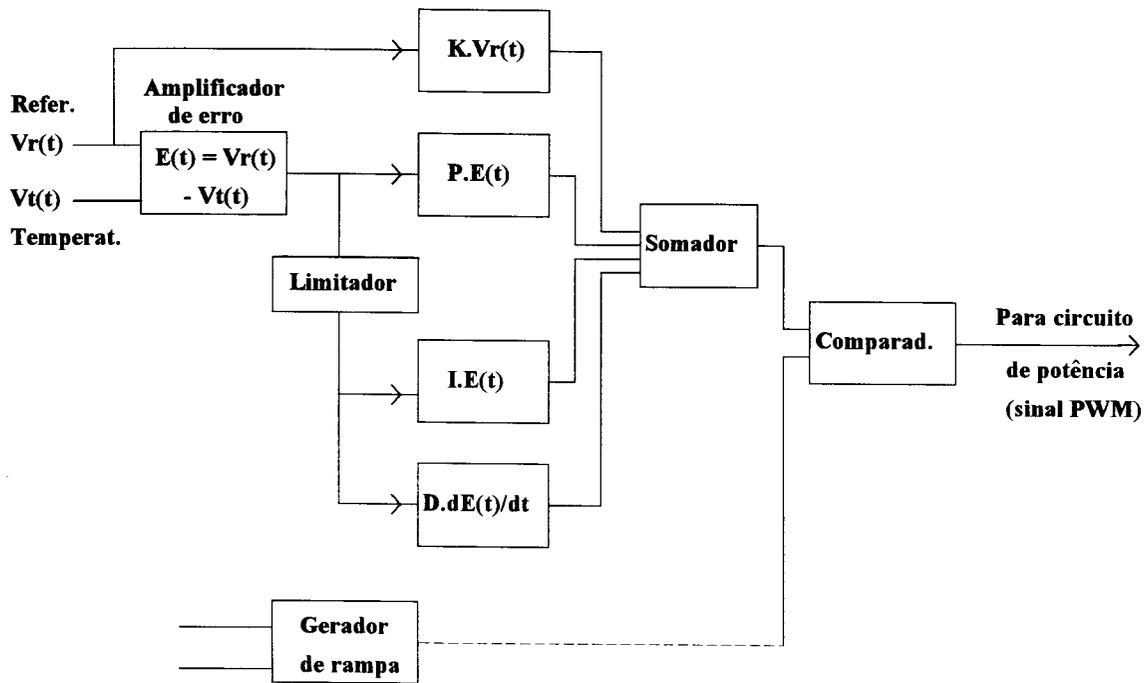


Fig 3.6 - Esquema do circuito de controle PID

O somador simplesmente soma os parâmetros PID, gerando o sinal de controle ou atuação para o aquecimento da célula. Os parâmetros do controlador podem ser ajustados através de resistores variáveis tipo "trimpot" colocados na placa de controle. Dentre estes parâmetros⁽⁹⁾, estão a banda proporcional, os tempos de 'rate' (diferencial) e 'reset' (integral), e a tensão máxima sobre a carga.

O bloco $K.V_r(t)$ é utilizado para fornecer potência proporcional à temperatura de referência ('set point'), permitindo a limitação e redução da faixa de trabalho do parâmetro integral. Ele fornece 70 a 80% da potência necessária para atingir a temperatura de referência. Num circuito PID convencional, o circuito

integrador seria o responsável por toda a potência, quando a referência e a temperatura real fossem iguais.

Na entrada do integrador e diferenciador (ver fig. 3.6), foi colocado um circuito limitador, de forma a limitar a constante de integração e sua velocidade de reação quando a diferença entre a referência ('set point') e a temperatura real for muito grande, reduzindo o efeito da sobretensão ('overshoot'). O parâmetro proporcional é suficiente para fornecer potência máxima à carga quando a diferença de temperatura for maior que 200 °C. Desta forma, pode-se utilizar uma constante de tempo menor no integrador, melhorando a velocidade de resposta e a estabilidade de temperatura, e ainda evitar uma sobretensão ('overshoot') excessiva.

Como já foi descrito, existem 3 tipos diferentes de células, cada uma com uma constante de tempo e temperatura de operação diferentes. Assim, o ajuste dos parâmetros foi feito separadamente em cada célula. Em um destes tipos, a constante é muito grande, exigindo um tempo de estabilização muito grande (≈ 20 minutos), enquanto que nos outros dois tipos, em aproximadamente 5 minutos. A temperatura de operação também influencia no desempenho do controlador: em temperaturas mais altas, o resfriamento das células é mais rápido, reduzindo a constante de tempo de controle.

O ajuste dos parâmetros foi feito experimentalmente na maioria das células, utilizando-se o seguinte procedimento :

- ajuste do parâmetro proporcional à referência ($K.V_r(t)$), de forma a atingir entre 70 e 80% da temperatura de referência
- ajuste do valor proporcional ($P.E(t)$) a um valor próximo de um máximo, sem que ocorra 'overshoot' ou oscilação de temperatura
- ajuste gradativo do parâmetro integral até alcançar um valor ótimo. O valor inicial do parâmetro integral (tempo de 'reset') é de ≈ 3 vezes o tempo proporcional.

O parâmetro diferencial praticamente não afeta as células de grande constante de tempo. Atua apenas auxiliarmente no controle das células de menor constante de tempo.

Circuito de potência e detetor de rede

O detetor de rede gera uma rampa sincronizada com a rede de alimentação (220V), a qual é comparada com o sinal de controle. O resultado desta comparação é um sinal modulado por largura de pulso (PWM), utilizado para controle de disparo dos TRIACs da placa de potência. Este sinal de disparo é isolado através de um opto-acoplador, como mostra a figura 3.7.

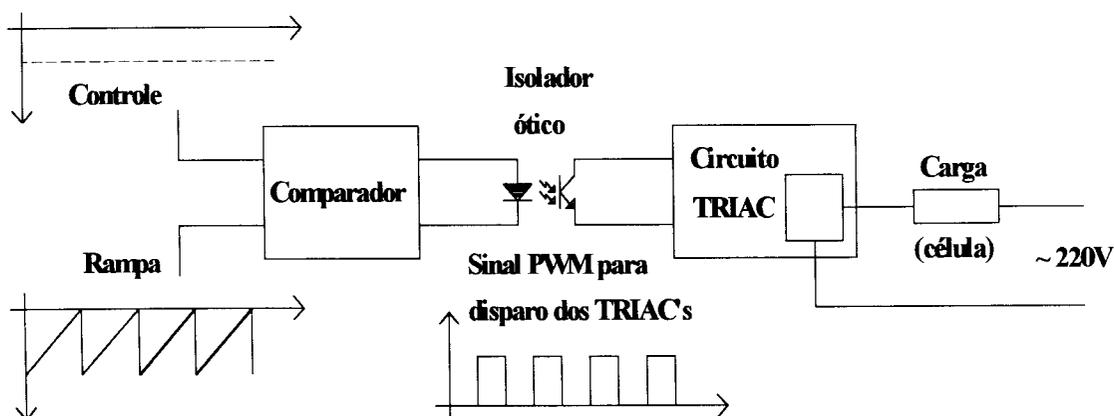


Fig. 3.7 - Isolação do sinal de disparo para o circuito de potência

O controle de potência sobre a carga⁽²³⁾ foi implementado com TRIACs, através do controle de fase em onda completa sobre um transformador. Os sinais gerados para realizar o controle de potência é mostrado na figura 3.8 adiante.

O transformador é necessário para abaixar a tensão sobre a célula que tem entre 0.5 e 2.0 Ω de resistência, podendo consumir uma corrente de até 20 ampéres. Tanto a entrada como a saída do transformador são protegidos por fusíveis. Os TRIACs utilizados foram superdimensionados, além de disporem de circuitos de proteção contra surtos de tensão e corrente.

A tensão máxima de saída pode ser limitada pelo ajuste da excursão máxima dos sinais de controle e da rampa na entrada do comparador, limitando a largura de pulso e conseqüentemente o ângulo de disparo dos TRIACs. Com esta

limitação, a temperatura máxima atingida pela célula situa-se um pouco acima de sua temperatura de operação, evitando um superaquecimento e danificação da célula.

Inicialmente, foi tentada a operação do circuito de potência baseado em pacotes de onda sobre a carga, numa operação tipo liga/desliga. Sendo a carga um transformador, induzia ruídos e prejudicava a operação do circuito. Além disso, as células tinham o mesmo efeito que lâmpadas sendo acesas e apagadas dentro da câmara, interferindo no sinal da tela de fósforo do RHEED e inviabilizando a sua captação através de detetores. Para eliminar estes problemas, foi projetado o circuito de potência baseado em controle de fase, no qual qualquer ruído gerado situa-se acima de 60 Hertz.

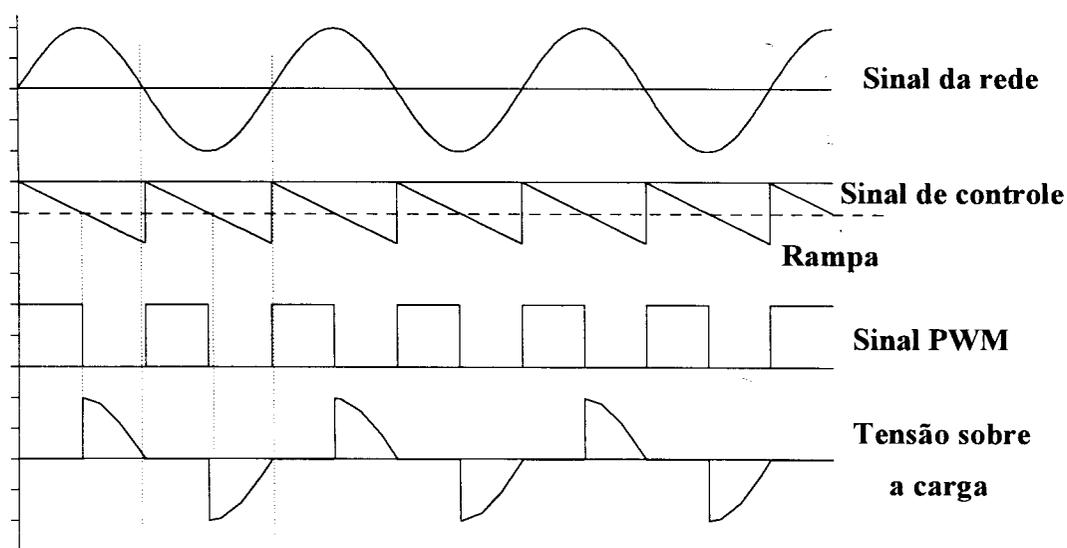


Fig. 3.8 - sinais do circuito de controle de fase

III.2.2 - Controlador de temperatura para o substrato

O controlador de temperatura para o substrato é basicamente o mesmo que o das células, com as seguintes alterações:

- o termopar utilizado para leitura da temperatura do substrato é do tipo K padrão⁽⁷⁾, ou seja Cromel Alumel (Níquel-Cromo X Níquel-Alumínio), o qual apresenta uma curva de calibração diferente do termopar das células que são do tipo *tungstênio rênio*, exigindo um ajuste diferente no circuito de linearização. O mesmo circuito é utilizado tanto para as células como para o substrato. No caso do termopar do substrato, a linearização foi feita até a temperatura de 1000 °C, para o qual bastaram apenas 3 segmentos, com um ponto de redução e outro de aumento de ganho.

- a corrente de saída do transformador de alimentação da carga foi retificada para evitar a distorção do feixe do RHEED causada pela alimentação alternada. Esta interferência é causada pela proximidade do feixe e dos cabos de alimentação do substrato.

- além destas duas alterações, foi instalado um medidor de corrente para a limitação da corrente de saída, devido à fragilidade do filamento de aquecimento.

Quanto aos parâmetros de controle, a constante térmica do aquecedor do substrato é muito menor que a das células, possibilitando um controle mais fácil e com resposta rápida (< 5 minutos). A temperatura de trabalho do substrato pode ir até 800 °C.

III.2.3 - Controlador de temperatura para o carrossel

O carrossel possui quatro suportes para substrato, sendo que um deles dispõe de uma resistência de aquecimento para degaseificação do substrato, semelhante à utilizada na câmara de crescimento.

Como o suporte utilizado para degaseificação não possui termopar para leitura de temperatura, foi necessário levantar uma curva de calibração de *corrente x temperatura* e realizar o controle de temperatura através da corrente de carga. Esta calibração pôde ser feita através da fixação temporária de um termopar sobre um bloco de molibdênio (porta-substrato) para leitura da temperatura, e uma fonte de corrente para o aquecimento.

Para o carrossel não é exigida muita precisão, permitindo uma variação de ± 20 °C em uma temperatura de trabalho em torno de 250 °C. Assim, bastou contruir uma fonte de corrente simples, até 5 ampéres devidamente calibrada (ver apêndice A.2).

III.2.4 - Desempenho obtido

Desde que foram construídas na versão aqui apresentada, os controladores de temperatura têm funcionado satisfatoriamente e não tem apresentado qualquer problema sério. Verificações periódicas tem acusado eventualmente, algum desajuste de 'off set' do integrador fazendo com que se estabilize alguns graus fora do 'set point', podendo ser compensada de imediato pelo ajuste da referência, até que seja feita a recalibração. No caso da calibração das curvas de linearização e leitura do termopar, verificações periódicas tem mostrado uma boa estabilidade, tendo eventualmente algum circuito com uma variação de até 2 °C.

Os controladores de temperatura tem funcionado permanentemente, para manter as células em temperatura 'stand by', mesmo quando não está sendo feito crescimento. A célula de As é mantida a ≈ 120 °C, e as de Ga, Si e In a uma temperatura entre 200 e 250 °C, para evitar oxidação ou incorporação de impurezas. Já o Al é mantido a uma temperatura de ≈ 700 °C, em seu estado líquido.

Quanto ao desempenho, a velocidade de resposta depende muito da constante térmica da célula, e da temperatura de trabalho. Para algumas células, o tempo de estabilização pode ser de até 20 minutos, enquanto que em outras, menos que 5 minutos. A estabilidade obtida foi de 1 °C em todas as células.

Os controladores de temperatura foram desenvolvidos e implementadas logo no início dos trabalhos, em caráter de urgência, para permitir o início da operação do sistema de MBE, mesmo que manualmente. Eles foram projetados para operar de forma autônoma, mas dispõe de entradas e saídas analógicas previstas para permitir um controle externo. Este controle externo foi posteriormente utilizado para a automação do sistema de MBE através de um microcomputador IBM-PC

III.3 - Módulo de Controle e Automação

A idéia inicial era desenvolver interfaces montadas em um módulo (bastidor), conectada através de um cabo a um dos conectores de expansão de um microcomputador IBM-PC^(11,13), o qual se encarregaria de controlar diretamente as interfaces, como mostra a fig. 3.9 adiante.

Normalmente, a utilização de extensões de barramento de microcomputadores é bastante problemática, devido aos problemas provocados pelos cabos de extensão. Estes cabos, além de serem fontes de ruídos, possuem capacitâncias parasitárias que provocam atrasos nos sinais do microcomputador que por eles circulam. Isso exige que a velocidade de operação ('clock') do microcomputador seja reduzida de modo que estes atrasos nos cabos não interfiram no acesso ou controle das interfaces conectadas ao bastidor. Para minimizar estes problemas, podem ser utilizados cabos compensados de baixa capacitância e 'buffers' tipo 'line drivers' especialmente projetados para estes tipos de conexão, com um atraso entre entrada e saída muito pequeno (< 5 nano segundos).

Para as interfaces projetadas, este problema foi minimizado pela decodificação de sinais na própria placa conectada ao micro, e os sinais que circulam nos cabos de extensão são controlados por comandos de leitura e escrita em periféricos, nos quais o microcomputador insere automaticamente um ciclo a mais de espera, executando o acesso às interfaces mais lentamente.

As interfaces inicialmente desenvolvidas para extensão do barramento do micro, podem ser utilizadas para o controle alternativo das placas diretamente através de um microcomputador IBM-PC. Como mostra a figura 3.9 a seguir, esta extensão era composta por uma placa conectada ao microcomputador (PC-Rack), o qual tinha a função de decodificar e gerar apenas os sinais necessários ao controle das interfaces, evitando a extensão de todos os sinais do conector de expansão do micro. Com isto, os sinais enviados ao bastidor foram reduzidos para 25, indicadas com '*' na figura 3.12, e foram reforçados e isolados através de 'buffers'. Do lado do bastidor, foi montada uma placa (Rack-PC) com 'buffers' para recepção dos sinais, e conectada ao barramento do bastidor.

Os esquemas elétricos detalhados dessas interfaces (PC-Rack e Rack-PC) estão no apêndice A8.

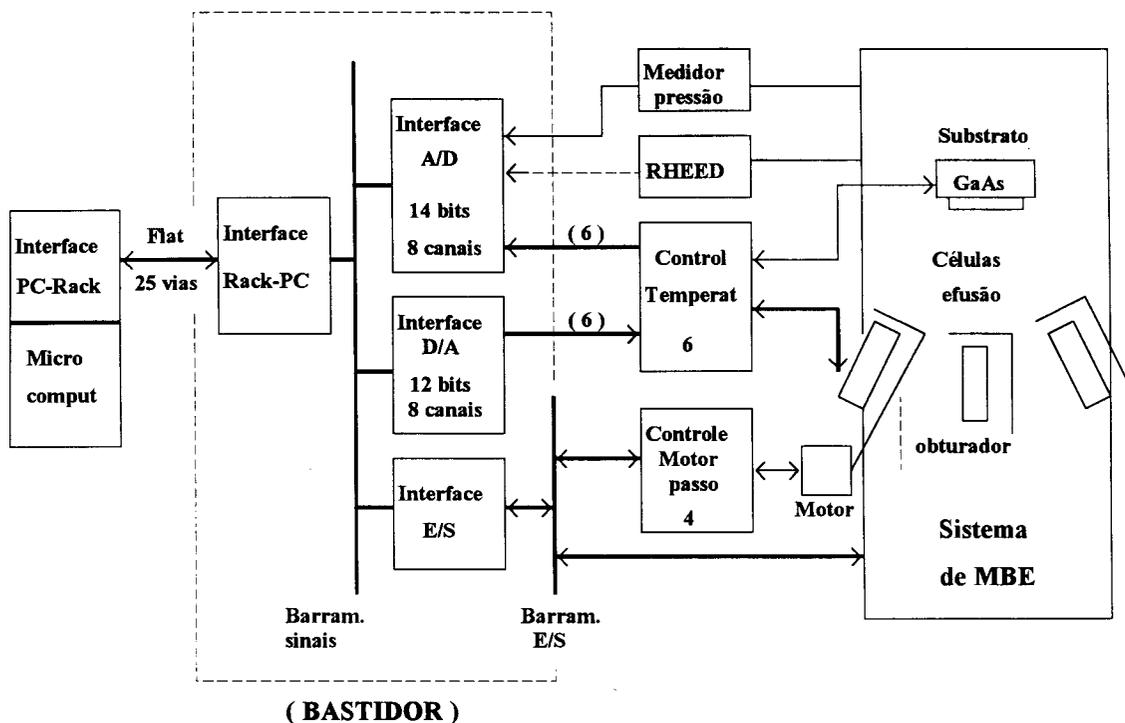


Fig. 3.9 - Esquema de controle direto por microcomputador através de interfaces de extensão de barramento

Estas interfaces foram implementadas com componentes comuns tipo TTL-LS, e a conexão feita através de um cabo tipo 'flat' comum de 25 vias com ≈ 1 metro, ligando um microcomputador modelo IBM-PC *xt* ao bastidor. Esta configuração foi utilizada para desenvolver e testar as interfaces A/D e D/A.

De qualquer forma, a técnica de extensão de barramentos de microcomputador fica limitada pelos seguintes itens:

- modelo ('hardware') do microcomputador
- velocidade de operação
- distância entre o microcomputador e o bastidor

Para eliminar estas limitações de "hardware", foi desenvolvida uma unidade central de processamento (UCP) conectada ao módulo para controlar estas mesmas interfaces, e comandado externamente através de uma interface serial RS232 (fig. 3.10). A UCP funciona como um intermediário entre um microcomputador e as

interfaces de controle e aquisição de dados do sistema de MBE. O módulo ficou composto pelas seguintes interfaces/placas:

- controlador programável, composto por uma unidade central de processamento baseado no micro processador Z-80 para controle das interfaces e comunicação com um microcomputador
- interface Analógico/Digital contendo um conversor A/D bipolar de 14 bits e 8 canais de entrada multiplexadas, para leitura da temperatura das células e do substrato fornecidos pelos controladores de temperatura, a pressão na câmara e outros sinais analógicos do sistema de MBE.
- interface Digital/Analógica de 12 bits e 8 canais de saída para controle de temperatura das células de efusão e substrato, através de atuação sobre os controladores de temperatura.
- interfaces de alarme e monitoração do sistema (incorporadas à UCP)
- interfaces de controle e monitoração para os acionadores dos obturadores ('shutters')

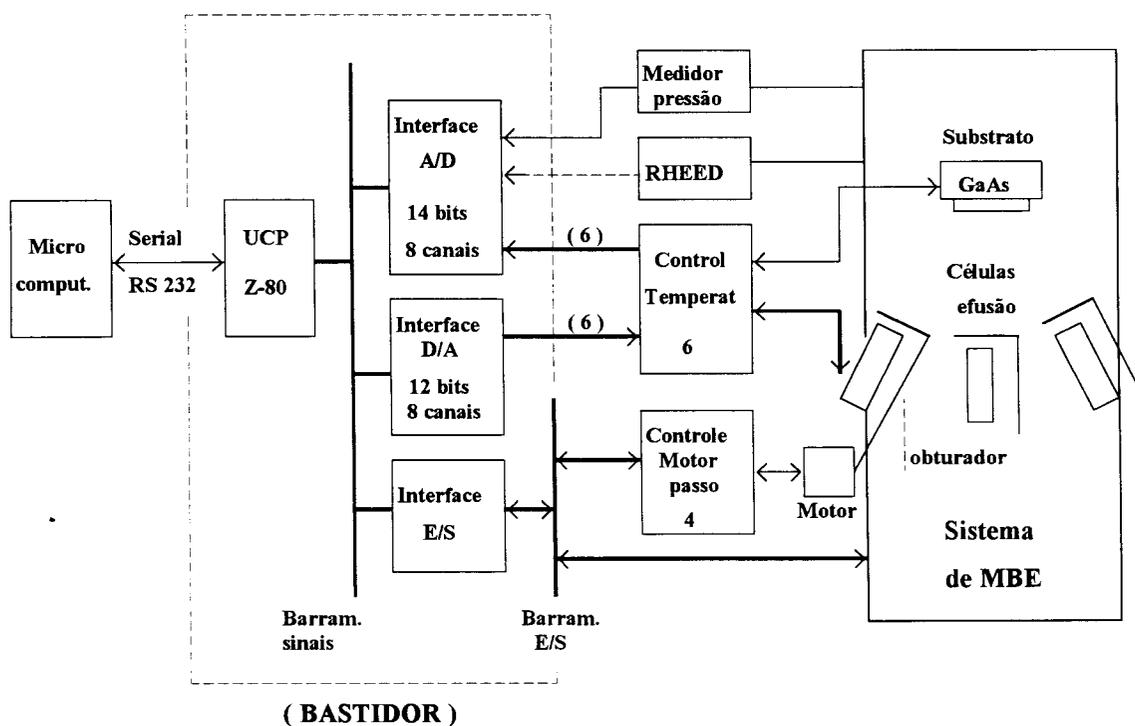


Fig. 3.10 - Esquema do bastidor com suas placas e conexões com um microcomputador e o sistema de MBE

O módulo foi implementado em um bastidor para placas padrão EUROCARD, para fixação em RACK padrão 19". As placas de circuito impresso para um bastidor simples tem medidas padronizadas de 100 x 160 mm e distância entre guias de encaixe das placas como um múltiplo de 5,08 mm. No caso, foi adotado o bastidor de tamanho duplo que comporta placas com dimensões de 233,4 x 160 mm.

A fim de proporcionar a conexão entre as placas do sistema, foi adotada a utilização de dois barramentos no bastidor, com a utilização de dois conectores de borda para cada placa, com um total de 31x2 pinos cada conector (fig. 3.11). Um dos barramentos é utilizado para os sinais de controle e operação das placas de expansão, contendo as linhas de dados, endereços e controle (fig. 3.12). Os sinais necessários para o controle das interfaces implementadas correspondem aos marcados com '*', enquanto que os restantes foram colocados visando futuras aplicações para expansão do sistema. O outro barramento foi colocado visando a conexão de sinais digitais provenientes do sistema de MBE (fig. 3.12).

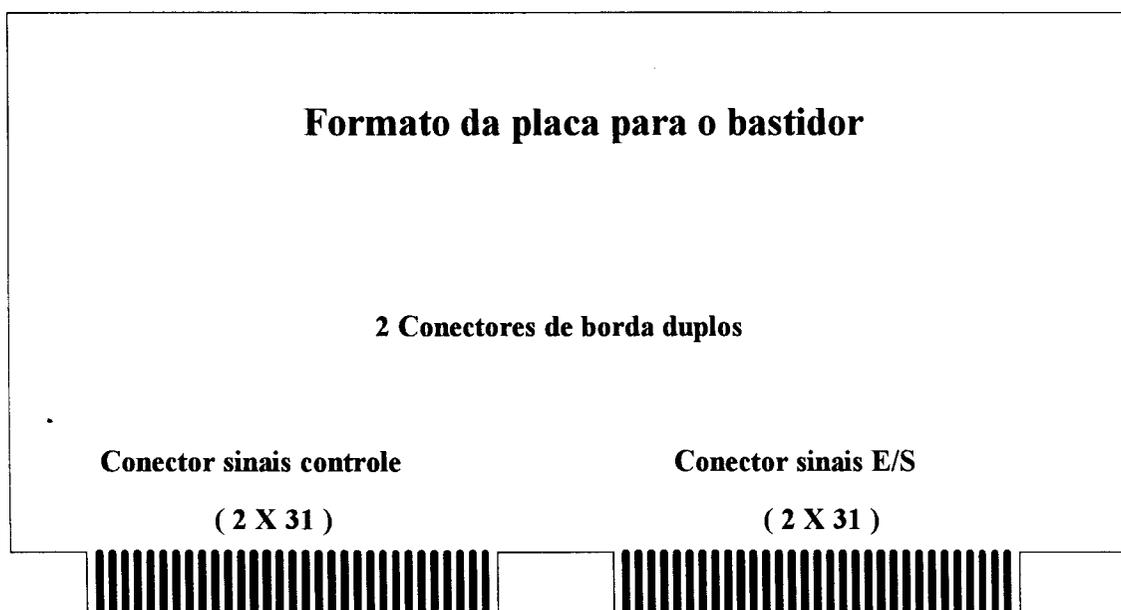


Fig 3.11 - Formato da placa para bastidor

Conector de controle				Conector sinais E/S		
CON-B	Pino	CON-A		CON-D	Pino	CON-C
*	GND	- 1 -	GND	*	E/S3	- 1 - E/S4
	MREQ	- 2 -	D0	*	E/S2	- 2 - E/S5
	IOREQ	- 3 -	D1	*	E/S1	- 3 - E/S6
	REFSH	- 4 -	D2	*	E/S0	- 4 - E/S7
	HALT	- 5 -	D3	*	E/S35	- 5 - E/S34
	WAIT	- 6 -	D4	*	E/S36	- 6 - E/S33
	BUSRQ	- 7 -	D5	*	E/S37	- 7 - E/S32
	BUSAK	- 8 -	D6	*	E/S38	- 8 - E/S43
*	+12V	- 9 -	D7	*	E/S39	- 9 - E/S42
	RAM2	- 10 -	RD	*	E/S23	- 10 - E/S41
	RAM3	- 11 -	WR	*	E/S22	- 11 - E/S40
	RAM4	- 12 -	A0	*	E/S21	- 12 - E/S44
	RAM5	- 13 -	A1	*	E/S20	- 13 - E/S45
	RAM6	- 14 -	A2	*	E/S16	- 14 - E/S46
	RAM7	- 15 -	A3	*	E/S16	- 15 - E/S47
*	-12V	- 16 -	A4		E/S18	- 16 - E/S15
*	EXP0	- 17 -	A5		E/S19	- 17 - E/S14
*	EXP1	- 18 -	A6		E/S8	- 18 - E/S13
*	EXP2	- 19 -	A7		E/S9	- 19 - E/S12
*	EXP3	- 20 -	A8		E/S10	- 20 - E/S11
*	EXP4	- 21 -	A9		E/S31	- 21 - E/S24
*	EXP5	- 22 -	A10		E/S30	- 22 - E/S25
*	EXP6	- 23 -	M1		E/S29	- 23 - E/S26
*	EXP7	- 24 -	NMI		E/S28	- 24 - E/S27
	EXP8	- 25 -	INT	*	AL15	- 25 - AL7
	EXP9	- 26 -	IEO		AL14	- 26 - AL6
	EXP10	- 27 -	CLK		AL13	- 27 - AL5
	TRG0	- 28 -	RESET	*	AL12	- 28 - AL4
	TO0	- 29 -	RxD		AL11	- 29 - AL3
	TRG3	- 30 -	TxD		AL10	- 30 - AL2
*	VCC	- 31 -	VCC	*	AL9	- 31 - AL8

Fig. 3.12 - Sinais dos conectores para placa no bastidor

III.3.1 - Controlador Programável (UCP Z-80)

O controlador programável foi projetado para executar basicamente duas tarefas:

- servir de intermediário entre um microcomputador e as interfaces de controle e automação do sistema de MBE, recebendo as instruções e comandos do microcomputador, atuando sobre o sistema, e enviando as respostas requisitadas
- monitoração permanente do sistema de MBE, para evitar falhas no sistema. A constante monitoração do sistema é necessária mesmo quando o sistema está parado, para evitar falhas na ausência humana, como por exemplo o superaquecimento das células e/ou desligamento das bombas de vácuo

O controlador (fig. 3.13) consiste em uma unidade central de processamento (UCP) baseado no microprocessador Z80-CPU^(12,26), com algumas interfaces e memórias. O diagrama em blocos a seguir mostra a estrutura básica do controlador (ver esquema detalhado no apêndice A.3):

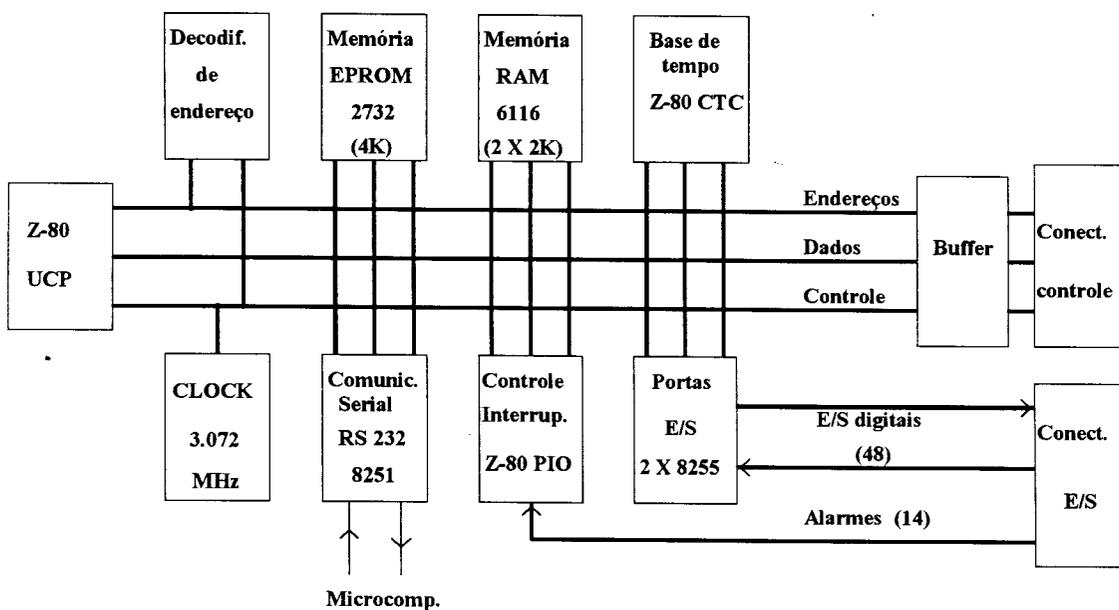


Fig. 3.13 - Diagrama da UCP Z-80

O Z-80 CPU^(12,26) é um microprocessador de 8 bits com capacidade para endereçar 64 Kbytes de memória e 256 portas de Entrada/Saída (E/S) separadamente, e também pode aceitar instruções escritas para um outro microprocessador de 8 bits, o Intel 8080. Possui ainda facilidades para implementação de circuitos de acesso direto à memória (DMA - "Direct Memory Access") e refrescamento de memória dinâmica. É dotado ainda de duas entradas de interrupção: mascarável (INT) e não mascarável (NMI). Alguns periféricos como o Z80-CTC e Z80-PIO⁽¹²⁾ foram especialmente projetadas para operarem com o Z-80, com facilidades para a utilização de interrupção em série ('Daisy Chain'), permitindo que vários periféricos utilizando interrupção sejam conectados em série na linha INT através dos sinais IEI e IEO, ordenados por prioridade.

A memória EPROM é composta por CI's 2732 de 4 Kbytes, sendo possível utilizar memórias de 8 e até 16 Kbytes, já que são praticamente compatíveis pino a pino, bastando apenas colocar um "jumper" num circuito auxiliar conectado ao pino 26. O início da memória EPROM está posicionado no endereço 0000H, endereço de inicialização ("boot") da UCP Z-80.

Na memória EPROM estão armazenados os programas básicos para inicialização das interfaces, operação do controlador e controle/monitoração do sistema de MBE, tais como:

- rotinas de inicialização, com programação de periféricos, 'timers' e interrupções
- rotinas de transferência de variáveis inicializadas da EPROM para a RAM
- rotinas de comunicação serial (CI 8251)
- rotinas de atendimento a interrupções (Z80-PIO e Z80-CTC)
- rotinas de teste de memória RAM e EPROM
- rotinas de monitoração do sistema
- rotinas de controle e acionamento

Os programas para a UCP Z-80 foram desenvolvidos em linguagem C e linguagem montadora ('assembler') Z80, e os programas executáveis gravados em EPROM. Maiores detalhes são descritos no capítulo IV, referente a programação ("software").

A memória RAM é utilizada para armazenar as variáveis dos programas básicos, os dados e parâmetros a serem utilizados no crescimento, bem como os sinais lidos nas interfaces analógicas e digitais. Foi implementada através dos CI's 6116 /4016 de 2 Kbytes, a partir do endereço 8000H. A quantidade inicial é de 4 Kbytes na placa da UCP, expansível até 16 Kbytes. A própria rotina de inicialização determina o tamanho da memória RAM, através das rotinas de teste de escrita e leitura na memória.

A comunicação serial foi implementada através de uma interface serial 8251⁽¹⁵⁾, executando a comunicação⁽¹⁹⁾ através de interrupções, tanto para transmissão como para recepção de dados. Os sinais 'TxEmpty' (transmissor vazio) e 'RxReady' (caracter recebido) foram conectados ao Z80-PIO, o qual foi programado como controlador de interrupções. A comunicação pode ou não utilizar as linhas de controle DSR/DTR e RTS/CTS^(19,22), os quais podem ser habilitados através de 'jumpers' na placa. Estes 'jumpers' são lidos durante a inicialização da UCP e utilizados na programação da interface de comunicação.

O circuito contador/temporizador (Z80-CTC) fornece o 'clock' para transmissão de 38400 baud, sendo este sinal dividido em 19200, 9600, 4800, 2400, 1200 e 600 baud através de um CI contador/divisor e conectados em uma chave 'dip switch'. Esta chave permite selecionar a velocidade de transmissão serial entre 600 e 19200 baud.

O circuito contador/temporizador ("counter/timer") é baseado no circuito integrado Z-80 CTC (ZILOG)⁽¹²⁾, composto por 4 contadores/temporizadores. Um deles ('timer' 1) como já citado, é utilizado para gerar a temporização para a interface serial. Outros dois ('timers' 2 e 3) foram programados para executar a função de cão de guarda ('watch dog timer') para proteção contra falhas de execução de programa, da seguinte forma:

- o 'timer' 3 gera uma interrupção a cada 10 *ms* para executar as rotinas de segurança como o teste de integridade de memória EPROM e RAM, atualização do relógio calendário, e zerar o 'timer' 2. Caso esta rotina não seja executada dentro de 15 *ms*, o 'timer' 2 termina a sua contagem e gera um pulso que resulta em uma requisição de barramento (BUSRQ), interrompendo as atividades da CPU e indicando um erro de programa.

O 'timer' restante ('timer' 0) é utilizado para controle dos pulsos para os motores de passo, utilizados no acionamento dos obturadores ('shutters').

O circuito controlador de interrupções é baseado num integrado Z-80 PIO⁽¹²⁾, o qual é utilizado para gerar as interrupções de transmissão e recepção de dados, e monitoração de outros alarmes importantes como falhas de controle ou acionamento e alarmes de monitoração do sistema. O Z80-PIO possui dois portos (A e B) de 8 bits programáveis independentemente, podendo ser programados para E/S simples, controle de dispositivos, ou controlador de interrupções. No modo controlador de interrupções, pode ser programado para gerar interrupção ativadas por nível alto ou baixo, se qualquer bit (modo OU) ou todos os bits (modo E) forem ativados, e pode-se ainda seleccionar os bits habilitados para gerar interrupção. Os bits 0 e 1 do porto estão sendo utilizados para a interrupção de transmissão e recepção de dados da comunicação serial.

A interrupção não mascarável (NMI) é a de maior prioridade, não sendo possível sua desabilitação através de programação. É utilizada em situações de condição prioritária, como por exemplo queda de energia.

A área de endereçamento de E/S foi dividida em duas (fig 3.14), batizadas de externa e interna. A área externa (00H a 7FH) é utilizada para o mapeamento de outras placas conectadas ao bastidor (fora da placa UCP), enquanto que a área interna (80H a FFH) é utilizada para o mapeamento de periféricos internos à placa UCP. Todas as linhas da placa UCP conectadas ao barramento do bastidor (área externa), foram reforçadas através de 'buffers', e são ativadas somente durante o acesso de dispositivos externos à placa UCP (outras placas ou periféricos conectados ao bastidor). Desta forma, é evitada a sobrecarga do microprocessador, além do reforço dos sinais do barramento e isolamento da UCP de ruídos externos.

Para o mapeamento da área de E/S (fig. 3.14 a seguir), foram gerados 16 sinais de habilitação ou seleção (8 internos e 8 externos), comportando 16 endereços cada. Destes sinais de seleção, os oito últimos são utilizados para habilitação dos periféricos internos à placa (área interna): 8251, Z80-PIO, Z80-CTC e duas 8255 (E/S), além dos 'buffers' DEV0 para os 'jumpers' de programação da serial e PTFLAG para saída de sinalização de alarmes. Os oito primeiros sinais de seleção foram conectados ao barramento e disponíveis para habilitação de outras placas conectadas ao módulo (área externa), como as interfaces A/D e D/A.

	Sinal	Endereço de E/S
Interfaces e Periféricos externos (disponíveis no barramento do bastidor)	EXP0	00H a 0FH
	EXP1	10H a 1FH
	EXP2	20H a 2FH
	EXP3	30H a 3FH
	EXP4	40H a 4FH
	EXP5	50H a 5FH
	EXP6	60H a 6FH
	EXP7	70H a 7FH
Periféricos internos (na placa UCP)	Z80-CTC	80H a 8FH
	8251	90H a 9FH
	Z80-PIO	A0H a AFH
	8255	B0H a BFH
	8255	C0H a CFH
	DEV0	D0H a DFH
	PTFLAG	E0H a EFH
	livre	F0H a FFH

Fig 3.14 - Mapeamento de dispositivos de E/S

Para o controle das interfaces externas conectadas ao bastidor, bastam poucos sinais do barramento de controle, os quais são: barramento de dados (D0 - D7), controle de leitura e escrita de E/S (RD e WR), sinais de seleção de placa (EXPn) e 4 bits de endereço (A0 - A3). Estes sinais correspondem aos indicados com '*' na figura 3.12. Os outros sinais, atualmente não utilizados, seriam para possíveis futuras expansões do módulo.

III.3.2 - Interface Analógico/Digital

A interface A/D foi projetada com a função de ler as temperaturas das células de efusão e substrato, e outros sinais analógicos como a pressão da câmara de crescimento, para o controle do sistema de MBE. As temperaturas das células são fornecidas pelos controladores de temperatura, e correspondem a tensões de 2.0mV/°C com um fundo de escala de ± 4.0 Volts ou 2000 °C.

Esta interface é composta basicamente por um conversor analógico/digital de 14 bits, e um multiplexador analógico para chaveamento de 8 canais de entrada. Destes 8 canais existentes, 6 são utilizados para leitura de temperatura, 1 para leitura da pressão e 1 está disponível para outras aplicações como por exemplo, a leitura das oscilações do sinal do RHEED.

A interface ocupa apenas dois endereços de Entrada/Saída, onde o primeiro endereço é utilizado para a leitura do 'byte' menos significativo e o segundo para os 6 bits mais significativos e os bits de 'overflow' e fim de conversão. A escrita no primeiro endereço envia a seleção do canal de entrada para o multiplexador, sendo este valor mantido através de um 'latch', e a escrita no segundo endereço tem a função de iniciar a conversão.

A figura 3.15 mostra o diagrama geral, e o apêndice A.4 fornece o esquema elétrico completo desta interface.

Para a aplicação a que se destina, o conversor deveria ter pelo menos 12 bits para se conseguir uma quantização mínima de 1 °C para a leitura das temperatura das células de efusão. Isto por que o conversor deve operar em modo bipolar, com 11 bits efetivos para o valor e um bit de sinal, resultando em ± 2048 níveis, suficientes para ler ± 2000 °C dos controladores de temperatura. Para obter uma resolução melhor de leitura, foi adotado um conversor de 14 bits, com o qual consegue-se uma quantização de 0.25 °C.

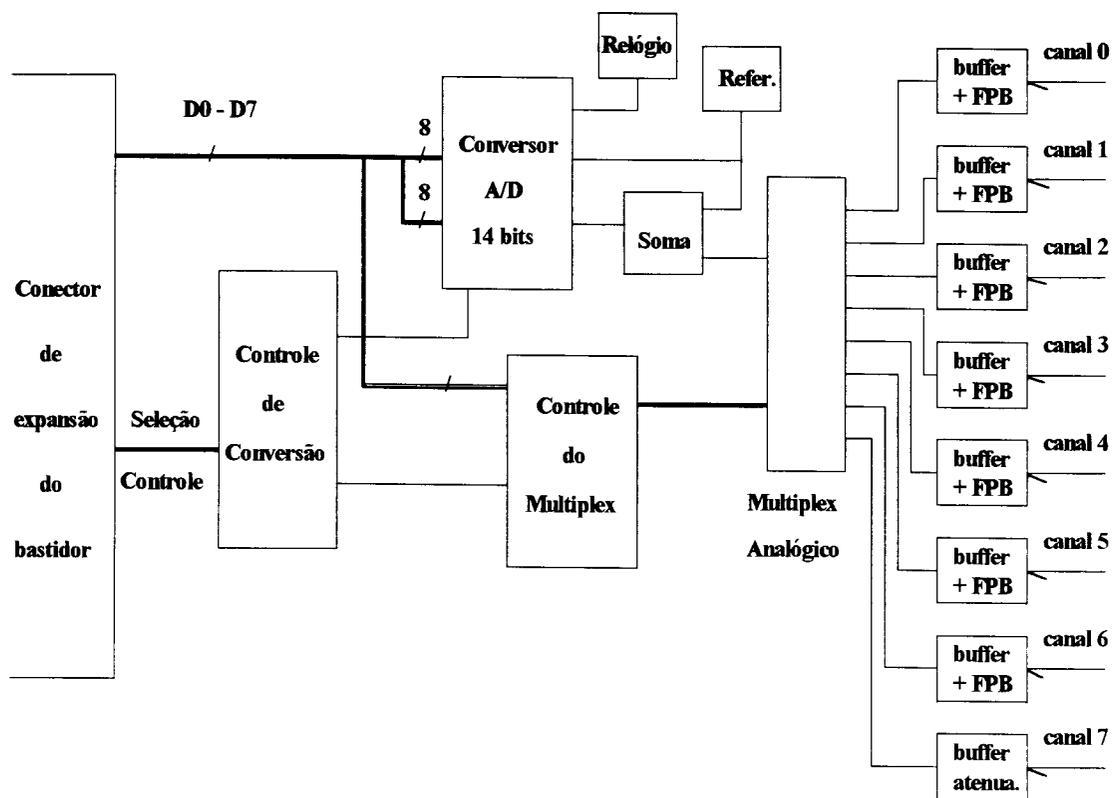


Fig 3.15 - Diagrama geral da interface A/D

Conversor A/D

O projeto foi baseado num conversor analógico/digital tipo CMOS de 14 bits da Intersil (ICL 7115)⁽¹⁷⁾, o qual tem as seguintes características:

- conversão tipo aproximação sucessiva
- tensão de alimentação de $\pm 5V$
- entrada unipolar negativa ou positiva com tensão de referência externa positiva ou negativa
- 'clock' externo de até 500 KHz
- tempo de conversão de $40\mu s$ (para 'clock' de 500 KHz)
- linha de dados e controle compatíveis para controle direto por microcomputador de 8 ou 16 bits
- décimo quinto bit de 'overflow'

Um conversor tipo unipolar pode ser operado em modo bipolar através da inserção de um circuito auxiliar, que consiste na soma da tensão de referência com a entrada analógica e com a metade do ganho, elevando o 'zero' para o meio da escala do conversor, como mostra a figura 3.16 a seguir.

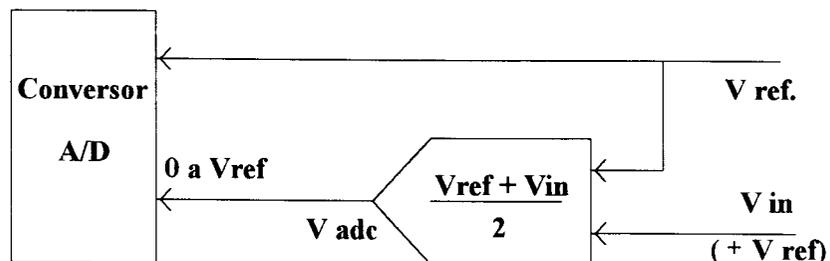


Fig. 3.16 - Conversão de entrada bipolar para unipolar

Pela equação $V_o = (V_{ref} + V_{in})/2$, se a entrada for negativa máxima igual a $-V_{ref}$, teremos zero na saída. Se V_{in} for zero, teremos $V_{ref}/2$ que corresponde ao meio da escala e para V_{in} igual a $+V_{ref}$, teremos o fundo de escala do conversor ($+V_{ref}$). Para se obter o valor digital bipolar correto, deve se subtrair a metade do fundo de escala do valor lido. A figura 3.17 mostra o resultado deste circuito divisor.

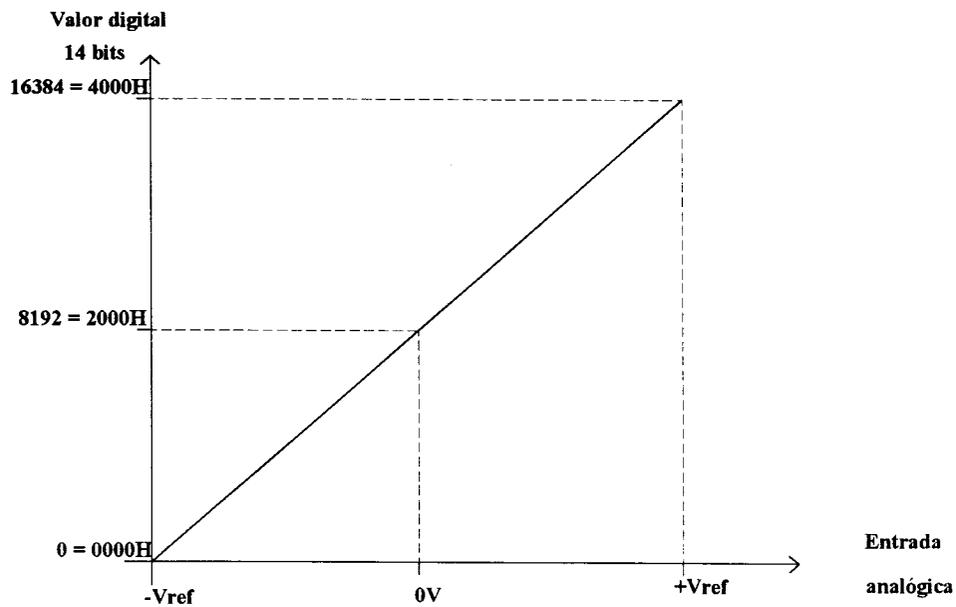


Fig. 3.17 - Relação Entrada analógica bipolar X Valor digital

Desta forma, para um conversor de 14 bits, são utilizados efetivamente 13 bits, ficando o último como bit de sinal. Para o projeto aqui apresentado, os 13 bits fornecem ± 8192 níveis, os quais para um referência de 4.096V, resulta em uma quantização de 0.5mV. Como os controladores fornecem um sinal de 2mV/°C, temos uma resolução de leitura de 0.25°C redondos. O valor da referência de 4.096V foi escolhido justamente para arredondar a leitura de temperatura. Para o microcomputador o valor lido será entre 0 e 16384, do qual deverá ser subtraído 8192 para se obter o valor bipolar de ± 8192 , o qual dividido por 4, resulta no valor da temperatura em °C.

O conversor dispõe de barramento de dados com capacidade 'three-state', um pino de habilitação e uma linha de controle de leitura que habilita a leitura de dados. Uma linha de endereçamento permite habilitar separadamente a leitura dos 8 bits menos significativos e os 6 bits mais significativos, simplificando o interfaceamento tanto com micros de 8 bits como de 16 bits. Um pulso no pino de escrita com o conversor habilitado inicia a conversão.

Para fornecer a tensão de referência ao conversor, foi utilizado um regulador de precisão (LM 723), que tem um diodo 'zener' de referência

compensada em temperatura. Mas, para melhorar a precisão, deve ser considerada a utilização de uma referência mais estável e precisa.

Multiplexação

Para multiplexação dos sinais de entrada, foi usado um multiplexador analógico CMOS de oito canais (CD 4051). Este integrado aceita um valor máximo de 18 volts de alimentação/sinal, o que limita a amplitude dos sinais analógicos de entrada permitidos. Mas é suficiente para a aplicação a que foi destinada: $\pm 4,0V$ dos controladores de temperatura.

Na entrada de cada canal foi colocado um isolador com filtro passa baixa, implementado através de amplificador operacional. O objetivo desta isolação é manter uma alta impedância de entrada nos canais, pois a impedância do multiplexador é de apenas 100 K Ohms quando desligado, podendo interferir nos sinais a ela conectados. No último canal, o isolador foi configurado no modo atenuador inversor para possibilitar a leitura de pressão (ver mais adiante).

A saída do multiplexador está ligada a um buffer isolador e depois a um circuito de amostragem e retenção 'sample/hold' (LF 398)⁽¹⁰⁾, sincronizado com o pulso de início e o sinal de 'status' de conversão, permanecendo no modo 'hold' apenas durante a conversão.

O programa de controle do conversor foi escrito em linguagem montadora ('assembler' Z-80), realizando uma média de 8 leituras por programação. A escolha de 8 leituras foi devido à facilidade de divisão, para o qual basta realizar um deslocamento de 3 bits para a direita no acúmulo das medidas, resultando na média. A interface foi testada, verificando-se os seguintes resultados:

- o multiplexador foi testado para verificar a existência de problemas de interferência entre canais ('cross talk') durante sua operação. Foi injetada uma tensão arbitrária em um dos canais, e tensões variáveis nas outras. Não foi detectada qualquer influência significativa.

- Ruído - o conversor foi testado com e sem os filtros na entrada dos canais. Sem o filtro, mesmo com a utilização de média de 8 leituras, o ruído é muito alto reduzindo a precisão da leitura para menos de 10 bits. Com o filtro, o ruído foi reduzido (± 1 LSB), que para um conversor de 14 bits (± 8192), representa uma

precisão de ± 0.25 °C. Este ruído não é notado no mostrador do controlador devido ao tipo de conversor utilizado e a existência de um filtro no circuito do mostrador.

- Erros de 'off-set' e ganho podem ser corrigidos através de programação.

Existem vários tipos de conversores A/D⁽¹⁰⁾, pelos seu métodos de conversão. Os dois tipos mais conhecidos e utilizados são os de aproximação sucessiva e os de integração. Os conversores tipo aproximação sucessiva são mais rápidos, geralmente com tempo de conversão < 100 μ s, mas sensíveis a ruídos. Já os conversores tipo integrador são menos sujeitos a ruídos, mas sua velocidade de conversão é baixa, sendo medida em dezenas ou centenas de milisegundos. Como exemplo deste último, pode ser citado o circuito mostrador do controlador de temperatura, no qual não se nota o ruído apresentado por esta interface, e sua taxa de conversão está em torno de 300 milisegundos.

Medida de vácuo

O medidor de vácuo dispõe de uma saída analógica de 0V a 10V que correspondem respectivamente a pressões de 10^{-11} mbar a 10^{-3} mbar em escala logarítmica, num total de 8 décadas, indicadas em um mostrador analógico. Como a escala do conversor é de 0V a ± 4.096 V o isolador do último canal foi montado no modo atenuador inversor, reduzindo o sinal de 0V a 10V para 0V a - 4V. Para o conversor, isto corresponde a uma leitura de 0 a - 8000, o qual dividido por 1000 resulta em um valor entre 0 e - 8. Para uma escala logarítmica de 8 décadas (1×10^{-11} a 1×10^{-3}), cada unidade corresponde a uma década, tornando a conversão simples.

Suponha um valor arbitrário de X.YYY entre 0 e 8. Tomando-se a parte inteira do valor (X) e subtraindo de 11, tem-se o expoente da leitura de vácuo (11 - X). Da parte fracionária (0.YYY) elevada à potência de 10, é obtido o valor ($10^{0.YYY}$).

Por exemplo, suponha um valor de 6,7475V no conector do medidor, o que resultaria em um valor de -2,699V na entrada do A/D, e um valor digital de -5.398. Aplicando a conversão exposta anteriormente, o expoente seria $11 - 5 = 7$ e o valor seria $10^{0.398} = 2,5$, resultando no valor da medida de vácuo de $2,5 \times 10^{-7}$ mbar.

III.3.3 - Interface Digital/Analógica

Os controladores de temperatura tem os seus "pontos de ajuste" ou 'set points' acertados através da aplicação de uma tensão de referência no circuito de controle. Isto pode ser feito manualmente através da variação de uma tensão de referência interna, ou pela aplicação de uma tensão de referência externamente através de um conector de entrada disponível. Esta tensão aplicada externamente poderia ser utilizada também para controlar diretamente a potência fornecida aos aquecedores das células ou substrato, possibilitando a realização do controle de temperatura através de um programa de controle.

A interface digital/analógica foi projetada para fornecer este sinal de referência externo, o qual deve ter uma quantização mínima de 2.0 mV que corresponde a 1 °C nos controladores de temperatura (2mV/°C), e um fundo de escala de no mínimo 4.0 V (2000 °C).

Para atender as estas exigências, foi utilizado um conversor D/A de 12 bits (Analog Devices DAC 80D CBI-V)⁽¹⁶⁾ o qual fornece 4096 níveis analógicos, que para uma referência de fundo de escala de 4.096V, resulta em uma quantização de 1mV. Para os controladores de temperatura (2mV/°C), isto representa uma quantização nominal de 0.5 °C e um fundo de escala de 2048 °C. O valor não inteiro do fundo de escala (4.096V) foi baseado na mesma idéia que o do conversor A/D, ou seja, arredondamento dos valores digitais. Basta tomar o valor de temperatura desejado, multiplicar por 2 e enviar ao conversor. Este conversor tem as seguintes características:

- tensão de alimentação de +5V e $\pm 12V$
- referência interna de 6.3V
- operação em modo unipolar ou bipolar
- uma velocidade de conversão de 3 μs
- entrada digital em modo complementar
- operação em modo unipolar de 5V ou 10V, e bipolar de $\pm 5V$ ou $\pm 10V$

Tendo-se um total de 8 controladores, tornaria-se custoso a utilização de um conversor para cada controlador. Para resolver este problema, optou-se pela utilização de um único conversor, multiplexando-se sua saída para oito canais analógicos independentes, implementados através de circuitos de amostragem e

retenção ou 'sample/hold'. Não há problemas de sobrecarga de corrente por que é habilitado um 'sample/hold' de cada vez, e a impedância de entrada é muito alta ($>Giga \Omega$). O diagrama em blocos da figura 3.18 mostra como foi implementada esta interface.

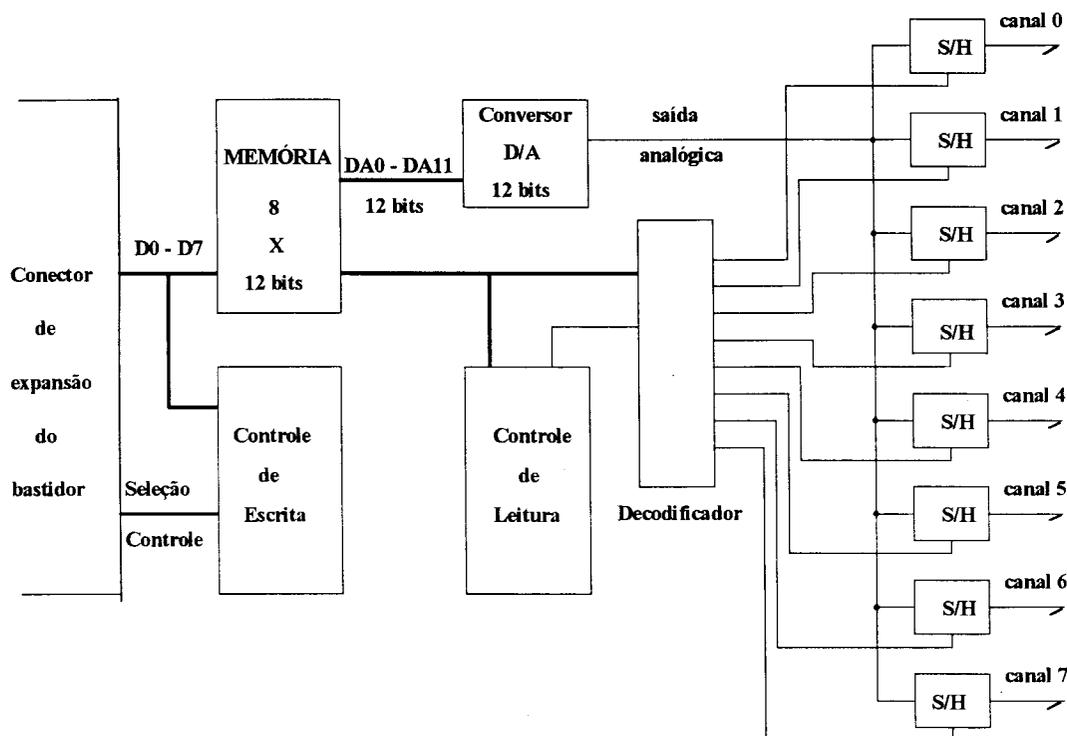


Fig 3.18 - Diagrama geral da interface D/A

Circuito de entrada

Na entrada do conversor foi implementada uma memória de 8 posições de 12 bits, no qual são armazenados os valores digitais de cada um dos 8 canais de saída.

Esta memória é formada por um conjunto de 6 circuitos integrados DM 74LS670 (fig. 3.19), sendo cada um deles uma memória estática de 4 x 4. Este CI

foi escolhido baseado no fato de possuir barramento de dados e controle de escrita totalmente independentes dos de leitura (fig. 3.19), o que simplifica bastante o circuito envolvido.

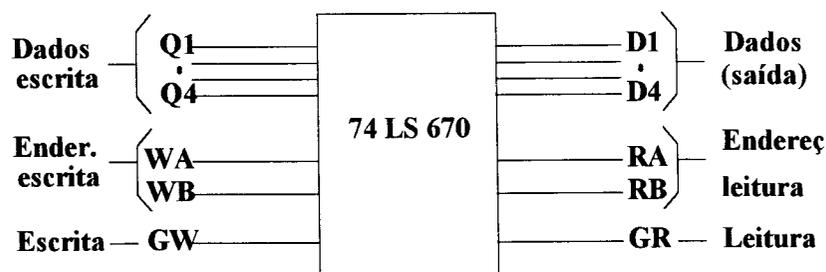


Fig. 3.19 - CI utilizado para implementar a memória de entrada

Sendo uma memória de 8 endereços de 12 bits, uma escrita direta na memória exigiria a utilização de 16 endereços de E/S do microprocessador, já que o seu barramento de dados dispõe de apenas 8 bits. Para o caso de controle direto por um microcomputador tipo IBM PC-XT, não existem muitas áreas de expansão de E/S disponíveis, sendo conveniente economizar endereços. Para economizar esses endereços de E/S, foi projetado um circuito para acesso a essa memória, que permite a escrita em qualquer uma das oito posições da memória utilizando-se apenas dois endereços de E/S. Comparado com a utilização de 16 endereços com escrita direta, utiliza apenas um CI a mais, e tem a vantagem de que todos os 12 bits são gravados simultaneamente na memória. Este circuito é baseado na seguinte idéia:

No primeiro acesso à memória (primeiro endereço) são enviados o endereço de escrita (3 bits) e os 4 bits mais significativos do dado, os quais são mantidos através de um 'latch'. No segundo acesso (segundo endereço), são enviados os 8 bits restantes (menos significativos), os quais serão gravados juntamente com os 4 bits mais significativos, no endereço mantido no 'latch' durante o primeiro acesso. Ou seja, os 12 bits são gravados simultaneamente. Uma vez que o valor digital esteja gravado, o circuito de saída que é independente, cuidará para que estes valores digitais sejam convertidos em analógicos, e mantidos (refrescados) nos canais de saída correspondentes.

Circuito de saída

O conversor foi selecionado para operar em modo unipolar de 5V de fundo de escala, para o qual, a referência interna de 6.3V deveria ser conectada diretamente na entrada de referência do conversor. Para reduzir este valor de fundo de escala de 5V para 4.096V, bastou reduzir o valor da referência de entrada de 6.3V para 5.161V.

Na saída do conversor, estão conectados 8 'sample/hold' para manter a tensão na saída dos canais, e que são constantemente refrescados. O 'sample/hold' é baseado no circuito integrado de 8 pinos LF 398⁽¹⁰⁾, o qual exige apenas um capacitor externo para operação, e opcionalmente um 'trimpot' para correção de off set.

O controle de saída é formado basicamente por um contador de 4 bits, que faz uma constante varredura (multiplexação) da memória da entrada (8 x 12) sobre o conversor, e habilita os correspondentes 'sample/hold' na saída. Sua função é fazer um constante refrescamento dos 'sample/hold' e atualização do valor digital. A idéia de funcionamento da multiplexação pode ser vista na figura 3.20.

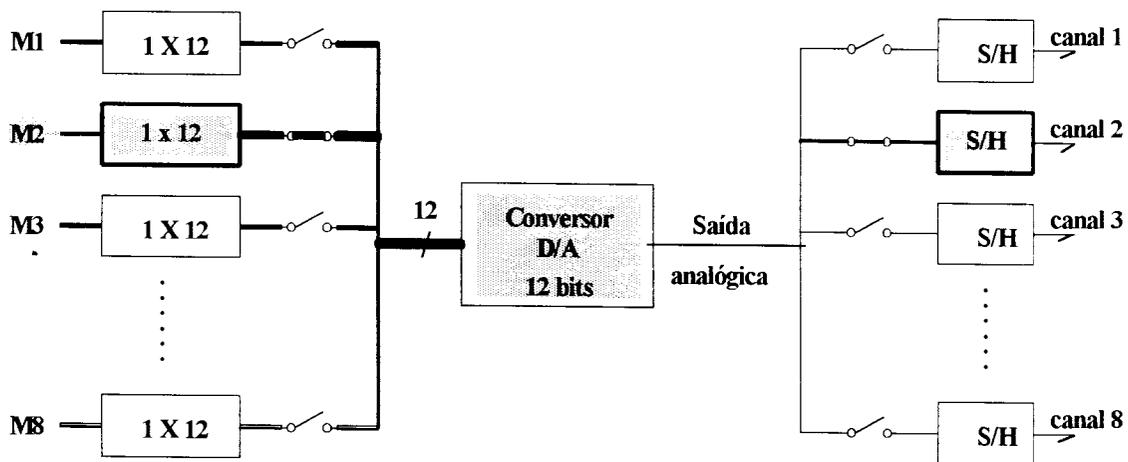


Fig. 3.20 - Idéia de funcionamento da interface D/A

O circuito de varredura ou multiplexação da saída foi implementado com os devidos atrasos, de forma a assegurar o correto funcionamento tanto do conversor como do 'sample/hold', como mostra a figura 3.21 a seguir:

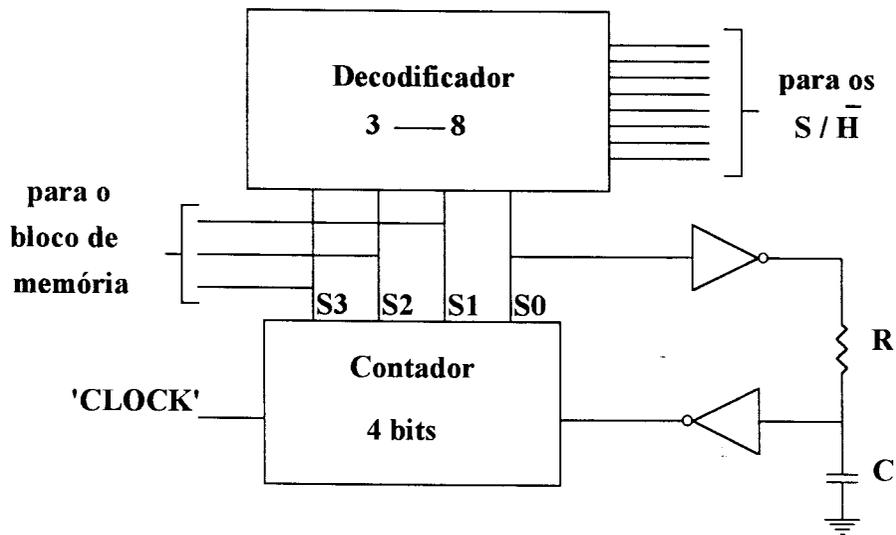


Fig. 3.21 - Circuito de controle de saída da interface D/A

- a saída S0 é utilizada para temporização da amostragem no 'sample/hold'. Ela fornece o sinal de clock (S1 in) para o contador de 3 bits formado pelas saídas S1, S2 e S3, com um atraso para assegurar a conversão de um novo canal antes da habilitação do 'sample/hold'.

- as saídas S1, S2 e S3 formam um contador de 3 bits, usadas para varredura das 8 posições de memória na entrada do conversor e seleção dos 'sample/hold' nos canais de saída através do decodificador.

A figura 3.22 a seguir mostra o diagrama de tempos resultantes deste circuito de controle de saída.

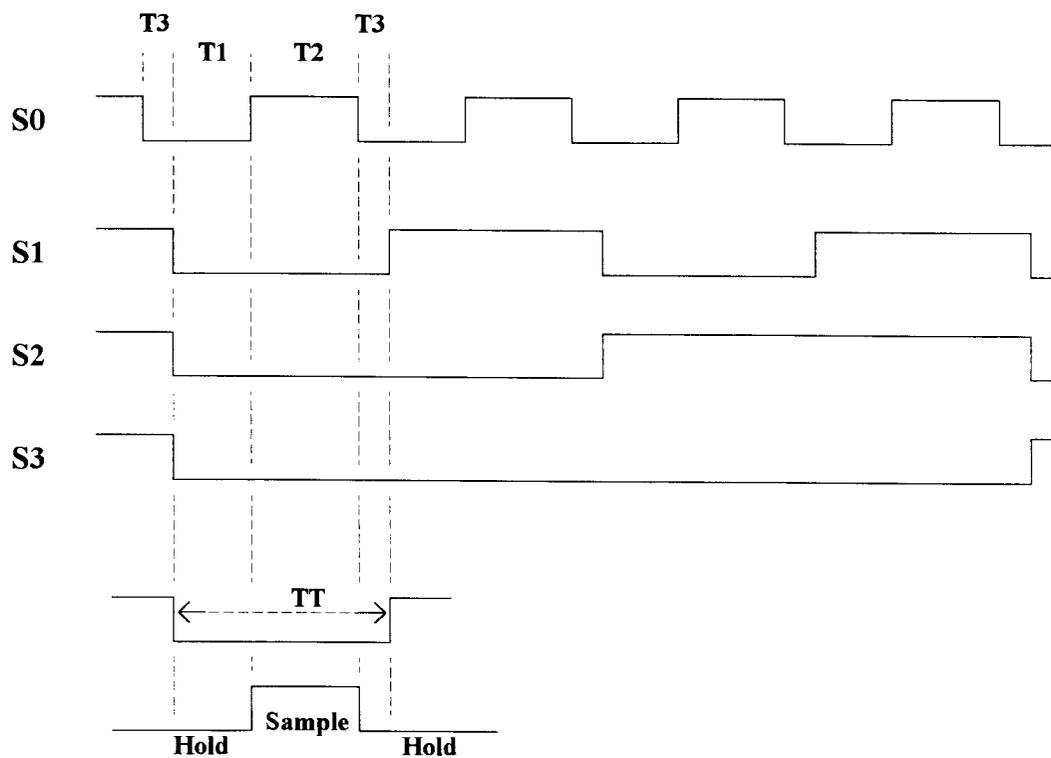


Fig. 3.22 - Diagrama de tempos do circuito de saída da interface D/A

No diagrama de tempos da figura 3.22, temos:

T1 - tempo para que o conversor converta o novo valor de entrada, antes de iniciar a sua amostragem (modo 'sample'). Para o conversor utilizado, T1 deve ser maior que 3 μ seg. É possível, mas não aconselhável, que o tempo de conversão se estenda até uma parte de T2, o que pode gerar ruído na saída do canal se não for implementado algum filtro.

T2 - tempo dado ao 'sample/hold' para amostragem do sinal. O tempo de resposta do S/H depende do valor do capacitor utilizado, o qual pode ser relativamente grande para reduzir o ruído na saída. Afinal, não é necessário colocar o valor analógico correto logo no primeiro acesso, podendo demorar alguns ciclos de refrescamento, o que suavizaria o sinal analógico e não prejudicaria a operação do controlador de temperatura.

T3 - atraso gerado pelo circuito RC, correspondendo ao tempo para mudar o canal, depois da entrada em modo retenção ('hold'). Este pequeno atraso, foi colocado para evitar erros que possam provir de chaveamento simultâneo do conversor e do 'sample/hold', ou seja, que a saída do D/A seja modificada antes que o 'sample/hold' entre no modo 'hold'. Este atraso deve ser calculado de acordo com a frequência de 'clock' utilizada.

TT - Tempo total de acesso de cada canal, ou tempo em que o canal está habilitado, correspondente à soma dos tempos acima.

A frequência de 'clock' deve ter um valor mínimo, suficiente para refrescar o 'sample/hold' antes que ocorra uma queda muito acentuada na sua tensão de saída, e um valor máximo que permita a conversão ($T1 > 3\mu s$) e a amostragem correta do sinal ($T2$). Como são 8 canais, o tempo entre refrescamentos de cada canal é de $8 \times TT$. Baseado nestes requisitos, foi encontrada uma faixa de trabalho aceitável para o 'clock', entre 20 KHz, resultando em $TT = 100\mu s$ e $0.8ms$ entre refrescamentos, e 200 KHz, resultando em um TT de $10\mu s$ e $80\mu s$ entre refrescamentos. Foi utilizada uma frequência de 50 KHz, resultando em TT de $40\mu s$ e tempo de refrescamento de $0.32 ms$.

A interface apresentou os seguintes resultados finais: o ruído foi medido com o auxílio do conversor A/D, sem o filtro, ficando em $\pm 0.5^\circ C$, que para o conversor D/A representa um ruído de ± 1 LSB. Aplicando este sinal ao controlador, não foi verificado qualquer ruído no mostrador. Se necessário, estes ruídos podem ser reduzidos aumentando o capacitor de retenção ('hold'), e/ou instalando filtros isoladores nos canais de saída.

III.3.4 - Interface de Sinais Digitais

Os sinais digitais são monitorados e controlados pelo periférico Z80-PIO e duas interfaces programáveis Intel 8255⁽¹⁵⁾, localizadas junto à placa UCP. Estes periféricos estão conectados ao segundo barramento do bastidor, onde circulam os sinais digitais de E/S (fig. 3.12).

O Z80-PIO tem dois portos de 8 bits (16 entradas digitais) programados para gerarem interrupção se qualquer uma das entradas for ativada (modo OU). Duas destas entradas são utilizadas para a comunicação serial, e as outras 14 disponíveis para leitura de sinais prioritários do sistema.

Os periféricos 8255 dispõe de 3 portos de 8 bits cada, e estão disponíveis para leitura ou controle de sinais digitais simples. O porto C de um deles é utilizado para enviar os sinais de controle para acionamento dos obturadores. Os 4 bits menos significativos são utilizados para o controle de direção e os 4 bits mais significativos para habilitação da atuação. A utilização do porto C se deve à sua facilidade de controle de cada bit individualmente. O porto A é utilizado para a leitura dos sensores de fim de curso dos obturadores, sendo 4 para aberto e 4 para fechado, e o porto B para a leitura dos sensores das bombas iônicas.

Sensores de sinais digitais

Para o sensoreamento dos obturadores e das bombas foram utilizados sensores tipo acopladores óticos, como mostra a figura 3.23 a seguir. O esquema elétrico do circuito sensor está exposto no apêndice A6.

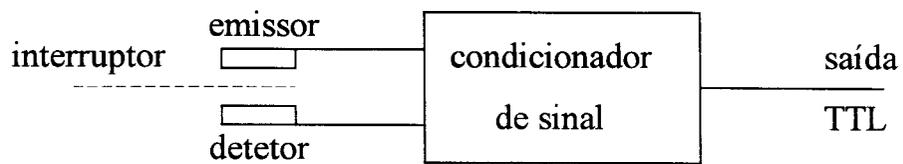


Fig. 3.23 - Sensor óptico para sinais digitais

No caso da bomba iônica, o sensor foi instalado para verificar a posição do botão de acionamento do disjuntor de proteção da bomba. Assim, o sensor é ativado no caso de desligar a bomba.

Para os obturadores, foram instalados dois sensores de fim de curso para verificar o seu correto acionamento, realizado através de motores de passo.

III.4 - Registro das oscilações do sinal do RHEED

O RHEED⁽⁴⁾, além de fornecer informações sobre a estrutura do filme em crescimento como morfologia e reconstrução, pode ainda ser utilizado para verificar a taxa de crescimento. Essa taxa de crescimento é indicada por pequenas variações na intensidade do sinal na tela, de 0.5 Hz a alguns Hz que correspondem à velocidade de crescimento em monocamadas atômicas.

Além da visualização da reconstrução e controle da taxa de crescimento, o RHEED é utilizado também para controlar a desoxidação do substrato antes do crescimento, o qual transparece na forma de círculos na tela. Quando é atingida a temperatura de desoxidação, estes círculos desaparecem dando lugar ao padrão de linhas, indicando estar pronto para o crescimento. Paralelamente, esta temperatura de desoxidação ($\approx 580\text{ }^{\circ}\text{C}$) pode ser utilizada para verificar a calibração da leitura do termopar do substrato.

Dependendo da qualidade do crescimento e do alinhamento do substrato, a intensidade das oscilações pode ser muito pequena, correspondendo a uma variação de 1% ou menos sobre a intensidade de fundo do sinal na tela. A captação de um sinal de tão baixa intensidade fica sujeita a ruídos de fundo e externos que devem ser cuidadosamente minimizados, evitando-se a entrada de luminosidade e reflexões externas, e reduzindo-se ao máximo a iluminação interna com o desligamento de qualquer equipamento que possa provocar interferência como lâmpadas e medidores.

Os sistemas comerciais para o RHEED são normalmente baseados em câmeras tipo CCD (matriz de sensores) para digitalizar a imagem da tela, juntamente com sofisticados programas de tratamento de imagem e interfaces para microcomputador. Se o objetivo básico for apenas a captação das oscilações para a calibração do crescimento, não é necessário todo este equipamento. A qualidade bem como o padrão do sinal podem ser inspecionados visualmente, e a captação das oscilações pode ser conseguida com um circuito relativamente simples.

O circuito projetado para a captação do sinal da tela foi baseado em um fotodetector de Silício de alta sensibilidade, condicionado por filtros e diferenciadores. A figura 3.24 a seguir mostra a montagem utilizada:

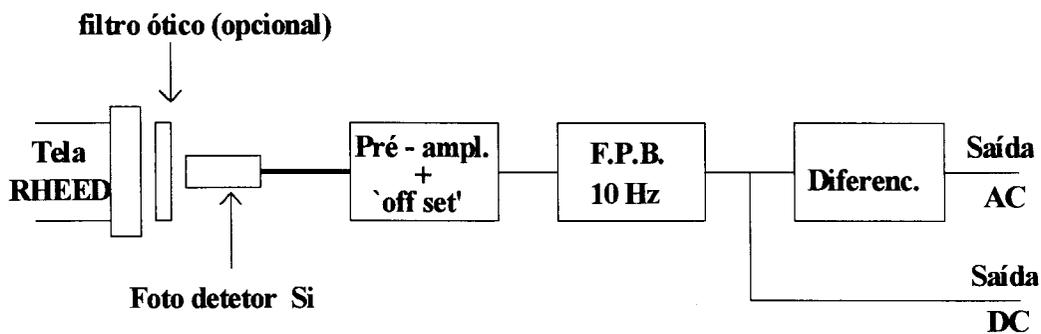


Fig. 3.24 - Diagrama da montagem para captação do sinal do RHEED

O pré amplificador é um amplificador de corrente para o foto detetor (amplificador operacional tipo FET), com um ganho ajustável entre 100 e 500 e também com um ajuste de 'Off set' para compensar o nível DC do sinal (intensidade de fundo da tela). O filtro passa baixa (F P B) de sexta ordem é composto por 3 filtros ativos de segunda ordem em cascata com frequência de corte em torno de 10 Hz, reduzindo consideravelmente os ruídos de alta frequência e de fundo. O circuito diferenciador é utilizado para amplificar apenas as oscilações do sinal, eliminando o nível DC. Com o circuito acima, é possível a captação de sinais muito fracos, quase invisíveis a olho nú. O esquema completo do circuito encontra-se no apêndice A.6.

O sinal de saída fornecido por este circuito pode ser aplicado a um traçador gráfico ou digitalizado através da interface A/D, e utilizado para calibração da velocidade de crescimento (figura 3.26), bem como o controle de espessura através dos obturadores.

O sistema implementado funcionou satisfatoriamente, como mostram as curvas da figura 3.25 a seguir, obtidas com o auxílio de um traçador gráfico ('plotter') X-t.

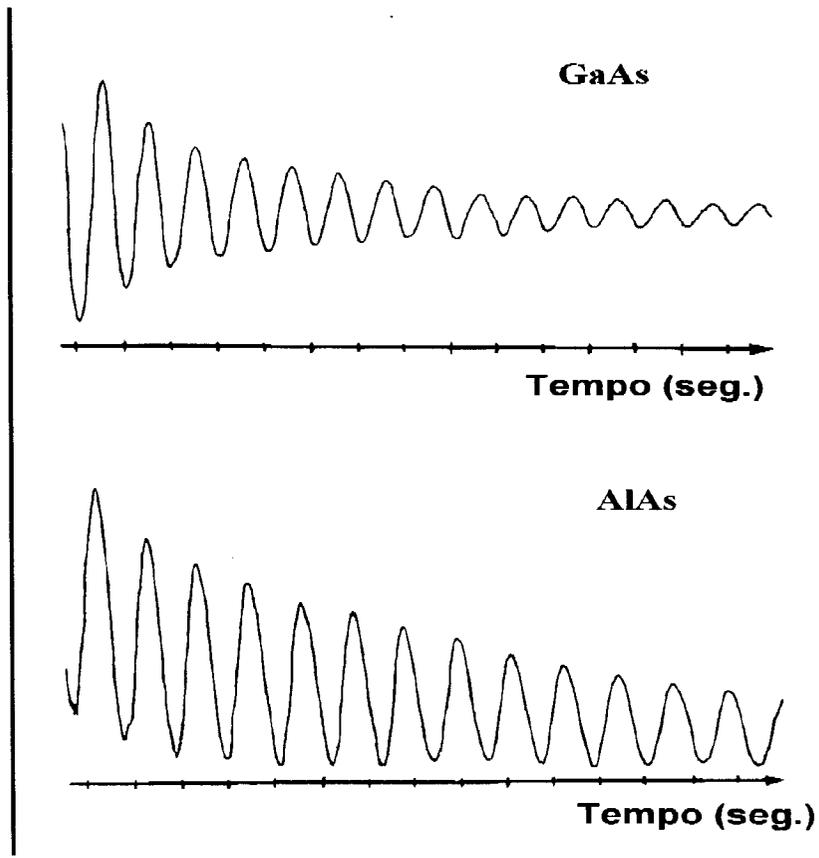


Fig. 3.25 - Exemplos experimentais de oscilações de RHEED

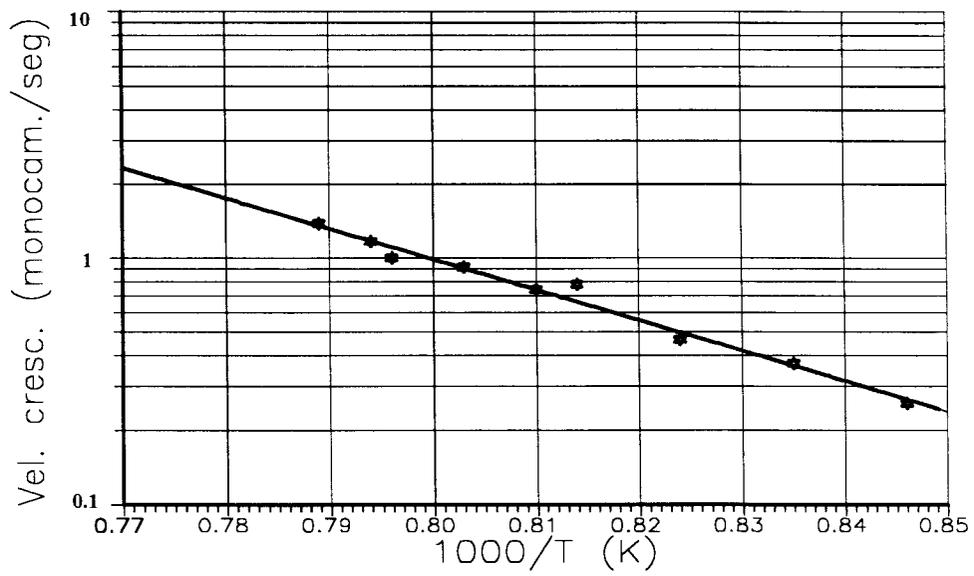


Fig 3.26 - Calibração de crescimento (GaAs)

III.5 - Obturadores (shutters)

Existem basicamente dois tipos de acionadores para controle de obturadores: de curso linear e de curso rotativo. Os obturadores instalados no sistema de MBE são do tipo rotativo, com um curso de aproximadamente 90 graus.

A automação do acionamento de obturadores nos vários sistemas de MBE existentes tem sido implementado de várias formas:

- válvulas eletro-pneumáticas: são ideais para o acionamento dos obturadores: são rápidas, com um bom torque e pequeno volume. O único inconveniente é o seu alto custo: são necessários os acionadores, as válvulas de controle e um sistema compressor de ar com alto grau de limpeza.

- motores de passo: os motores de passo são muito versáteis e fáceis de serem controlados, mas tem alguns inconvenientes como a vibração transmitida à célula durante sua operação, e a desfavorável relação *torque x velocidade*, fornecendo baixo torque para operação em alta velocidade. Para o sistema em questão, o torque é essencial devido à possibilidade de formação de depósitos de material evaporado sobre o obturador, gerando uma resistência mecânica que pode provocar falhas no acionamento.

- servo motores ou motores DC com redutor: o torque e a velocidade de operação são boas. A principal dificuldade encontra-se na complexidade do circuito de controle do motor, para garantir uma operação segura.

As formas mais comumente adotadas para automação do acionamento dos obturadores tem sido os motores de passo e atuadores pneumáticos de pequeno porte, montados diretamente sobre os obturadores.

III.5.1 - Atuação através de motores de passo

No sistema de MBE relativo a este trabalho, os requisitos torque e tamanho físico tiveram que ser considerados na seleção do atuador adequado, devido a formação de depósitos nos obturadores como já explicado, e ao pouco espaço físico disponível. Os atuadores pneumáticos seriam os ideais, mas tiveram que ser descartados devido ao alto custo.

A solução adotada, foi a utilização de motores de passo, baseado em sua facilidade de controle digital, mas condicionada à limpeza periódica dos obturadores para eliminar os depósitos e reduzir a resistência mecânica de atuação.

Foram selecionados motores de passo tipo bipolares, que apresentam mais torque em um tamanho menor (mais compactos) em relação aos unipolares. Estes motores foram adquiridos da SYNCRO Eletromecânica, um modelo híbrido de 4 fases e 1.8° por passo, pesando ≈ 500 gramas. Operam com alimentação de 12V unipolar ou 24V bipolar, facilitando a implementação de “no break” através de baterias automotivas, em caso de queda de energia.

Estes motores mostraram-se aptos para o acionamento dos 'shutters' a uma velocidade aceitável, e compactos o suficiente para montagem diretamente sobre os acionadores. A velocidade do motor, mantendo um torque suficiente para a abertura dos 'shutters', é maior que 1,5 ciclos por segundo, resultando em um tempo de atuação menor que 200 ms. Como tem sido utilizadas baixas taxas de crescimento (< 2 monocamadas por segundo), a velocidade é suficiente, mas de qualquer forma, para aumentar a precisão basta reduzir a taxa de crescimento. Para aumentar a velocidade e manter segurança no acionamento, foi utilizado velocidade variável no motor, como explicado no item III.5.2.

Não foi necessário implementar o controle sobre todos os obturadores, pois algumas células como o As e eventualmente o Ga ficam permanentemente abertos durante o crescimento. Na forma como está operando atualmente, das 6 células, duas estão carregadas com As. Portanto, seria necessário implementar o controle sobre apenas 4 obturadores.

III.5.2 - Interface de controle

Para a operação do circuito de controle do motor de passo através de um microcomputador, são necessários basicamente 3 sinais: a direção de rotação, habilitação do motor e pulsos ('clock') de operação (ver item III.5.3). Para enviar estes sinais aos módulos de controle dos motores de passo, foi utilizado uma interface paralela programável Intel 8255A. Este CI dispõe de 3 portos de entrada/saída (E/S) com 8 bits cada, sendo que no porto C cada bit pode ser controlado independentemente (modo bit set/reset)⁽¹⁵⁾.

O porto C foi dividido em dois grupos de 4 bits, dos quais (fig. 3.27), um grupo é utilizado para enviar o sinal de controle de direção do motor para abrir e fechar o obturador (1 bit para cada obturador). O segundo grupo envia os sinais de habilitação dos motores, utilizados para desabilitar a entrada de 'clock' no circuito de controle e atuar sobre a alimentação dos motores.

O porto A é utilizado (fig 3.27) para leitura dos sinais de aberto ou fechado dos sensores de posição, e o porto B para verificação de algum sinal de alarme de condição de falha de controle no obturador.

Os pulsos ou 'clock' do motor, é gerado através do 'timer 0' do Z80-CTC, e é comum a todos os motores. A utilização de um 'timer' programável permite alterar a velocidade do motor, muito útil no caso de um motor de passo quando se necessita de mais torque. Este recurso foi aplicado no controle do motor, cuja operação foi dividida em dois estágios, controlados por um contador: do início da atuação até $\approx 70\%$ do curso do acionador, onde a resistência mecânica é menor, é utilizado um 'clock' mais rápido (2 voltas/seg.). A partir daí até o final da atuação é utilizado um 'clock' mais lento (1 a 1.5 voltas/seg.), resultando em um torque maior para sobrepujar a resistência final do acionador. Ao fim da atuação, o 'timer' é resetado, o 'clock' interrompido e o motor desabilitado. Utilizando este recurso, conseguiu-se um tempo de acionamento menor que 200 milisegundos

Ao final do acionamento, os sensores de fim de curso são lidos para verificar se os obturadores foram corretamente acionados.

III.5.3 - Circuito de controle de motor de passo

Os controladores de motor de passo recebem os sinais da interface de controle e atuam sobre os acionadores. Além disso, condicionam os sinais dos sensores de posição a serem lidos pela interface de controle. A figura 3.27 abaixo mostra o diagrama geral do controlador do motor de passo, cujo esquema elétrico encontra-se nos apêndices A.7.1 e A.7.2

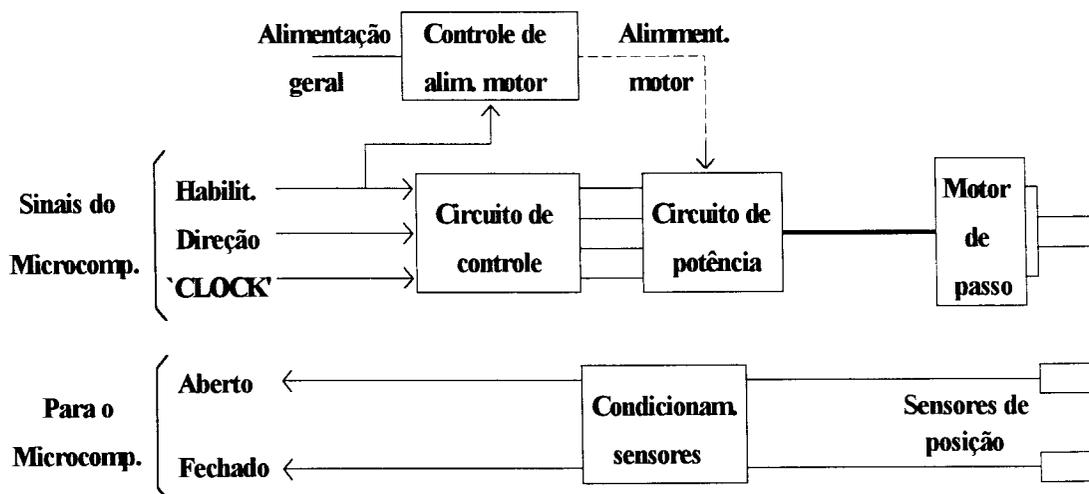


Fig. 3.27 - Diagrama do circuito de controle de motor de passo

Os motor de passo tipo bipolar de 4 fases é composto por duas bobinas independentes, sobre os quais são injetadas correntes em ambos os sentidos, em uma determinada sequência, tendo-se as bobinas sempre ativas. No caso do motor unipolar, elas são compostas por 4 bobinas com um terminal em comum, onde corrente é injetada em apenas um sentido, sendo que durante a operação, ficam apenas duas bobinas ativas. Daí, o fato de os motores de passo tipo bipolar serem mais compactos.

O circuito de controle condiciona os pulsos de entrada formando quatro saídas, em uma sequência correta para operação dos motores. A forma de onda gerada pelo circuito é mostrada na figura 3.28, correspondentes às saídas F1 a F4 indicadas no esquema completo do circuito de controle, no apêndice A.7.1. O circuito de controle é o mesmo tanto para motores bipolares como para unipolares. A única coisa que muda é o circuito de potência, que para o motor bipolar é mais complexo e pode ser utilizado também para acionamento de motores unipolares.

Os motores de passo podem operar de dois modos: um passo completo ou meio passo por pulso. A explicação anterior referente à ativação das bobinas bem como os sinais da figura 3.28 aplicam-se à operação no modo um passo por pulso, onde existem sempre duas bobinas ativas. Para operação por meio passo, é acrescentado um estágio intermediário onde uma das bobinas é desativada ficando com apenas uma ativa, fazendo com que o motor ande 1/2 passo, e quando a segunda bobina é ativada, é completado o passo.

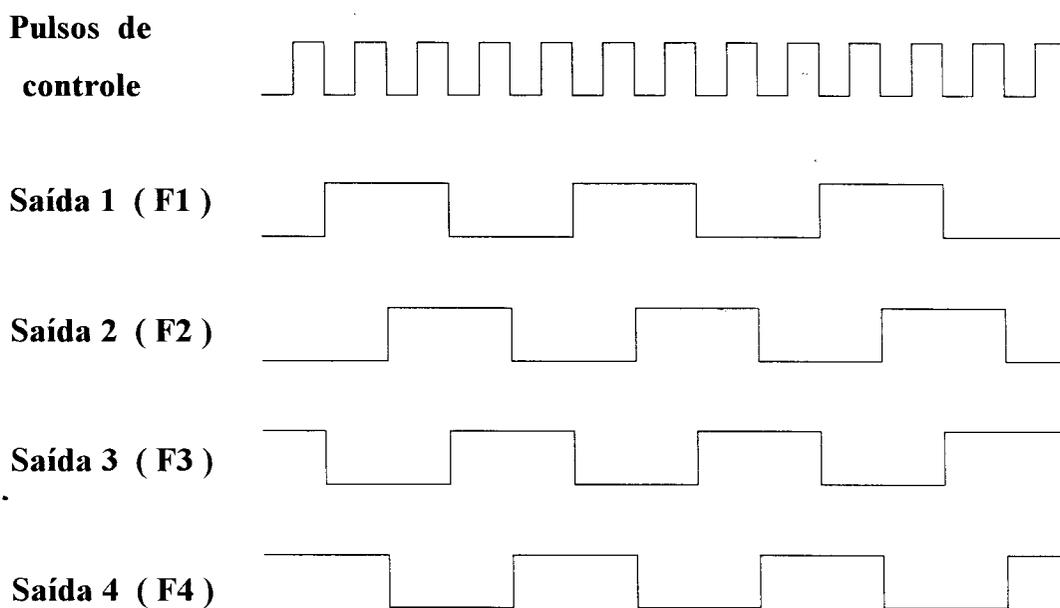


Fig. 3.28 - Sinais gerados para operação do motor de passo

Como pode-se notar nos sinais da figura 3.28, existe uma sequência de pulsos deslocada de 1/4 de período entre duas saídas consecutivas. Para um motor unipolar, basta conectar estas saídas na mesma ordem nas 4 bobinas, onde o nível alto indica a bobina ativa. Já para o motor bipolar, é feita a conexão de sinais complementares, no caso, F1 e F3 em uma bobina, e F2 e F4 em outra bobina. Neste caso, os níveis indicam a direção da corrente na bobina, por exemplo de nível alto para nível baixo.

Para o circuito de potência, foram implementados dois circuitos tipo 'H' para realizar a inversão de corrente sobre as duas bobinas do motor bipolar. A figura 3.29 mostra o circuito tipo 'H', pela qual pode-se compreender melhor a utilização de sinais complementares para cada bobina. O esquema elétrico do circuito de potência para o motor de passo está no apêndice A.7.2.

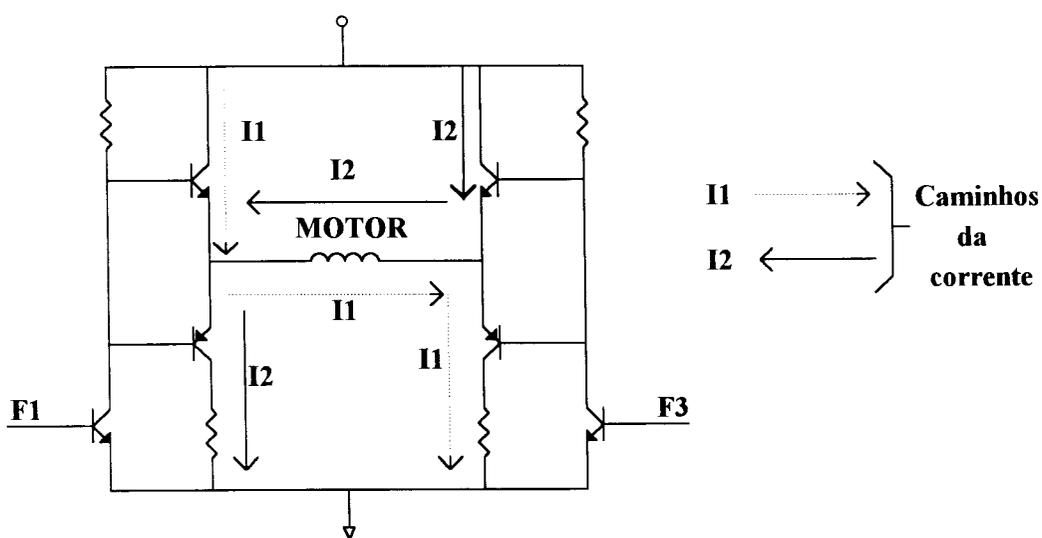


Fig. 3.29 - Inversão de corrente através de circuito tipo H

O motor de passo permite o controle do ângulo de abertura do 'shutter' pelo número de passos. Os sensores de posição foram colocados como medida de segurança em caso de falha ou perda de passo no acionamento do motor.

A desabilitação do motor de passo foi projetada de forma a manter uma alimentação residual de 1/3 a 1/2 da alimentação nominal do motor como mostra a figura 3.30 abaixo, com a finalidade de manter um torque de travamento do motor quando parado. A manutenção de uma fração da alimentação se deve aos seguintes fatores: a manutenção da tensão nominal superaqueceria o motor, e por outro lado o seu corte total liberaria o motor permitindo a mudança acidental na posição dos acionadores.

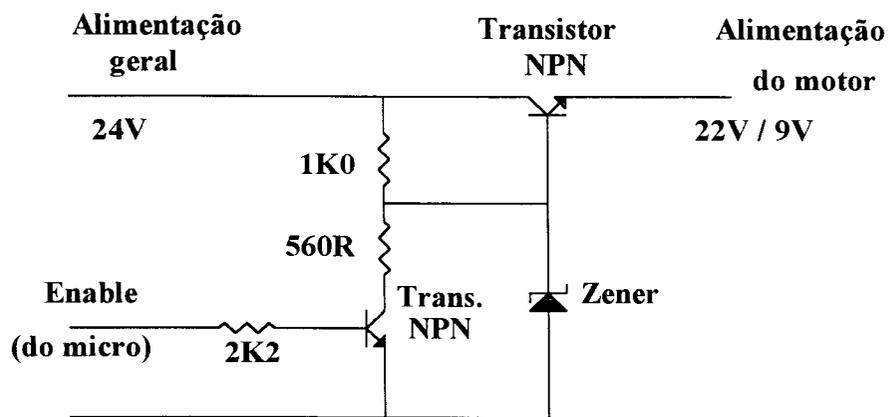


Fig. 3.30 - Controle de alimentação do motor de passo

Capítulo IV - Programas de Controle e Automação

IV.1 - Programas do controlador UCP Z-80

Os programas para a UCP Z-80 foram desenvolvidos em linguagem montadora ('assembler') Z-80⁽¹⁴⁾ e em linguagem C, e gravadas em EPROM.

O programa para gravação em EPROM permite a definição dos endereços iniciais do programa executável e da área de dados inicializados e não inicializados, facilitando a alocação do programa e dados em qualquer área de memória desejada.

IV.1.1 - Rotinas básicas

As rotinas básicas do sistema foram escritas diretamente em linguagem montadora ('assembler') Z-80, e o programa principal (programa mestre) que faz uso destas rotinas foram escritas em linguagem C. A rotina de inicialização e outras que são chamadas por interrupção, são transparentes ao programa principal. Quando a UCP é inicializada, o Z80-CPU entra automaticamente no modo de interrupção IM0, compatível com o microprocessador Intel 8080, e atendido pelas rotinas RSTnn. A rotina de inicialização reprograma a interrupção para o modo 3, exclusivo do Z-80.

Rotina de inicialização (.begin)

Executada quando a UCP é ligada ou reinicializada ('reset'). Programa os periféricos utilizados pela UCP como o Z-80 CTC, Z80-PIO, 8251 e 8255, prepara as tabelas de desvios ('jumps') para as rotinas de interrupção (fig. 4.1) geradas pelo Z-80 CTC e Z-80 PIO, e pela interrupção não mascarável NMI. Testa e define o tamanho da memória RAM, transfere as variáveis inicializadas da EPROM para a RAM e define a localização e o tamanho da pilha.

RAM	Periféricos	Rotina (endereço)
8000H	Z80-CTC timer 0	NADA
8002H	Z80-CTC timer 1	NADA
8004H	Z80-CTC timer 2	NADA
8006H	Z80-CTC timer 3	WATCH
8008H	Z80-PIO A bit 0	RXRDY
800AH	Z80-PIO A bit 1	TXRDY
800CH	Z80-PIO A bit 2	Alm2
800DH	Z80-PIO A bit 3	Alm3
:	:	:
:	:	:
8013H	Z80-PIO B bit7	Alm15

Fig. 4.1 - Tabela de desvio das interrupções

No início da memória RAM foi montada a tabela de endereços das rotinas de atendimento de interrupção (ver fig. 4.1) geradas pelo Z-80 CTC (4 endereços - 1 para cada 'timer') e Z-80 PIO (2 endereços - 1 para cada porto). Como os portos do Z80-PIO foram programados no modo OU, cada bit corresponde a uma interrupção. A rotina de atendimento do porto busca o bit que gerou a interrupção e a rotina de atendimento correspondente em uma segunda tabela de endereços (16 endereços - 8 de cada porto). Isto resulta em um total de 20 interrupções possíveis, fora a NMI. Deste total, os 6 primeiros (4 do Z80-CTC e 2 do Z80-PIO) são utilizados pela UCP, e as outras 14 (Alm2 a Alm15) estão disponíveis.

Rotina "Cão de Guarda" ('Watch Dog Timer')

O Z-80 CTC , 'timer' 3, foi programada para gerar interrupção a cada 10ms, executando a função de cão de guarda ('watch dog timer'). A rotina de atendimento executa as seguintes tarefas:

- atualização do relógio calendário, incluindo dias de contagem.

- verificação da memória RAM - verifica uma posição de memória a cada acesso, sequencialmente, resultando em verificação de 100 bytes por segundo. Em caso de erro, será ativado um 'flag' de erro de RAM na variável SYSFLAG e um sinal correspondente num porto de saída de sinalização (PTFLAG - fig 3.14), e o endereço falho será guardado na variável ADRAM.

- verificação da memória EPROM - realiza a soma ('check sum') de todos os bytes da EPROM (um byte a cada acesso), e compara com o valor previamente gravado no final da memória. Em caso de erro, o 'flag' de erro na EPROM será ativado na variável SYSFLAG e um sinal correspondente será enviado num porto de saída de sinalização (PTFLAG).

- reprograma o segundo 'timer', de acordo com a variável SYSFLAG, reinicializando sua contagem para 15 ms. Se por algum motivo como por exemplo erro de execução de programa, esta rotina não for executada, o 'timer' não será reprogramado e terminará sua da contagem, após o qual ele gera um pulso de requisição de barramento e interrompe as atividades da UCP.

- temporização de 'time out' para comunicação serial, executada se a recepção estiver ativa. Como este programa é executado a cada 10 ms, foi implementado um contador até 4 resultando em ≈ 40 ms, ao final do qual a recepção é desativada. Um sinalizador ('flag') de recepção ativa é posicionada e o contador do 'time out' zerado sempre que um caracter é recebido. Este sinalizador é desativado no final da recepção. A escolha deste valor de 40 ms se baseia no fato que mesmo com transmissão em 600 baud, o tempo de transmissão de cada caracter não ultrapassa 20 milisegundos.

Controlador de interrupções - Z80 PIO

O Z-80 PIO foi programado para atuar como controlador de interrupções. Ambos os portos A e B foram programados para gerar interrupções no modo OU, ou seja, se qualquer um dos bits de seus portos for ativado (nível alto). A rotina de atendimento procura o bit que gerou a interrupção, procura o endereço da rotina correspondente na tabela de saltos, guarda o endereço de retorno e realiza um desvio para a execução desta rotina. Procura e executa todas as interrupções (bits) ativas antes de retornar da interrupção.

Nos dois bits menos significativos do porto A foram conectados sinais de recepção e de transmissão de dados da interface serial 8251 , os quais correspondem às seguintes rotinas na tabela de atendimento:

- **RXRDY_** - Rotina de atendimento da recepção de dados: quando existir um caracter recebido e pronto para ser lido na 8251, é gerado uma interrupção de atendimento através da Z80-PIO. A rotina de atendimento lê o caracter da 8251 e coloca num "buffer" de recepção liberando a interface para a recepção de um novo caracter. Verifica erros de comunicação reportados na variável COMFLAG e, se o caracter é o de controle de fim de recepção <CR>. Caso seja, desabilita a recepção de dados e encerra a comunicação. Cada chamada corresponde a um caracter lido.

- **TXRDY_** - Rotina de atendimento de transmissão de dados. Quando a transmissão de dados está ativa e a 8251 acaba a transmissão de um caracter, ela envia um sinal de interrupção ao Z80-PIO avisando que está pronta para transmitir o próximo caracter. Depois de terminada a transmissão de todos os caracteres, a interface desativa a transmissão cancelando novos pedidos de interrupção, até que novos pedidos de transmissão sejam feitas.

Outras rotinas

As rotinas a seguir, são rotinas auxiliares chamadas pelo programa principal:

Rotina de transmissão de dados - envia(quantidade, endereço)

Esta rotina é chamada pelo programa principal, recebendo os parâmetros 'quantidade' e 'endereço' dos caracteres a transmitir. A rotina espera o término de alguma transmissão anterior em andamento, transfere estes parâmetros para as variáveis de controle de transmissão utilizadas pela rotina de transmissão por interrupção (TXRDY), e habilita a transmissão de dados.

Rotina de recepção de dados - recebe(endereço)

Esta rotina faz a transferência dos caracteres do 'buffer' de recepção de dados para o 'endereço' especificado, zera o contador de controle do 'buffer' e retorna o numero de caracteres transferidos. O fim de recepção é definido pelo caracter 'carriage return' <CR>, ou pela desabilitação do sinal de controle de comunicação DSR.

A comunicação de dados utiliza caracteres tipo ASCII, pela sua compatibilidade com qualquer interface RS232, além de facilitar a identificação do fim de transmissão e os limites de dados comunicados. No entanto, é necessária uma constante conversão dos caracteres do formato ASCII para numérico e vice versa, aumentando a carga de programas. Na UCP, os dados recebidos são convertidos para sua forma numérica hexadecimal através da rotina **atoi.asm**, e os dados numéricos a serem enviados são convertidos para o formato ASCII através da rotina **itoa.asm**. Estas rotinas utilizam tamanho fixo de 2 bytes hexadecimal que correspondem a 4 caracteres em formato ASCII.

Leitura do conversor A/D - ADC(canal)

A rotina de controle do conversor envia a seleção de 'canal' de entrada, e faz uma média de 8 medidas. A média é feita pelo acúmulo das 8 medidas, e a divisão por 8 é conseguida simplesmente deslocando o valor da soma, 3 bits em direção ao bit menos significativo. O resultado é retornado no par de registradores HL, e atribuída a uma variável de chamada da rotina.

Escrita no conversor D/A - DAC(canal, valor)

A rotina monta um 'byte' composto pelo número do canal de saída (3 bits) e pelo complemento dos 4 bits mais significativos do 'valor', e escreve no primeiro endereço da placa conversora. A seguir, é enviado o complemento do 'byte' menos significativo para o segundo endereço. O complemento do valor se deve ao fato de o conversor operar com os bits no modo complementar (COB). Poderia-se implementar este complemento diretamente no circuito através de um 'buffer' inversor, o qual não foi feito por falta de componentes adequados no momento da sua montagem.

Para que o microcomputador pudesse ter algum acesso às interfaces e memórias do sistema, foram implementadas rotinas de leitura e escrita tanto em memória como em dispositivos de entrada e saída (E/S). As rotinas são as seguintes:

mread(endereço) - ler um 'byte' de um 'endereço' de memória

mwrit(endereço, byte) - escrever um 'byte' em um 'endereço' de memória

inportb(endereço) - leitura de um 'byte' de um 'endereço' de E/S

outportb(endereço,byte) - escrita de um 'byte' em um endereço de E/S

IV.1.2 - Programa principal da UCP

Chamada logo após a rotina de inicialização, o programa principal "**mberom.c**" escrito em linguagem C, controla a comunicação com o microcomputador IBM-PC, recebendo comandos e instruções e enviando dados e informações referentes ao controle do sistema de MBE.

Inicialmente foram implementadas apenas comandos básicos para o controle das interfaces. A UCP Z-80 comunica-se com um microcomputador utilizando um conjunto de caracteres em formato ASCII, com tamanho fixo de 10 caracteres com o seguinte formato:

CXXXXYYYY<CR>

Onde:

C - caracter ASCII com a instrução ou comando a ser executado, podendo ser:

- I** - leitura de um endereço de I/O
- O** - escrita em um endereço de I/O
- R** - leitura de um endereço de memória
- W** - escrita em um endereço de memória
- A** - leitura do conversor A/D
- D** - escrita no conversor D/A
- S** - acionamento do `shutter' (obturador)

XXXX - convertido para formato numérico inteiro hexadecimal, corresponde a 2 bytes contendo o endereço a ser utilizado pelo comando ou instrução, podendo ser: endereço de I/O, memória, canal do conversor D/A ou A/D, ou número do obturador.

YYYY - também convertido para formato numérico, corresponde ao dado a ser escrito pelo comando em um endereço (XXXX) de I/O, memória, canal do conversor D/A ou comando para acionamento do obturador.

<CR> - 'carriage return' utilizado como identificação de fim de transmissão.

A estrutura do programa tem a seguinte forma:

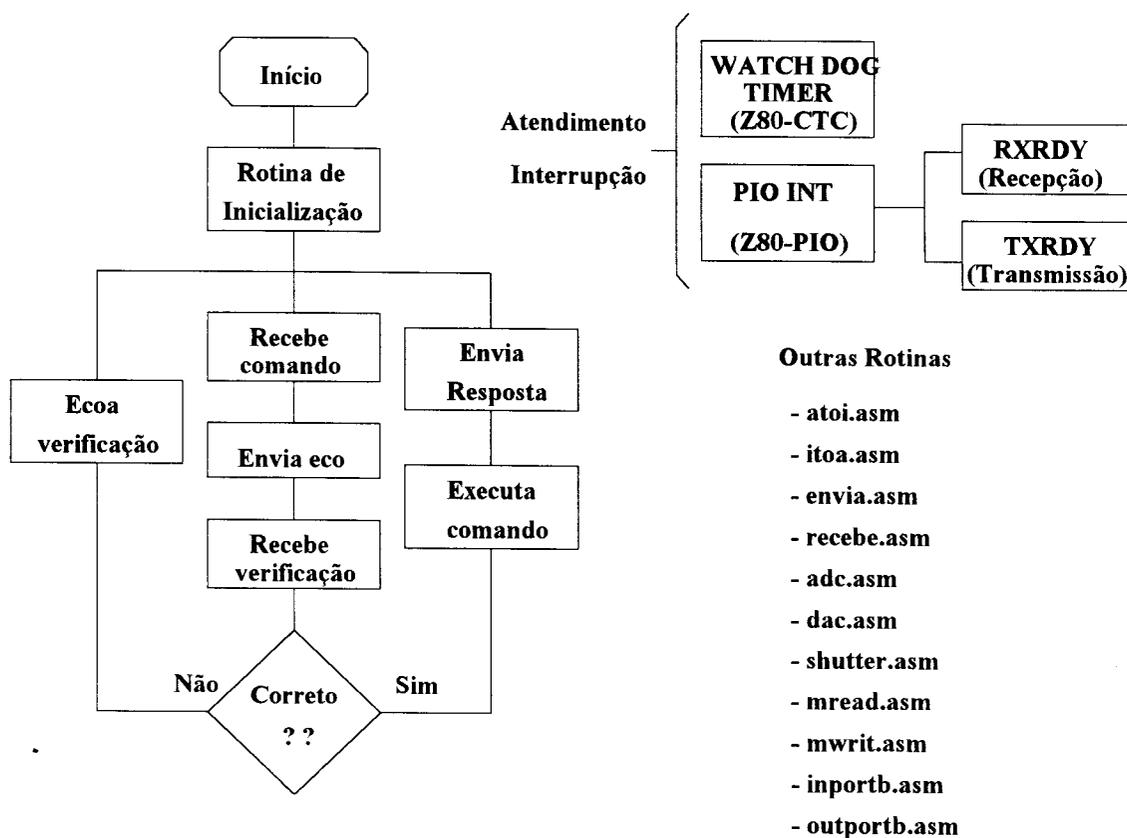


Fig. 4.2 - Fluxograma do programa principal da UCP

Antes de iniciar o laço de controle, é enviada uma mensagem com o tamanho da memória RAM.

Para evitar a execução de comandos com erros, os comandos recebidos pela UCP Z-80 são ecoados de volta ao microcomputador, e comparados com o original. Caso esteja correto, a UCP Z-80 recebe um caracter de aceitação ('*') para execução do comando e caso contrario ('?' - comando errado), espera o envio de um novo comando.

A instrução é separada em seus parâmetros que são: comando, endereço e dado. A instrução é executada, e uma resposta é transmitida ao microcomputador o qual pode ser um dado requisitado ou outra coisa, indicando que a instrução foi executada com sucesso.

A comunicação serial de dados^(19,22) foi testada/implementada de duas formas em relação ao controle do fim de transmissão e recepção. Na placa UCP foram colocados 'jumpers' para selecionar o modo de comunicação, permitindo a habilitação ou não dos sinais de controle de comunicação DSR/DTR e RTS/CTS, dependendo do tipo de cabo serial utilizado. As formas de comunicação são as seguintes:

1 - Comunicação a 3 fios: Mantendo-se os sinais de controle DSR/DTR e RTS/CTS sempre ativos, e utilizando o <CR> como fim de comunicação. É a maneira mais fácil de ser implementada, mas possibilita a ocorrência de situações indesejáveis como: se houver erro na recepção do caracter <CR>, o programa poderia nunca saber que acabou a comunicação, podendo entrar em laço ('looping'). Além disso, pode ocorrer problemas de erros de sobreposição ('over run') onde a interface recebe um novo caracter antes que o anterior seja lido. Para evitar isto, a velocidade de comunicação deve ser consideravelmente reduzida (máximo de 1200 bauds).

2 - Controle por DSR/DTR: os sinais de controle DSR e DTR podem ser utilizados para indicar o início e o fim de uma transmissão ou se está pronto para recepção, através da ativação e desativação de seus sinais. É uma forma mais segura de comunicação, que elimina os problemas da comunicação a 3 fios.

Para resolver qualquer problemas devido a erros de recepção do caracter de controle de fim de transmissão <CR>, foi implementado um 'time out' de ≈ 40 milisegundos, após o qual, fica caracterizado o erro de recepção e assim, é encerrada/desabilitada a recepção de caracteres fazendo com que o programa saia

do 'loop' de recepção. O último carácter recebido é substituído por <CR>. E para melhorar a segurança, a transmissão é alternada, ou seja, qualquer informação transmitida recebe uma resposta para caracterizar o seu processamento, como se fosse uma comunicação tipo "half duplex".

IV.2 - Programas para o microcomputador IBM-PC

Do ponto de vista do microcomputador IBM-PC, entre as duas formas de comunicação citadas anteriormente, a primeira forma seria muito mais simples, e transparente a uma linguagem de alto nível, permitindo a comunicação através de comandos convencionais de linguagem de alto nível. Já o segundo modo, exige a manipulação da comunicação em uma linguagem de mais baixo nível com a utilização de chamadas à BIOS ou mesmo controle direto da interface. A chamada à BIOS seria compatível com qualquer equipamento operando com o DOS. Já o controle direto funciona apenas com os equipamentos com circuitos compatíveis com os comandos utilizados para seu controle.

O programa de comunicação (Apêndice C) foi escrito em linguagem C (Turbo C)⁽²¹⁾, utilizando recursos de controle/acesso direto da interface tanto para transmissão como para recepção de dados. A interface serial do microcomputador utilizado é compatível com o CI 8250⁽³⁰⁾, como a maioria dos microcomputadores da linha IBM-PC. A estrutura do programa é um complemento do programa principal da UCP (fig. 4.2), e o formato da palavra de comando é o mesmo: **CXXXXYYYY<CR>**

Basicamente, o programa do microcomputador IBM-PC envia a intrução ('string') e recebe o eco dos caracteres transmitidos. Se a 'string' recebida de volta (ecoada) for igual à enviada, envia uma 'string' de caracteres "*" de aceitação

indicando que a comunicação foi correta e pode ser processada. Se não, envia uma 'string' de '?', indicando um erro. Foi criado um 'menu' de seleção de comandos, e um laço ('looping') de envio que realiza até 5 tentativas de transmissão correta, após o qual, retorna ao 'menu' principal de seleção de comandos. Se a transmissão foi realizada com sucesso, espera resposta ao comando. Se não, espera eco dos caracteres de erro ('?').

Foram também implementadas rotinas de tratamento de dados, incluindo as conversões entre numérico, hexadecimal e ASCII, e as conversões de temperatura para valor hexadecimal (conversor D/A), e a conversões dos valores do conversor A/D para temperatura (°C) e pressão (mbar).

Assim, pelo 'menu' principal (Apêndice C), para enviar um valor de temperatura ('D'), basta entrar com o canal do D/A e o valor da temperatura em °C, e no caso do A/D ('A'), realiza a leitura e fornece os valores em °C e mbar. No caso dos obturadores('S'), basta selecionar o numero do obturador e o comando 'A' para abrir ou 'F' para fechar, recebendo como resposta uma sinalização de erro. Os outros comandos implementados são: 'X' para enviar algum comando diretamente no formato CXXXXYYYY<CR>, como por exemplo os comandos para leitura e escrita em endereços de memória ('R' 'W') e E/S ('I' 'O') da UCP, e mais os comandos 'R' para receber algum dado, e 'E' para enviar a 'string' de '*'.

As rotinas escritas para o microcomputador IBM-PC e a UCP formam um conjunto de rotinas básicas de controle das interfaces, contendo todos os comandos necessários à realização de um crescimento, que se resumem basicamente a leitura e controle de temperatura e pressão na câmara, e controle dos obturadores.

Poderia ainda ser implementado a automação da calibração pelo RHEED, para o qual basta conectar o sinal de saída do circuito detetor em uma das entradas não utilizadas pelo conversor A/D, e criar um programa de leitura do conversor A/D temporizado. Por exemplo, realizar uma leitura a cada 40 milisegundos seria suficiente para recompor uma taxa de crescimento de até 3 monocamadas por segundo, sendo que usualmente utiliza-se taxas entre 0.5 e 2 monocamadas por segundo.

Para realizar o crescimento de uma amostra, existe todo um processo de preparação do substrato, podendo ser dividida em várias etapas que podem ou não ser automatizadas. As etapas a seguir são feitas manualmente:

- preparação química do substrato
- carregamento da câmara de introdução
- transferência
- resfriamento do sistema com Nitrogênio líquido

Estas outras etapas, relativas ao crescimento, podem ser automatizadas:

- inicialização do aquecimento das células e substrato
- aquisição das oscilações do RHEED
- calibração de crescimento através do RHEED
- crescimento da amostra

Na forma como está implementado, o sistema fornece condições para automatizar todos os itens acima listados, através de um microcomputador IBM-PC. Foram implementados comandos específicos para o controle das interfaces A/D, D/A e dos obturadores, os quais fornecem ao micro IBM-PC o controle sobre as variáveis necessárias para implementar programas de automação. Estas variáveis são basicamente o controle de temperatura, o acionamento dos obturadores e a aquisição das oscilações do sinal do RHEED.

Os comandos adicionalmente implementados para acesso a qualquer endereço de E/S ou memória da UCP Z-80, permitem ao micro IBM-PC o controle direto das interfaces existentes bem como de novas interfaces e aplicações que venham a ser desenvolvidas para o sistema.

Capítulo V - Segurança contra falhas

V.1 - Introdução

Um sistema para monitoração e segurança é essencial para o sistema de MBE, para garantir um mínimo de segurança em algumas situações onde a falha pode provocar graves perdas. Além disso, deve ser feita monitoração das condições do sistema e evitar ou sinalizar falhas na ausência humana. As consequências de alguma falha pode incorrer em algumas das situações a seguir:

- sendo um equipamento importado, a danificação de algum componente imprevisto no sistema pode resultar em uma espera de meses para reposição, e a um alto custo.

- qualquer abertura da câmara de crescimento exige a substituição dos materiais das células, além de duas semanas ou mais de limpeza e mais os crescimento iniciais para recalibração de crescimento.

- um crescimento perdido pode representar a perda de um substrato de boa qualidade que pode custar US\$ 100, além do material gasto em seu crescimento.

V.2 - Falhas consideradas e medidas adotadas

A segurança contra falhas foi implementada utilizando algumas medidas simples nas partes mais críticas do sistema, visando prever e evitar as falhas mais comuns e graves que poderiam danificar o sistema e interromper as atividades, e se possível, salvar amostras em crescimento. Para o sistema de MBE, as falhas gerais mais graves estão relacionadas ao aquecimento das células de efusão e substrato,

ao vácuo na câmara de crescimento, e ao risco de contaminação através da bomba turbo molecular. Parte das medidas adotadas são de caráter permanente e autônomas, e outras, permanentes ou relativas ao crescimento, monitoradas pela Unidade Central de Processamento o qual incorpora algumas medidas de segurança para evitar a execução de procedimentos errôneos. Durante o crescimento, deve-se garantir também a correção das informações comunicadas, para evitar a execução de procedimentos inadequados provocados por erro de comunicação.

V.2.1 - Aquecimento das células

No caso do aquecimento das células e do substrato, as medidas adotadas foram no sentido de evitar o superaquecimento e a danificação das células e substrato.

Estas situações poderiam ser provocadas pelos motivos expostos a seguir:

- erro na leitura do termopar, causado por seu rompimento ou curto circuito
- falha no circuito de potência do controlador, enviando potência máxima de aquecimento.
- queda de energia, cortando o aquecimento das células

Termopar

O termopar pode entrar em curto ou romper e ficar em aberto. Em ambos os casos, a situação normal seria uma leitura de temperatura errônea indicando 0 °C ou um temperatura muito abaixo do real. O circuito de controle reagindo a esta leitura errônea, aplicaria potência máxima sobre a carga, provocando o superaquecimento.

No caso do substrato, uma possível consequência seria o rompimento do filamento de aquecimento.

No caso das células, isto poderia provocar:

- a evaporação de todo material em seu interior, o qual poderia se depositar sobre o obturador fechado, provocando o seu travamento.

- o rompimento da resistência de aquecimento devido ao recozimento e cristalização da resistência de aquecimento provocado pela longa exposição à potência máxima

Para solucionar o caso do termopar em aberto, bastou conectar uma resistência de alto valor entre a entrada positiva do amplificador e a fonte de alimentação. No caso de abrir o termopar, seria aplicada a tensão de alimentação na entrada do amplificador provocando a sua saturação, o que resultaria em uma indicação de temperatura muito acima do real. A reação do normal do circuito de controle a essa indicação seria o desligamento do aquecimento.

A resistência aplicada deve ser de alto valor para não interferir no funcionamento do termopar (efeito Peltier⁽⁷⁾). A corrente máxima sobre o termopar devido à resistência deve ser no máximo da ordem de μA , o que já é suficiente para provocar uma distorção de $\approx 1\text{ }^\circ\text{C}$, mas que pode ser compensado pelo ajuste de 'off set'.

Já um curto no termopar é um caso muito mais difícil de ocorrer, bastando uma verificação na sua montagem, suas extensões e conectores, e cuidar para que sejam protegidos de esforços mecânicos.

Falha no circuito de potência

O que poderia ocorrer, seria uma sobrecarga no TRIAC de saída devido a algum pico de tensão ou corrente excessiva, levando-o ao curto circuito. Esta situação resultaria em um superaquecimento da célula ou substrato. Para reduzir este risco, o circuito foi superdimensionado, foram colocados circuitos adicionais de proteção de TRIAC contra picos de tensão ou corrente (circuito 'snubber'), e também proteção por fusíveis tanto na entrada como na saída.

Adicionalmente, foi implementado um limitador de tensão de saída ajustável, não permitindo que a temperatura suba muito acima da temperatura de operação de cada célula.

Queda de energia

Mesmo quando não está sendo feito crescimento, as células são mantidas a uma certa temperatura entre 200 °C e 250 °C para evitar a oxidação e incorporação de contaminantes. No caso do Alumínio e do Gálio, elas são mantidas em seu estado líquido (Ga > 40 °C e Al > 700 °C). A passagem do estado líquido para sólido deve ser feita lentamente, pois se esta passagem for brusca pode provocar um choque, rompendo o cadinho.

Para manter o aquecimento das células em caso de queda de energia, foi implementado um *'no break'* através de baterias automotivas, para alimentação das células de Ga e Al. As temperaturas são normalmente mantidas um pouco acima da temperatura crítica de passagem de sólido para líquido. A descarga das baterias resulta em um resfriamento lento das células, evitando o choque no cadinho. Passada esta fase crítica, não haveria mais problemas, podendo as baterias serem desligadas quando suas cargas estiverem baixas.

Para limitar a corrente sobre a carga, foram utilizadas lâmpadas automotivas em paralelo, calculadas para oferecer a corrente aproximada de aquecimento da temperatura crítica. As lâmpadas tem assim dupla função: limitador de corrente e fornecimento de iluminação de emergência.

No caso do Gálio, a temperatura crítica é de 40 °C para o qual basta uma corrente de 2 ampéres na célula. Já no Alumínio, a temperatura é de 680 °C para o qual são necessários aproximadamente 8 ampéres. A tensão na bateria decresce a uma taxa lenta o suficiente para não provocar o choque.

V.2.2 - Vácuo nas câmaras

No caso do vácuo na câmara, a sua quebra teria como consequência a contaminação do sistema de MBE, que em caso mais grave, exigiria a sua abertura para substituição do material das células e refazer todo o procedimento de preparação para crescimento. A quebra do vácuo na câmara está associado ao desligamento das bombas de vácuo, que poderia ser provocado por:

- queda de energia - com o retorno da energia, as bombas poderiam falhar na tentativa de religamento

- pico de corrente na bomba provocado pela degaseificação de materiais na câmara.

Para a monitoração das bombas de vácuo, foram instalados sensores de posição baseados em chaves óticas, para verificação do estado do interruptor do disjuntor de proteção da bomba.

Quanto à bomba turbo molecular, ela é utilizada em uma das etapas de bombeamento na preparação do vácuo do sistema, podendo permanecer dias ligada e sem a presença humana, durante o processo de limpeza e degaseificação das câmaras de UHV. Esta bomba funciona com o auxílio de uma bomba mecânica, a qual, se desligada por qualquer motivo, poderia contaminar o sistema com o seu óleo.

Para solucionar o risco com a bomba turbo molecular, foi implementado uma válvula eletro-pneumática em paralelo à alimentação da bomba, o qual se for desligada, automaticamente cortará sua conexão com a bomba turbo e a câmara, evitando a contaminação pelo seu óleo.

Uma das grandes fontes de problemas é a queda de energia, afetando as células e a pressão na câmara. Se ocorrer durante um crescimento, leva ao risco de perder a amostra em crescimento. A solução ideal seria a utilização de um sistema de fornecimento ininterrupto de energia ("*no break*"), o qual, para reduzir custos, poderia ser utilizado para manter apenas os equipamentos básicos utilizados no crescimento como os controladores de temperatura, os equipamentos de vácuo da câmara de crescimento e o módulo de controle e automação.

V.2.3 - A UCP e o controle de crescimento

Além dos itens de monitoração geral apresentados, existem outros adicionais a serem monitorados e controlados durante o processo de crescimento: temperatura das células, a pressão na câmara de crescimento e o estado dos obturadores. Estas operações são executadas pelo módulo de controle a automação.

Para a segurança de funcionamento da UCP, foram adotadas algumas medidas de detecção de falha baseada em recursos de programação ('software'), e outras de circuito ('hardware'). Em caso de falha, a UCP é desativada e sua comunicação com o barramento do bastidor cortada, evitando que provoque maiores danos ao sistema através da execução de comandos errôneos. Este sinal poderia ser eventualmente utilizado para ativar uma placa UCP reserva conectada ao barramento, implementando desta forma, um sistema tolerante a falhas com duas ou mais UCP's⁽²⁴⁾.

A detecção de falhas por programação, utiliza recursos de "cão de guarda" ('watch dog timer'), com verificação periódica de memórias RAM e EPROM, como já explicado no capítulo IV.

A rotina "cão de guarda" é ativada por interrupção a cada 10 ms, executando testes das memórias RAM e EPROM e controle de 'time out'. Em caso de algum erro na memória, é ativado um sinal correspondente num porto de saída para sinalizar o erro e/ou paralisar a UCP.

Durante o crescimento, são controlados basicamente a temperatura das células e substrato, a pressão na câmara e os obturadores.

No caso da temperatura, a função do módulo é ler a temperatura e enviar um sinal analógico de controle ou ajuste para os controladores. Alguns mecanismos de segurança a nível de circuito já estão incorporados aos controladores, mas pode-se incorporar mecanismos adicionais por programação, atuando sobre o controle de temperatura.

A pressão na câmara é lida pela interface A/D, e controlada pela temperatura do Arsênio.

O acionamento dos obturadores é controlado por motores de passo, basicamente pelo número de pulsos. Para o caso de ocorrência de alguma falha no acionamento, foram instalados sensores tipo opto-acopladores para leitura de fim de curso nos obturadores. A opção por sensores óticos, deve-se ao fato de ser muito mais seguro que sensores de contato mecânico, como por exemplo 'reed relay' ou potenciômetros.

V.2.4 - Comunicação de dados

Para a comunicação de dados, os esforços se concentraram na realização de uma comunicação segura. Os dados e as instruções são processados/executados apenas quando passarem no teste de comunicação. Existem várias formas de verificação de dados que poderiam ser utilizadas⁽²⁴⁾. Como explicado no capítulo IV, o método adotado foi o eco dos caracteres transmitidos, e comparação com os originais.

No caso de comunicação sem as linhas de controle, para minimizar os erros de sobreposição causado pelo tempo de processamento de informações recebidas, para cada dado ou comando transmitido é esperada uma resposta, como se fosse uma comunicação tipo 'half duplex'.

A utilização de formato ASCII torna a comunicação mais versátil, facilitando a identificação do fim de recepção, principalmente no caso de comunicação sem linhas de controle. É utilizado o carácter 'carriage return' como fim de transmissão/recepção de alguma instrução ou dado. Para o caso de haver erro na recepção justamente deste carácter, foi implementado um 'time out' de ≈ 40 milisegundos, após o qual, fica caracterizado este erro e assim encerrada a recepção. Mas para que este procedimento de detecção de erro por 'time out' opere corretamente, é necessário que a comunicação seja realizada em pacotes, ou seja, sem intervalos entre os caracteres de uma 'string' transmitida.

Capítulo VI - Conclusão

O objetivo principal do trabalho foi o desenvolvimento de instrumentação eletrônica básica, que ofereça condições de automatizar o processo de crescimento do sistema de MBE. A instrumentação desenvolvida e mais as rotinas básicas de comunicação e tratamento de dados, fornecem as condições necessárias para a programação de crescimento e controle do sistema de MBE através de qualquer microcomputador que disponha de interface serial tipo RS232. Os resultados da implementação dos circuitos e programas já foram comentados em suas respectivas descrições.

A idéia inicial do trabalho era o desenvolvimento de interfaces para um microcomputador IBM-PC, usando um módulo com extensão de seus conectores de expansão, que chegou a ser testado. Mas este tipo de projeto ficaria limitado a micros tipo IBM-PC operando com um 'clock' lento, além da compatibilidade de endereços de E/S. Para eliminar estas limitações, foi projetada e implementada uma UCP para controle das interfaces e comunicando-se com um micro através de interface serial. Isto resolveu a limitação do tipo, e adicionalmente a da distância física do microcomputador.

Mesmo na fase de teste do módulo, não havia um micro disponível para dedicar apenas ao sistema de MBE. Assim, os testes do sistema foram feitos com um cabo serial de aproximadamente 8 metros, ligando o módulo instalado na sala do sistema de MBE a um micro AT 386 instalado numa outra sala ao lado, comunicando-se a uma velocidade de 19200 baud. Comparado a um sistema controlado diretamente por micro, sua maior desvantagem é a limitada taxa de transferência de informações entre o microcomputador e a UCP, reduzida ainda mais pela utilização de métodos de verificação da informação transferida. Mas, para a aplicação em questão, onde o fluxo de informações e a frequência de transferência são relativamente baixos, a velocidade de comunicação é mais que suficiente.

Para o caso de comunicação sem linhas de controle, ocorre o erro de sobreposição provocado pelo atraso devido ao processamento das informações recebidas. Com isto, foi aceito uma velocidade máxima de 1200 baud, sem perda de caracteres. Para aumentar a velocidade, poderia ser implementado um atraso na UCP entre a recepção de uma instrução e o envio da resposta, que é o ponto onde ocorre o erro.

O sistema é bastante versátil, podendo ser utilizado para várias outras aplicações que envolvam aquisição de dados e controle.

VI.1 - Sugestões de idéias e modificações

Analisando os equipamentos que foram implementados, pode-se notar que existe uma variedade de idéias e soluções melhores e mais adequadas aos circuitos aqui utilizados. Muitas destas idéias não foram aproveitadas devido à incerteza de aquisição dos componentes necessários na época, e outras devido à urgência de implementação de alguns destes equipamentos, caso dos controladores de temperatura, exigindo a utilização do que estivesse disponível ou de fácil aquisição no momento.

No caso dos controladores de temperatura, as idéias referem-se a um controle mais direto pela UCP ou microcomputador, e para o caso das UCP e interfaces, a utilização de componentes mais adequados.

Os controladores de temperatura poderiam ter simplesmente um pré-amplificador diferencial de ganho fixo, lido diretamente por uma interface A/D, e a correção da leitura poderia ser feita por software através de uma função de correção ou uma tabela. Para o aquecimento, poderia ser mantido apenas o estágio de potência com o controle feito através do conversor D/A e um programa de controle. Neste caso, o sistema ficaria da dependência da disponibilidade de um microcomputador dedicado apenas ao sistema.

Para a interface A/D as sugestões são as seguintes: a multiplexação dos canais de entrada poderia ser feita por um multiplexador analógico simples ou diferencial, dotados de 'latch' como o Analog Devices ADG 528 ou ADG 509, que substituiria 3 CI's (U3, U9 e U10) no projeto implementado, e ainda aceitaria uma amplitude maior do sinal de entrada. Quanto ao conversor, existem alguns⁽¹⁶⁾ para operarem em modo bipolar e com os circuitos auxiliares como referência, relógio e 'sample/hold' já incorporados ao conversor, exigindo poucos componentes adicionais para o seu funcionamento.

Para a interface D/A, poderia ser feita uma modificação no circuito de saída, no que se refere aos 'sample/hold'. Existe no mercado um CI composto por 8 'sample/hold' completos com resolução de 12 bits. Este CI (Analog Devices SMP 08) poderia substituir todos os 8 'sample/hold' simples (U24 a U31) e mais o circuito decodificador (U20) e inversor (U21) utilizados. Isto representaria uma grande economia de espaço físico sem onerar o projeto.

Quanto à UCP Z80, existem alguns melhoramentos que poderiam ser feitos, como por exemplo a utilização de um único CI's de memória RAM de maior capacidade, como por exemplo o 6264 de 8 Kbytes, e a utilização de outro CI para a comunicação serial, como por exemplo o 8250, que permite um melhor controle da comunicação.

Uma solução alternativa e tecnologicamente mais atualizada que deve ser considerada para novos projetos, é a utilização de microcontroladores, os quais podem incorporar em um único CI, várias partes da UCP como: memórias EPROM e RAM, comunicação serial, portos de E/S digitais e conversores A/D e D/A. Estes microcontroladores são boas opções para sistemas de controle distribuídos, onde podem ser utilizados de forma dedicada numa configuração modular, mais segura que um controle centralizado e menos sujeitos a problemas de ruído, além de serem bastante compactos e simples.

Para tornar mais versátil a aplicação deste sistema, poderia-se ao invés de gravar os programas aplicativos em EPROM, transferi-los do micro para a RAM da UCP através da interface serial. Na EPROM ficariam gravados apenas as rotinas de inicialização e comunicação. Este procedimento seria útil apenas em situações que permitam que o sistema possa permanecer parado, ou seja reinicializado sem prejuízo da aplicação.

Bibliografia

- 1 Parker,E.H.; "The Tecnology and Physics of Molecular Beam Epitaxy", Plenum Press, N. Y. (1985)
- 2 Mathews,J.W.; "Epitaxial Growth , Part A", (Material Science and Tecnology collection), Academic Press- N.Y. (1975)
- 3 Shur,M.; "GaAs Devices and Circuits", Plenum Press, N.Y. (1987)
- 4 Ceschin,A.M.; "Sistema para epitaxia por feixe molecular" Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Física e Química de São Carlos (1988)
- 5 Cho,A.Y.; Arthur, J.R.; "Molecular Beam Epitaxy", Progress in Solid-State Chemistry, vol 10 (1975)
- 6 Luscher,P.E.; Knodle,W.S.; Chai, Y.; "Automated molecular beams grow thin semiconductor films", Varian semiconductor equipment group, report 28 (1980)
- 7 American Society for Testing and Material; "Manual on the use of thermocouples in temperature measurement"; STP 470 B (1981)
- 8 Graeme,J.G.; Tobey,G.E.; "Operational Amplifiers - Design and Aplications", Mc Graw Hill Book Company (1971)
- 9 Ogata,K.; "Engenharia de Controle Moderno"; Ed Prentice Hall do Brasil (1982)
- 10 Jung,W.G.; "IC Converter Cookbook"; Howard W. Sams & Co Inc. (1978)
- 11 Tompkins,W.J.; Webster,J.G.; "Interfacing Sensors to the IBM PC"; Ed. Prentice Hall Inc. (1988)

- 12 Cypriano, L.B.; Cardinali, P.R.; "Microprocessador Z-80 Hardware vol.I", Ed. ERICA (1993)
- 13 Coffron,J.; "The IBM PC Connection"; Ed. Sybex - Berkeley (1984)
- 14 Cypriano,L.B.; "Z-80 Software vol.II", ed. ERICA, 2- edição (1988)
- 15 Visconti,A.C.J.F.; "Microprocessadores 8080 e 8085 - Hardware (vol I)"; Ed. ERICA (1986)
- 16 Analog Devices Inc.; "Data Aquisition" e "Linear Products" data book (1988)
- 17 Intersil Inc.; "Component data catalog" (1987)
- 18 Texas Instruments Inc.; "TTL", "Power Semiconductors" e "MOS memory" data books (1982)
- 19 Campbel,J.; "RS-232 Técnicas de interface"; Ed. Brasiliense (1990)
- 20 Leventhal,L.A.; "Z80 - Assembly language programming"; Ed. Osborne/McGraw Hill (1979)
- 21 Lafore,R.; "Turbo C Programming for de IBM"; Ed. Howard W. Sams & Co, (1987)
- 22 Schildt,H.; "Linguagem C - Guia Prático e Interativo"; Mc Graw Hill (1989)
- 23 "Os relês eletrônicos"; Elektor eletrônica; vol. 10 (1987)
- 24 Paula Jr,A.R.; Souza,J.M.; Leite,J.; Martini,M.R.B.; Loques Filho,O.G.; "Fundamentos da Computação Tolerante a Falhas", mini curso apresentado no III Simpósio de Computadores Tolerantes a Falhas; Rio de Janeiro (1989)
- 25 Sighieri,L.; Nishinari,A.; "Controle automático de processos industriais"; Ed Edgard Blucher LTDA.

26 Mostek Co.; "Mostek microcomputer components data book" (1979)

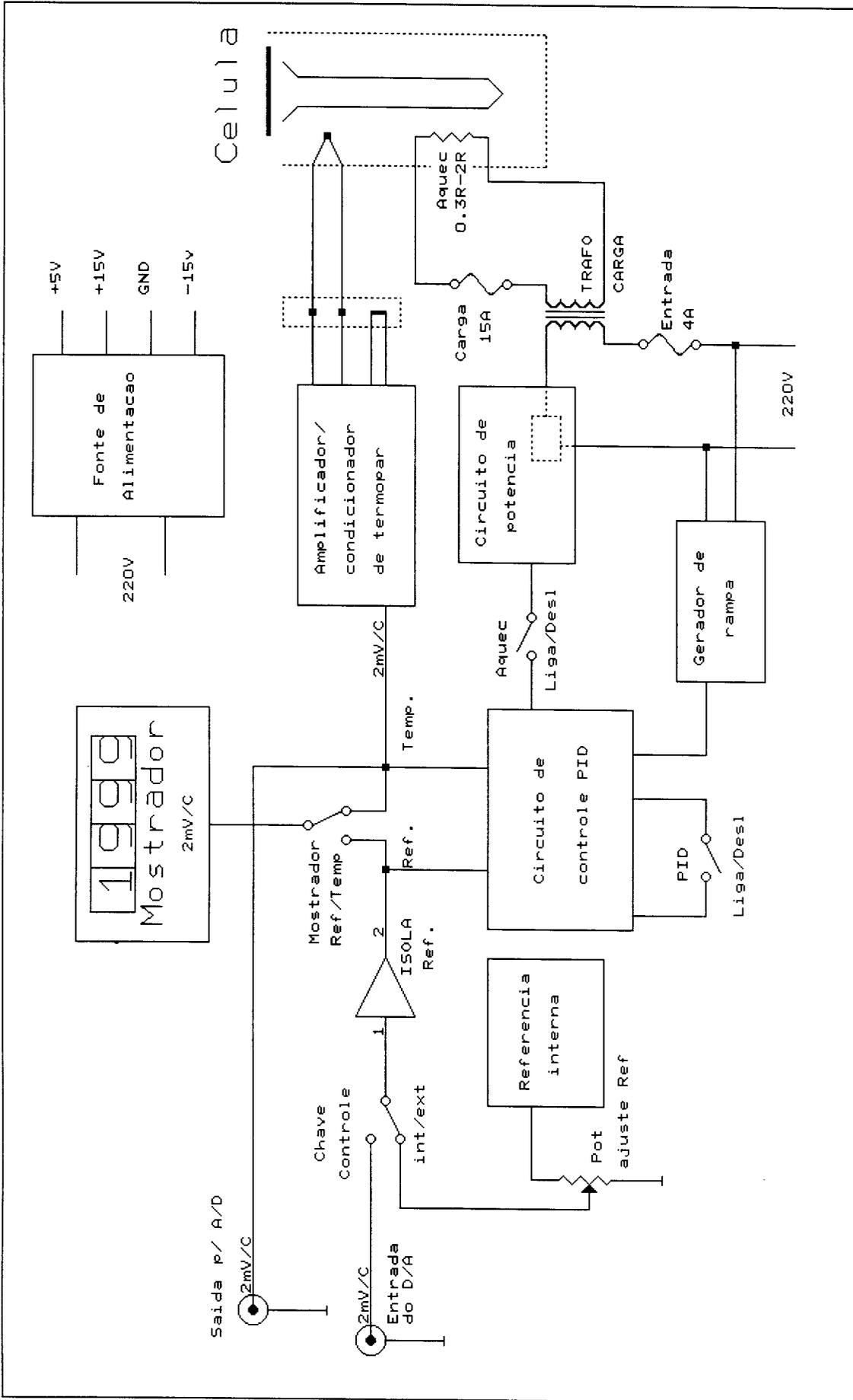
27 National Semiconductors Co. "Linear" data book (1980)

28 RCA Co.; "CMOS Integrated Circuits" data book (1983)

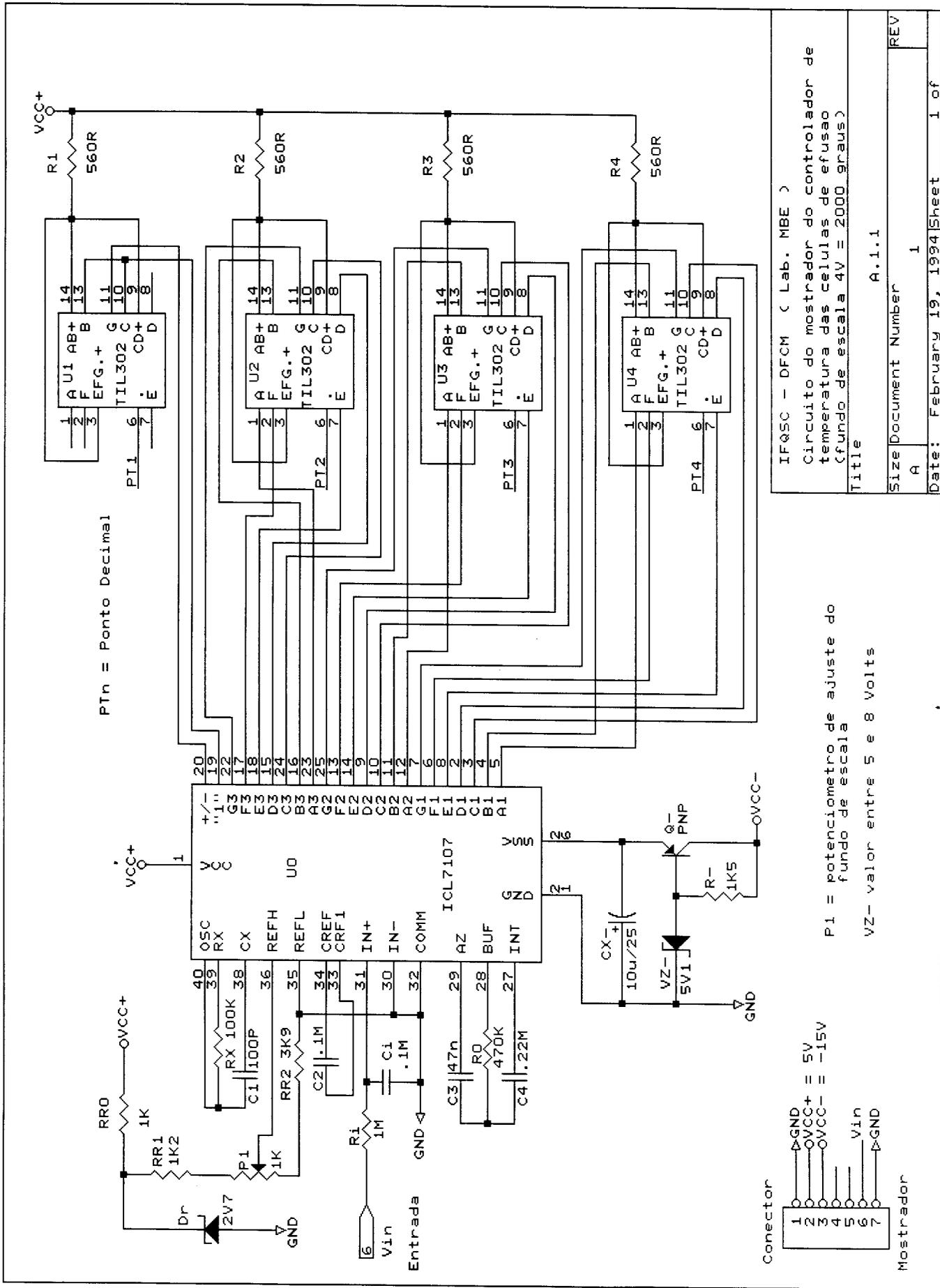
29 Raytheon Co.; "Linear integrated circuit data book" (1978)

30 Monidata Teleinformática Ltda; "Manual Técnico - NYDA 200 PLUS"

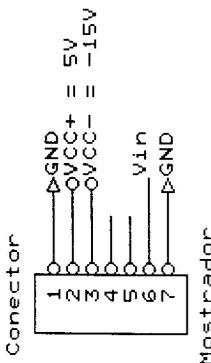
Apêndice A



IFQSC - DFCM (Lab. MBE)	
Diagrama geral do controlador de temperatura para MBE	
Title	
Size	A
Document Number	A.1
Date:	February 19, 1994
Sheet	5
of	

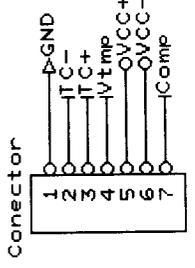
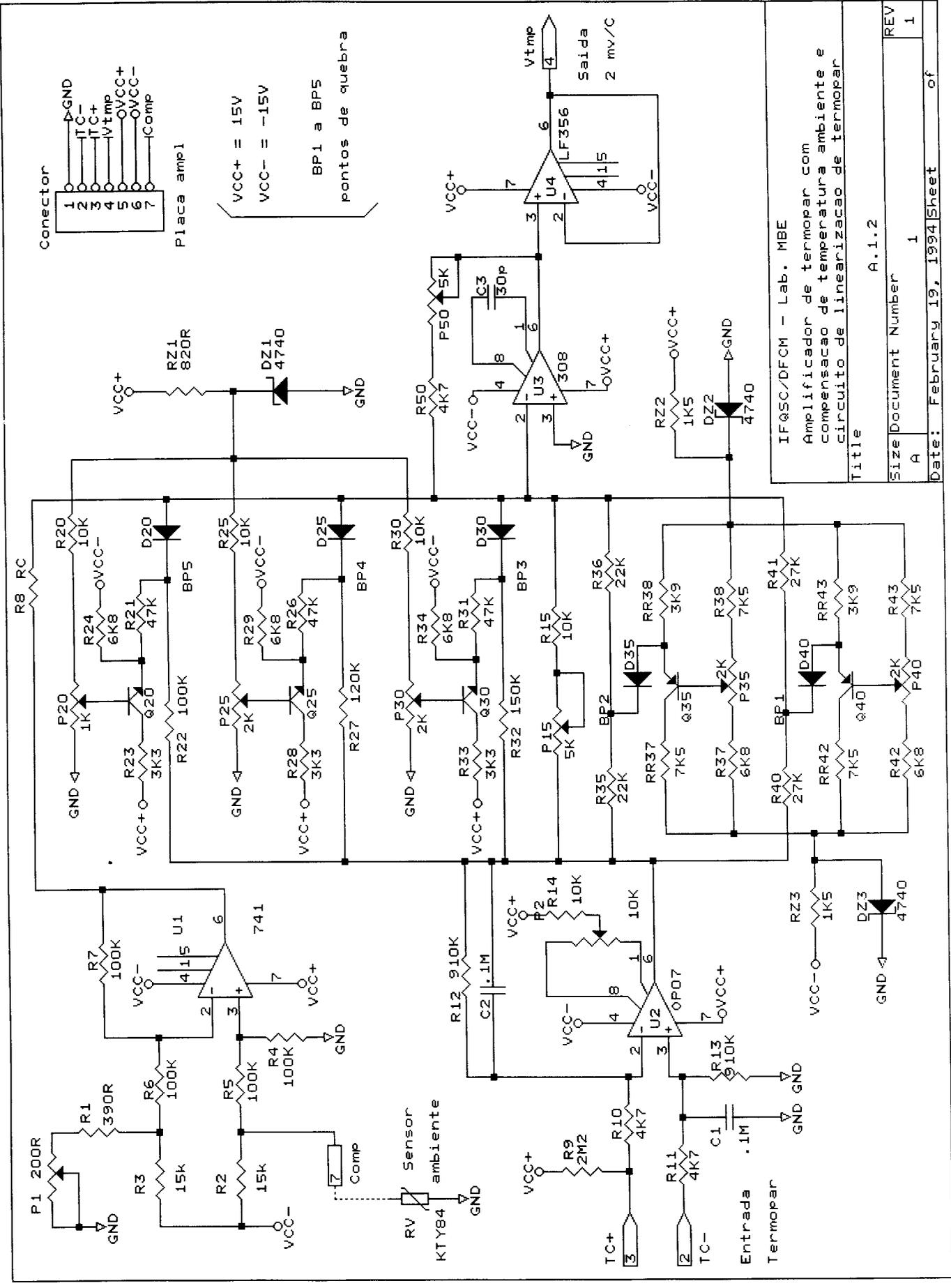


P1n = Ponto Decimal



P1 = potenciometro de ajuste do fundo de escala
VZ- valor entre 5 e 8 Volts

IFQSC - DFCM (Lab. MBE)	
Circuito do mostrador do controlador de temperatura das células de efusao (fundo de escala 4V = 2000 graus)	
Title	
Size	A
Document Number	1
Date:	February 19, 1994
Sheet	1 of 1



VCC+ = 15V
 VCC- = -15V
 BP1 a BP5
 pontos de quebra

IFQ5C/DFCM - Lab. MBE
 Amplificador de termopar com
 compensação de temperatura ambiente e
 circuito de linearização de termopar

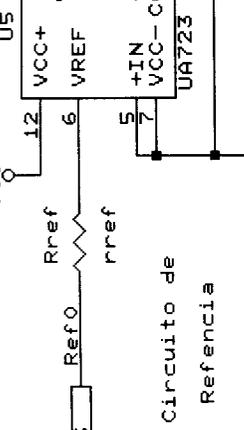
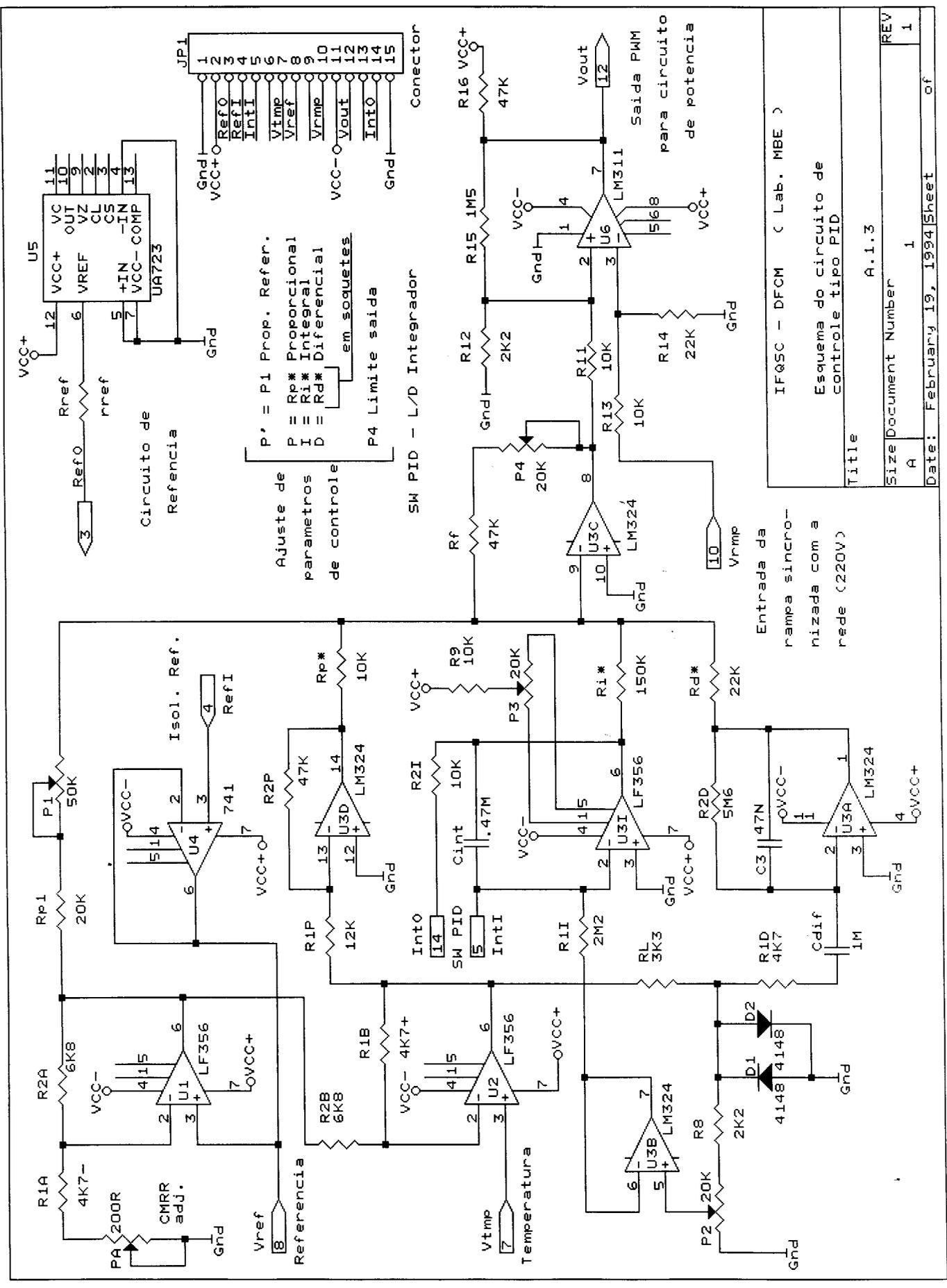
Title

A.1.2

Size Document Number 1

REV 1

Date: February 19, 1994 Sheet of



Ajuste de parâmetros de controle

P' = P1 Prop. Refer.

P = Rp* Proporcional

I = Ri* Integral

D = Rd* Diferencial

P4 Limite saída em soquetes

SW PID - L/D Integrador

IFQSC - DFCM (Lab. MBE)

Esquema do circuito de controle tipo PID

Title

A.1.3

Size Document Number

A

1

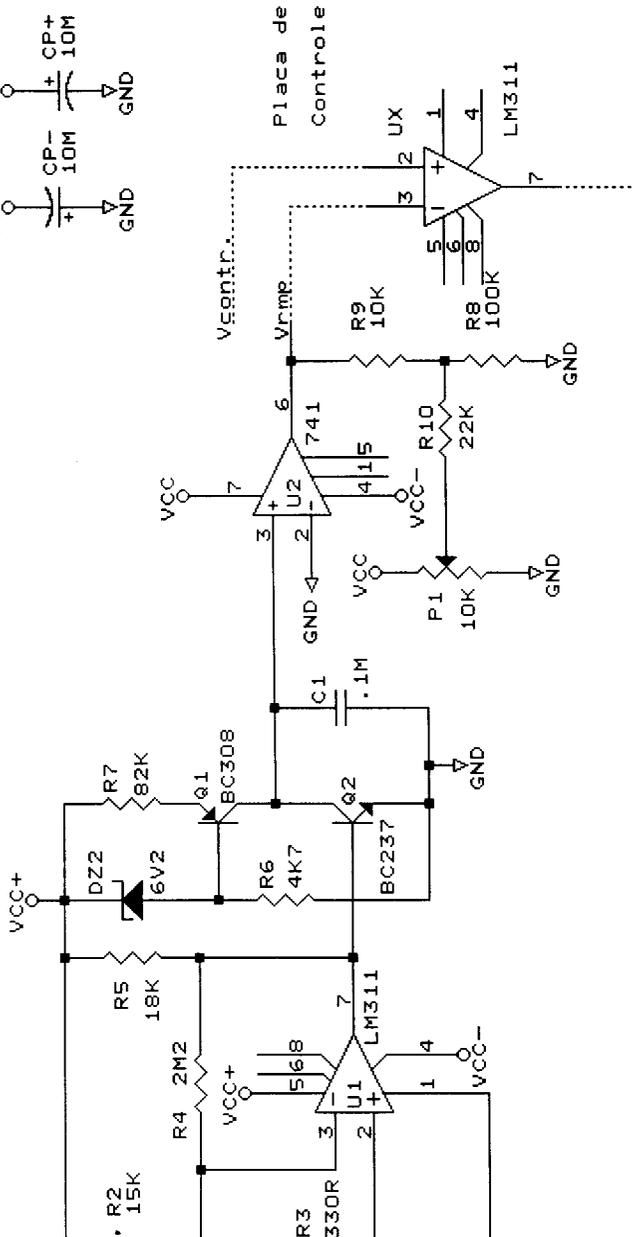
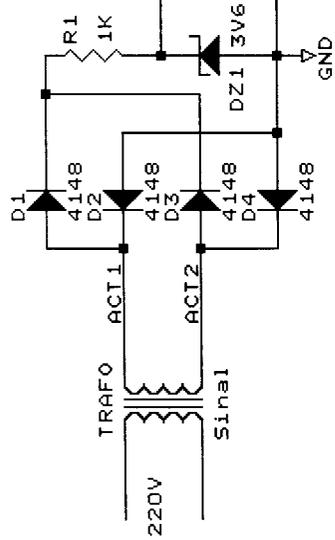
Date: February 19, 1994 Sheet of

REV

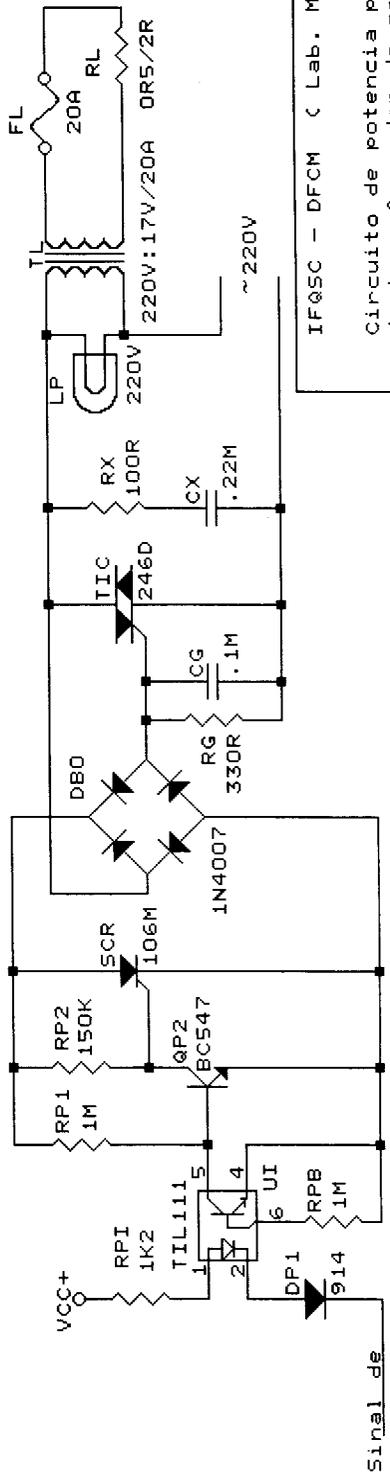
1

Gerador de rampa

sincronizada com a rede



Circuito de potencia



RX e CX = filtros p/ protecao do TRIAC

Sinal de controle PWM

Sinal de controle PWM
(Vout do circ. de controle)

IFQSC - DFCM (Lab. MBE)

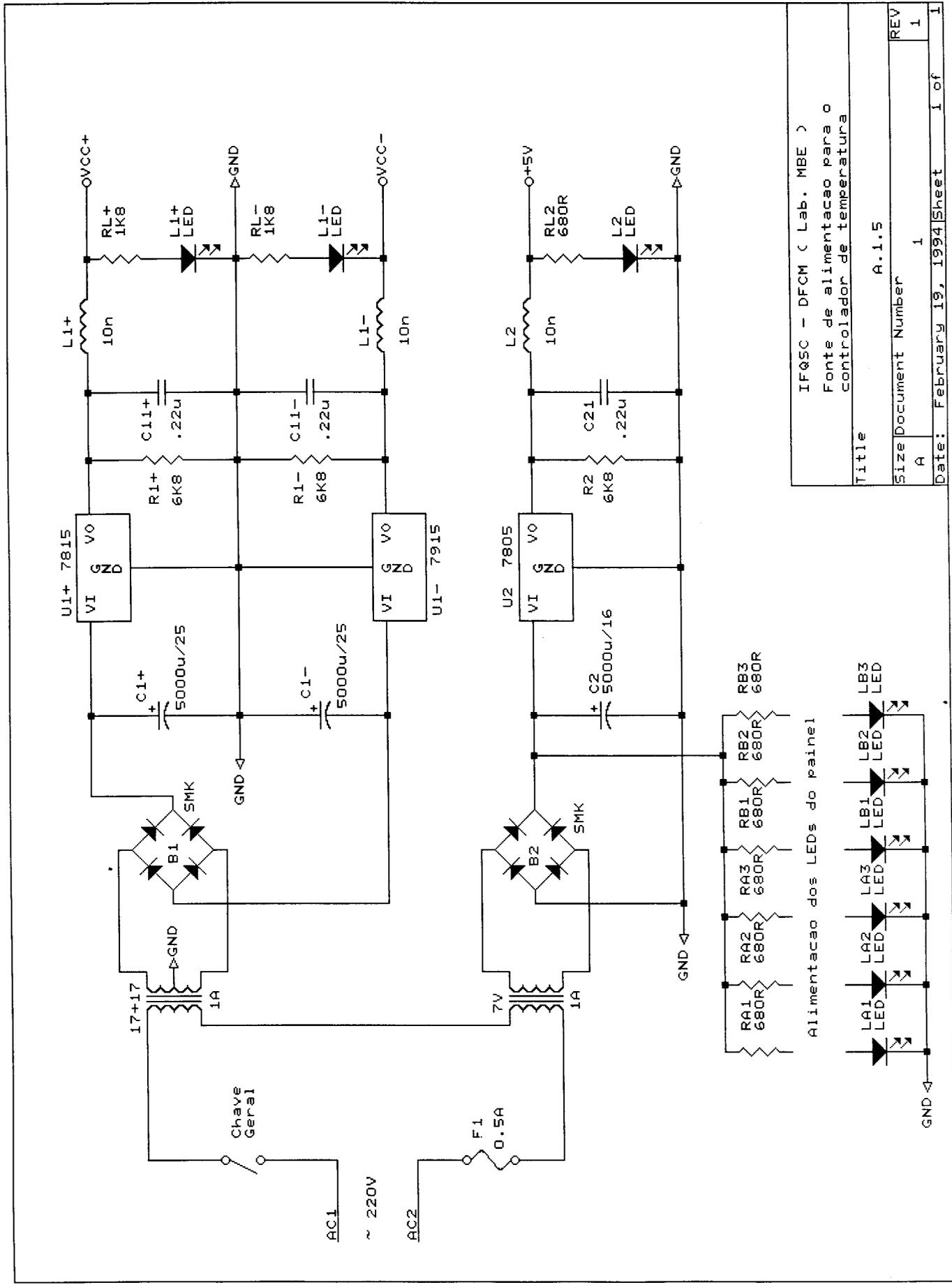
Circuito de potencia para chaveamento do transformador de carga das celulas de efusao e do substrato

Title

Size Document Number A 1

Date: February 19, 1994 Sheet 1 of 1

REV 1

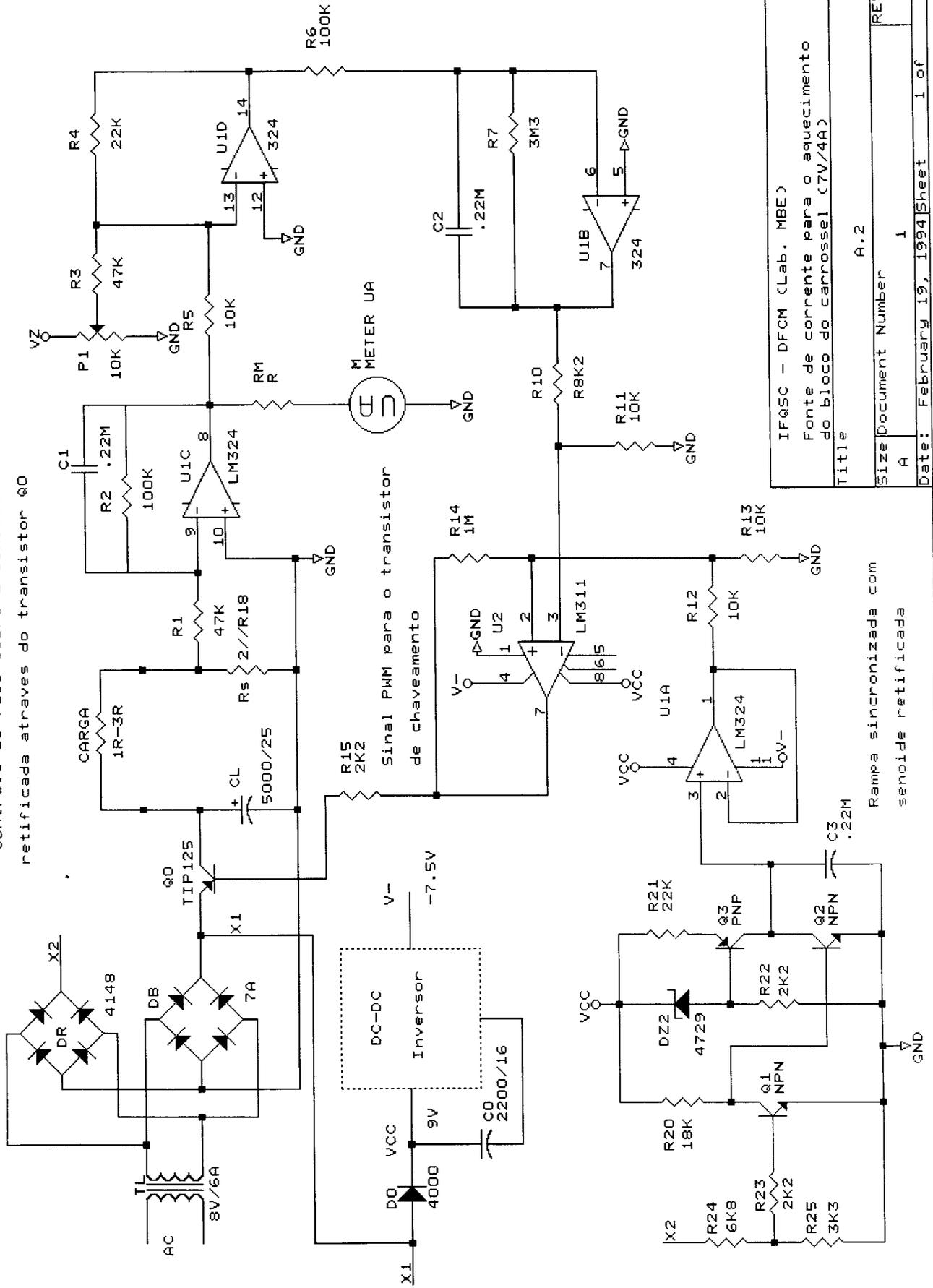


Alimentacao dos LEDs do painel

IFQSC - DFCM (Lab. MBE)
 Fonte de alimentacao para o
 controlador de temperatura

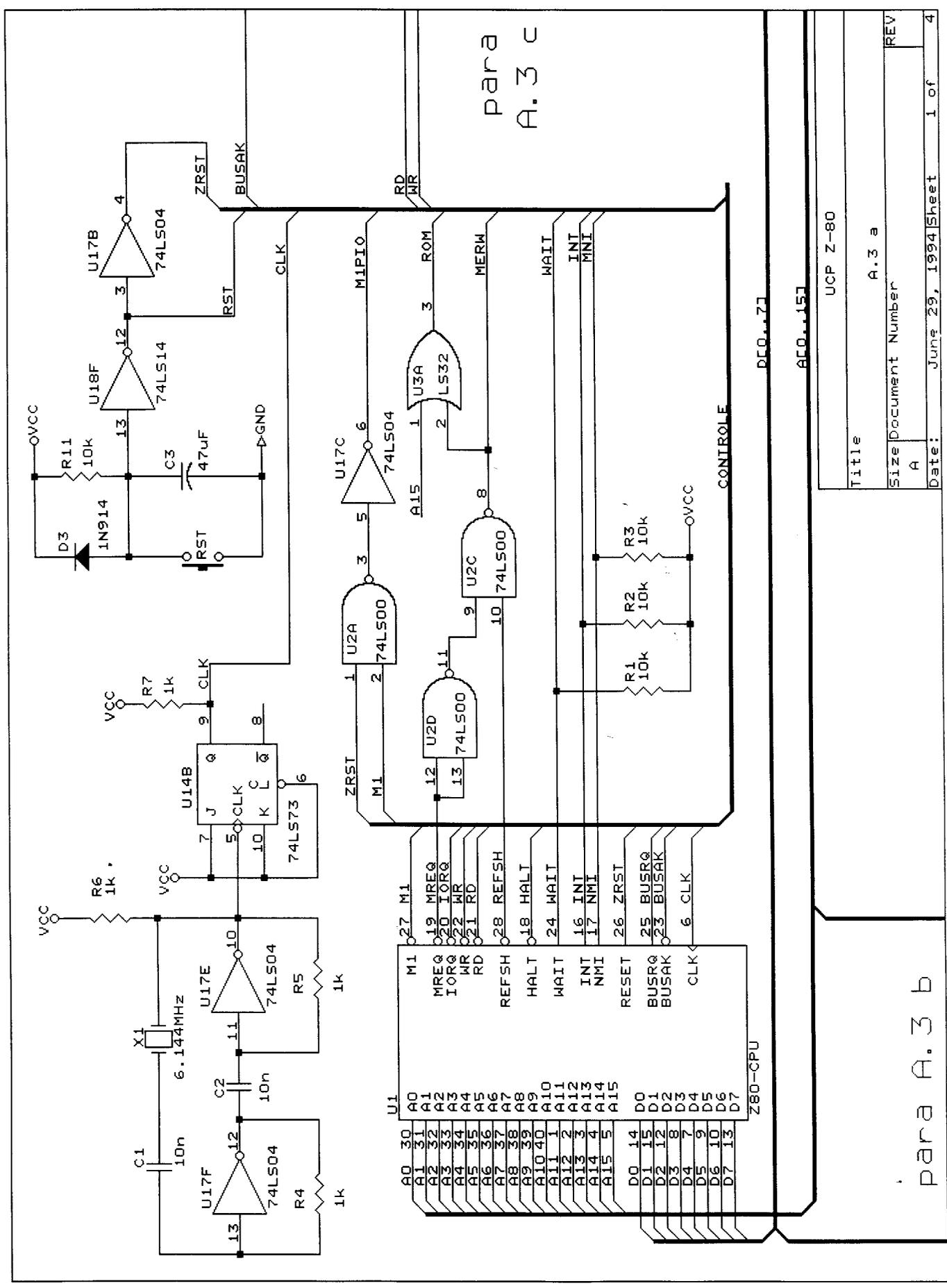
Title	A.1.5
Size	A
Document Number	1
REV	1
Date:	February 19, 1994
Sheet	1 of 1

Controle de fase sobre a senoide
retificada atraves do transistor Q0



IF05C - DFCM (Lab. MBE)
Fonte de corrente para o aquecimento
do bloco do carrossel (7V/4A)
Title
Size Document Number A.2
REV 1
Date: February 19, 1994 Sheet 1 of 1

Rampa sincronizada com
senoide retificada



para
A.3 a

para A.3 b

DCO...71

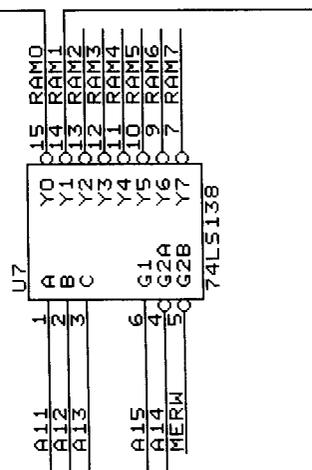
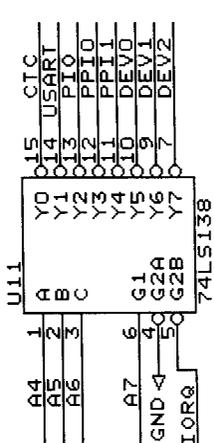
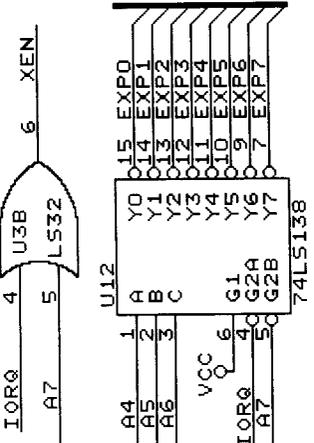
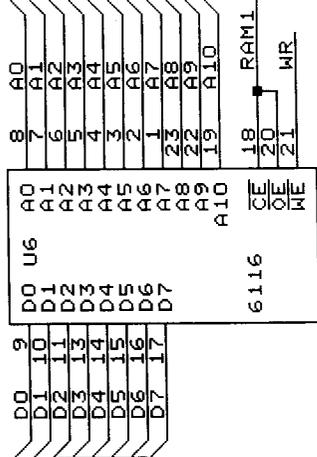
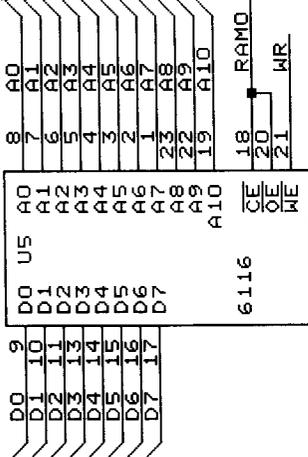
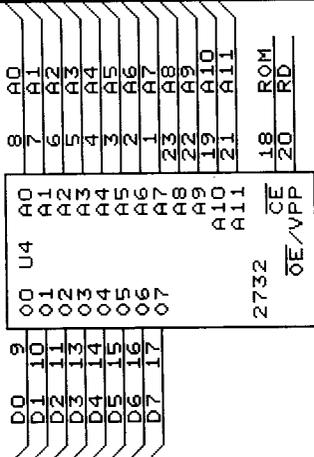
AC0...151

UCP Z-80	
Title	A.3 a
Size	A
Document Number	REV
Date:	June 29, 1994 Sheet 1 of 4

para A.3 a

DC0...73

AC0...153

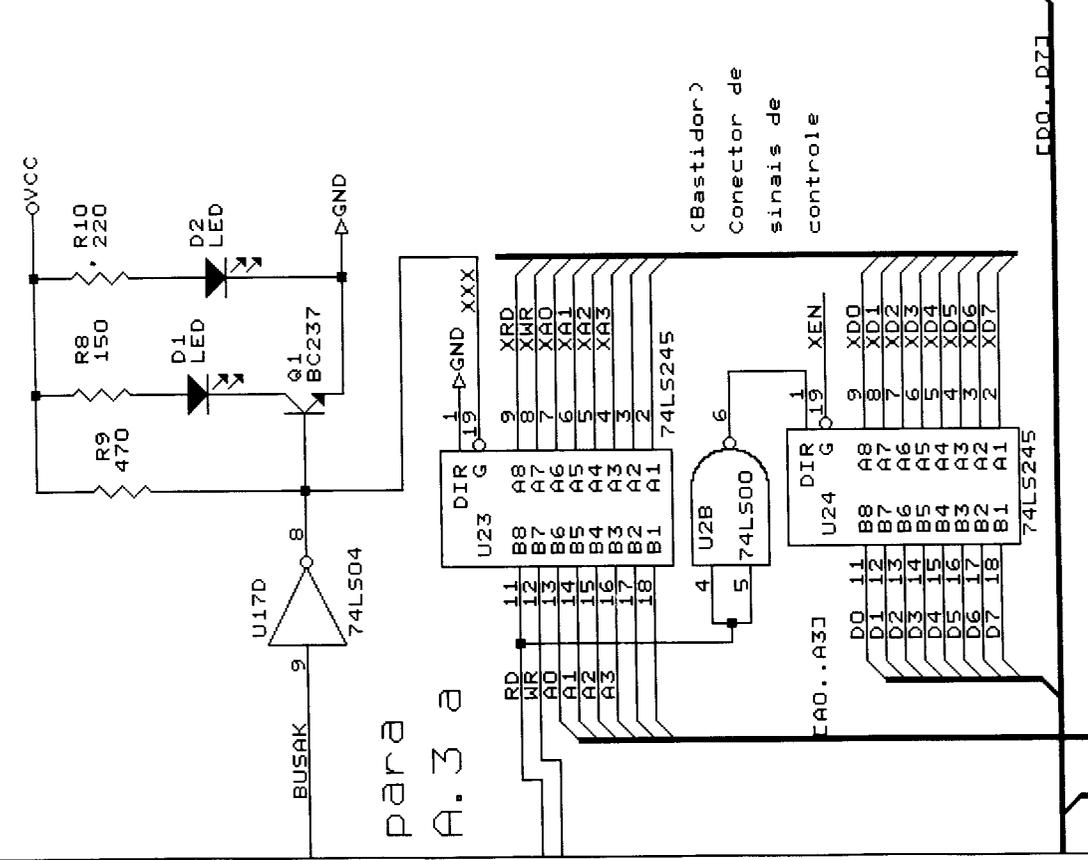
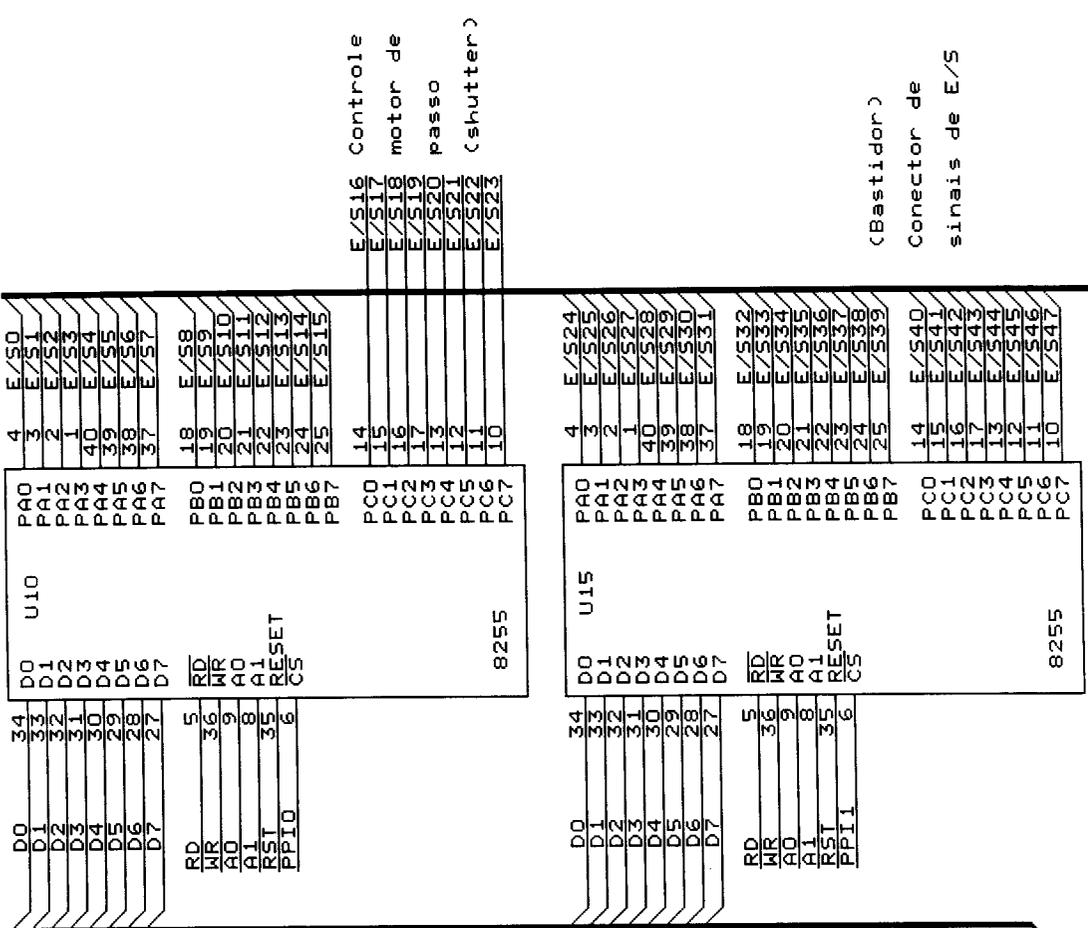


Expansao externa
 EXPn (00H a 7FH)
 (Conector de sinais de
 controle do bastidor)

Internal I/O
 devices
 (80H A FFH)

Memoria RAM
 2 Kbytes cada
 inicio - 8000H

Title		UCP Z-80
Size Document Number		A.3 b
Date:		June 29, 1994
Sheet		2 of 4
REV		



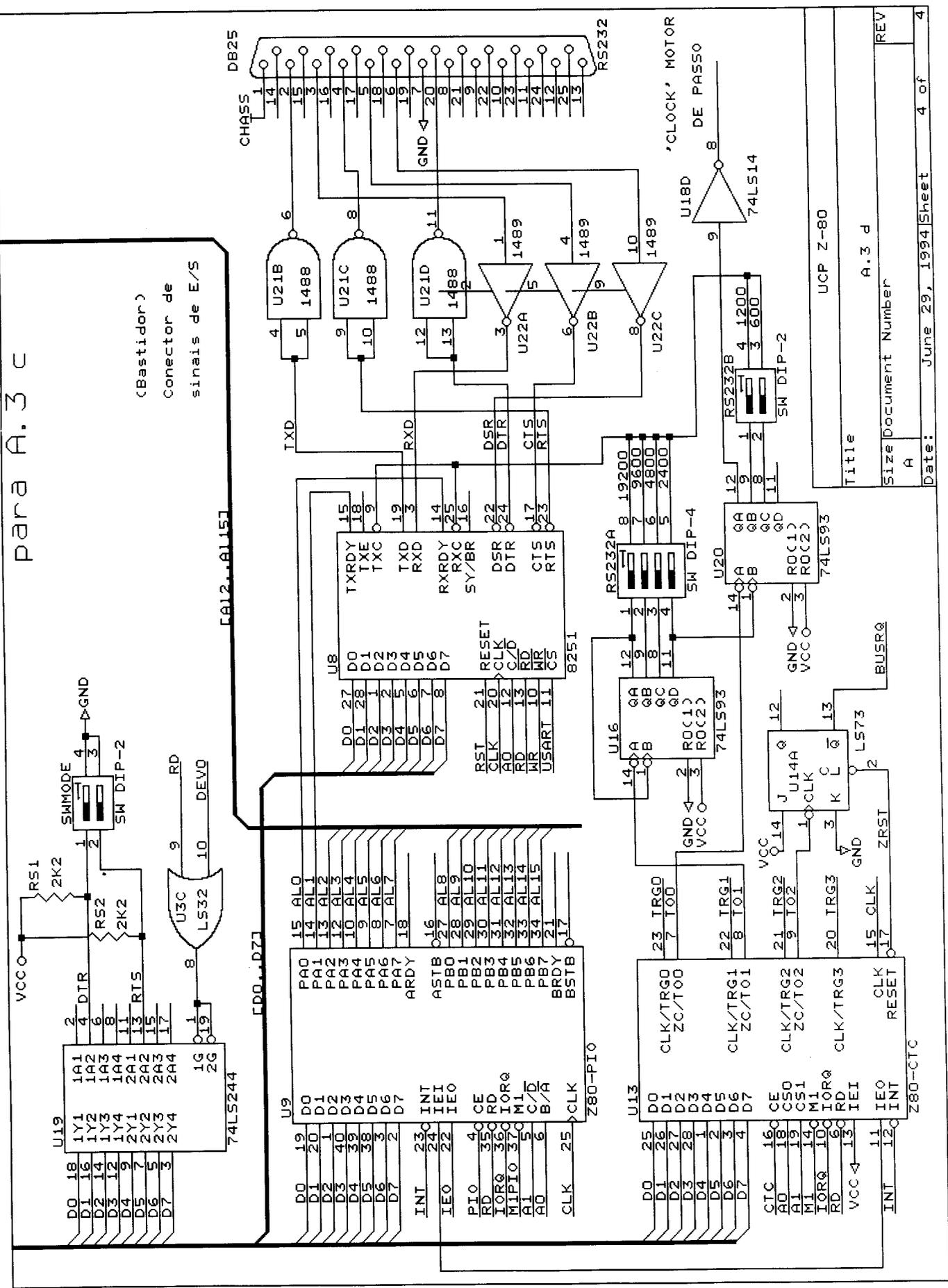
para A.3 a

Title		UCP Z-80
Size		A.3 c
Document Number		A
Date:	June 29, 1994	Sheet 4 of 4
REV		

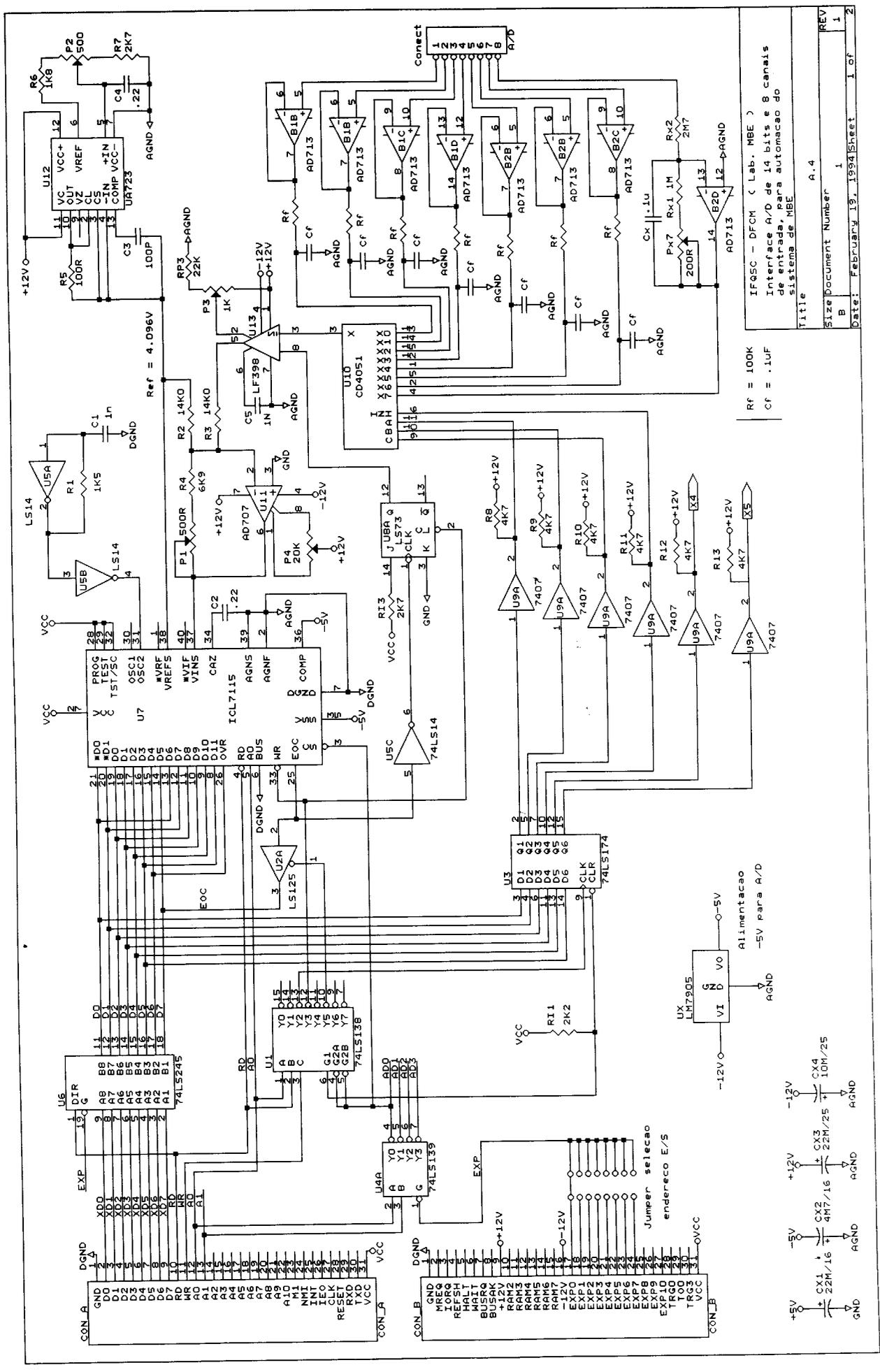
para A.3 d

para A.3 c

(Bastidor)
Conector de
sinais de E/S



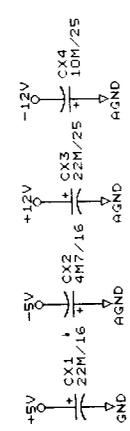
Title	UCP Z-80
Size Document Number	A.3 d
Date:	June 29, 1994
Sheet	4 of 4
REV	

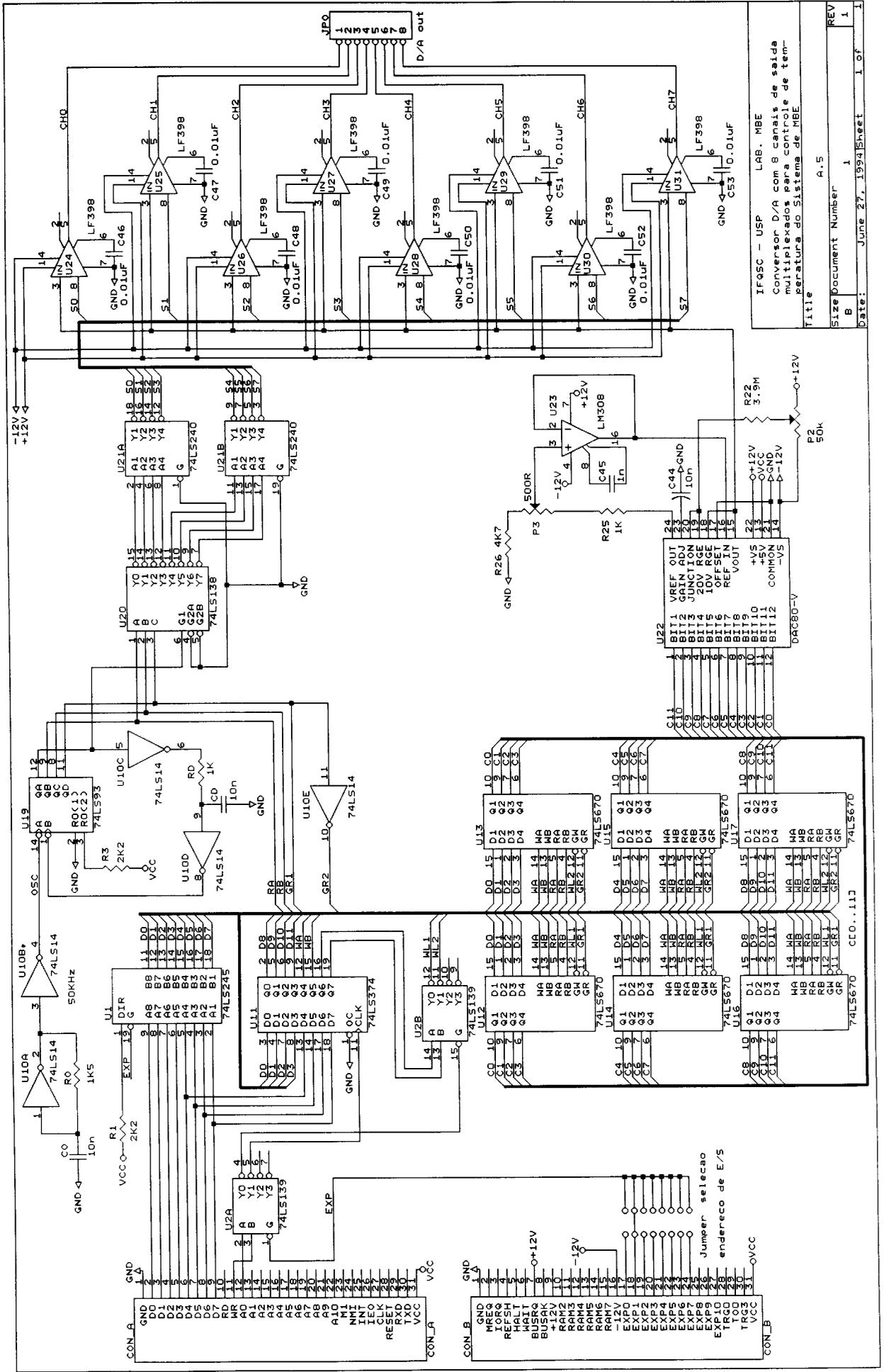


IFQ5C - DFCM (Lab. MBE)
 Interface A/D de 14 bits e 8 canais
 de entrada, para automacao do
 sistema de MBE

Title
 Size Document Number A.4
 B 1
 Date: February 13, 1994 Sheet 1 of 2

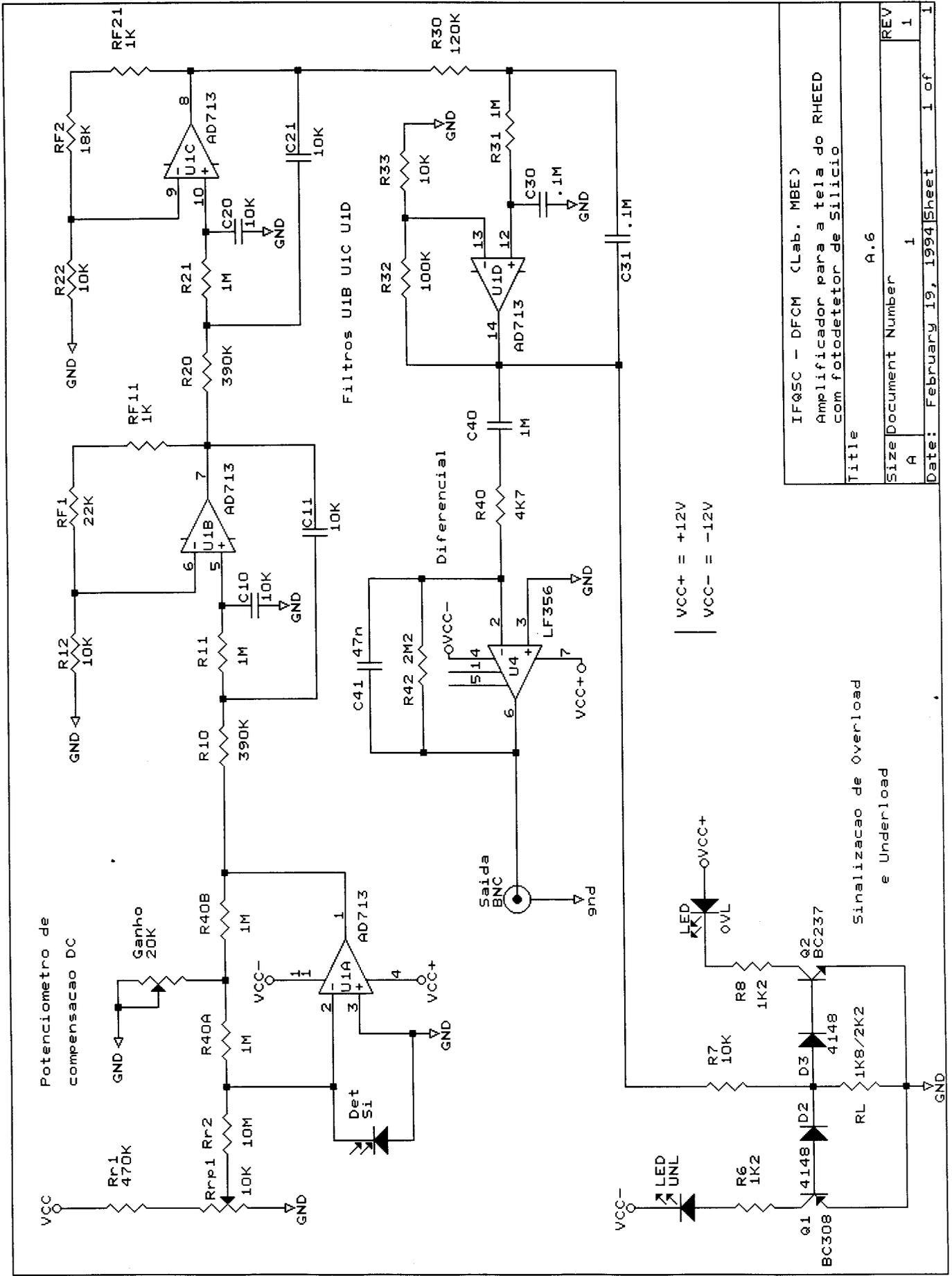
Rf = 100K
 Cf = .1uF





IF95C - USP LAB. MBE
 Conversor D/A com 8 canais de saída
 multiplexados para controle de tem-
 peratura do Sistema de MBE

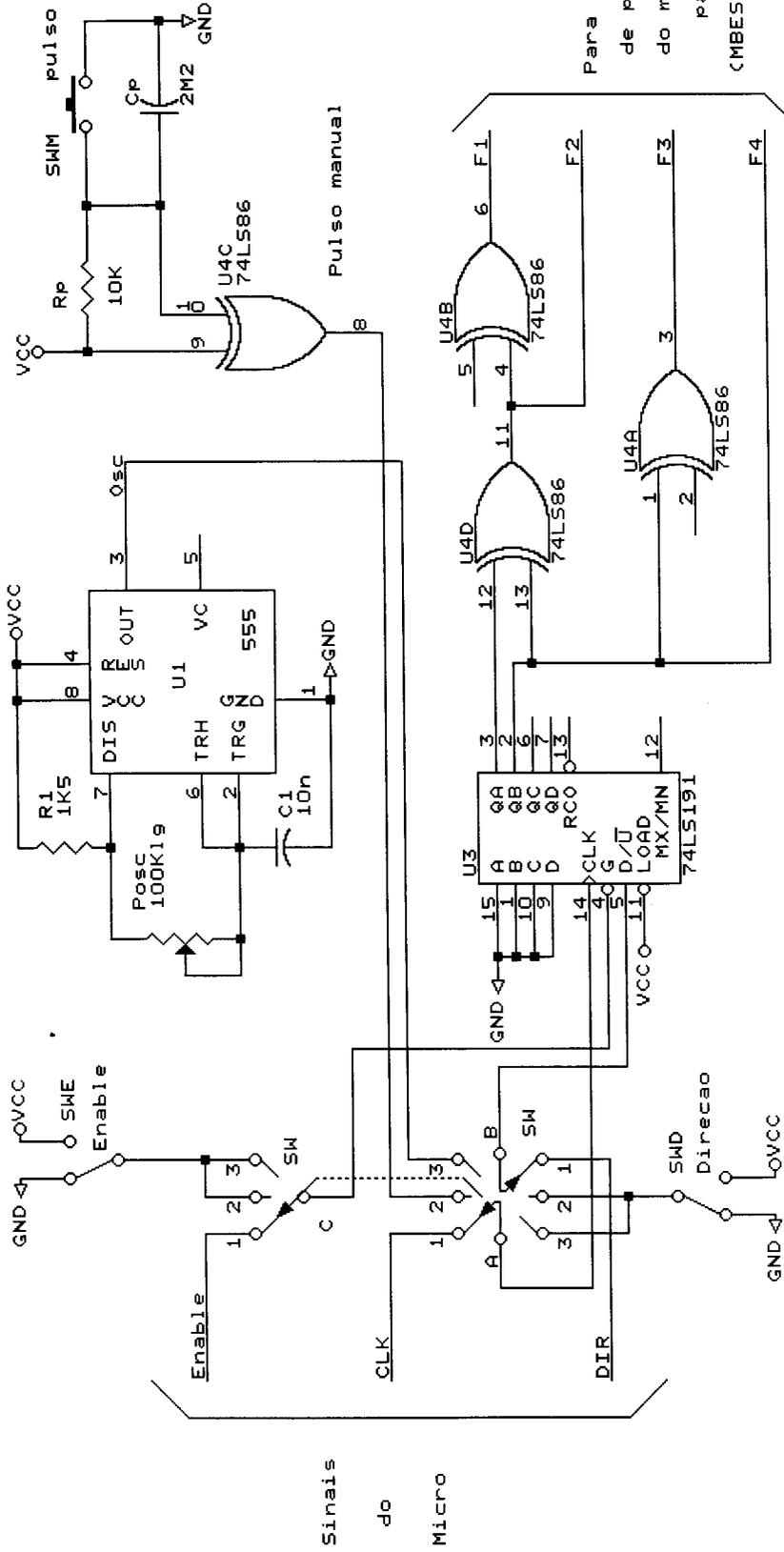
Title _____
 Size Document Number A.5
 B 1
 Date: June 27, 1994 Sheet 1 of 1
 REV 1



IFQSC - DFCM (Lab. MBE)
 Amplificador para a tela do RHEED
 com fotodetector de Silício

Title	A.6
Size	1
Document Number	1
REV	1
Date:	February 19, 1994
Sheet	1 of 1

Sinalização de Overload
 e Underload



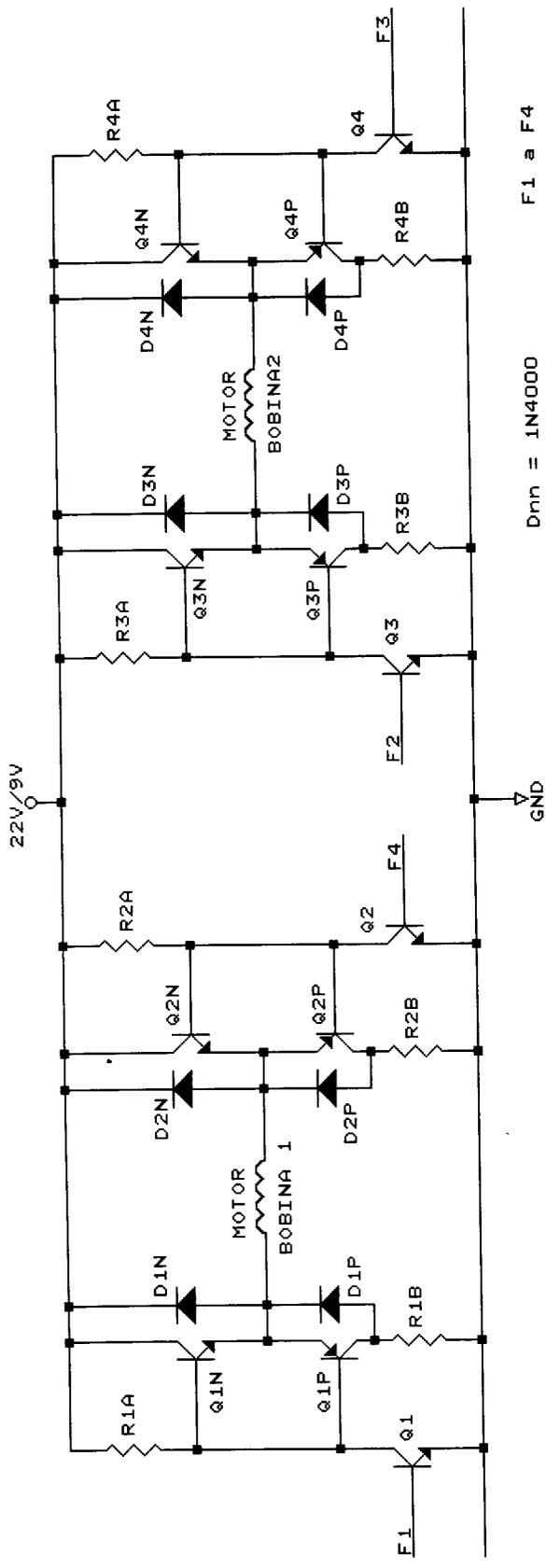
Para circuito de potencia do motor de passo (MBESHUT2.5CH)

SW Selecao de modo de operacao
 1 - micro
 2 - pulso
 3 - osc

U5 7805 Para alimentacao do circuito TTL
 R5 24V (Fonte ou Baterias) 100R/SW
 VI GND
 VO OVCC (5V)

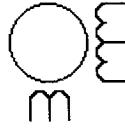
IFQSC - DFCM (Lab. MBE)
 Circuito de controle de motor de passo

Title	A.7.1
Size	A
Document Number	REV 1
Date:	February 19, 1994 Sheet 1 of 2

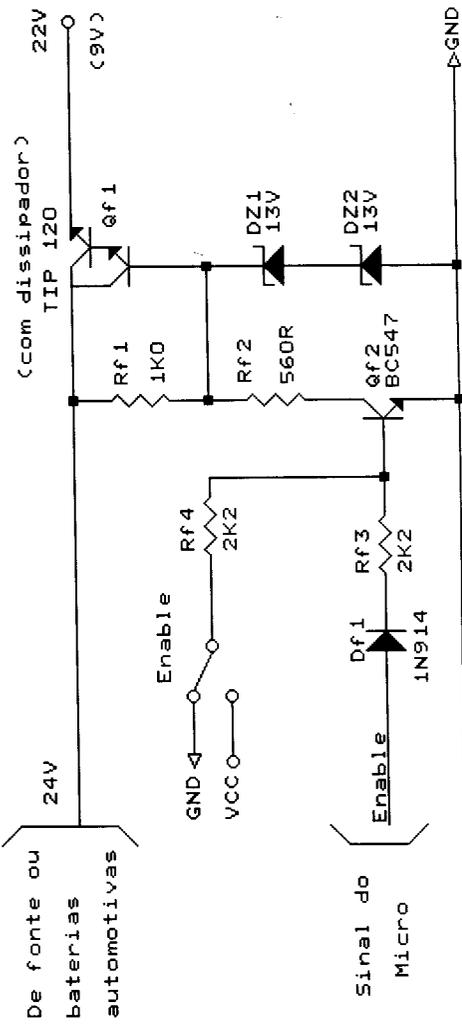


F1 a F4
do circuito
de controle
(MBESHUT1.5CH)

- Dnn = 1N4000
- RnA = 680R
- RnB = 2R2
- QnN = TIP120
- QnP = TIP125
- Qn = BC237



Motor SYNCRO de
4 fases Híbrido



De fonte ou
baterias
automotivas

Sinal do
Micro

IFQ5C - DFCM (Lab. MBE)
Circuito de potencia para
motor de passo bipolar e
controle de alimentacao do motor

Title

A.7.2

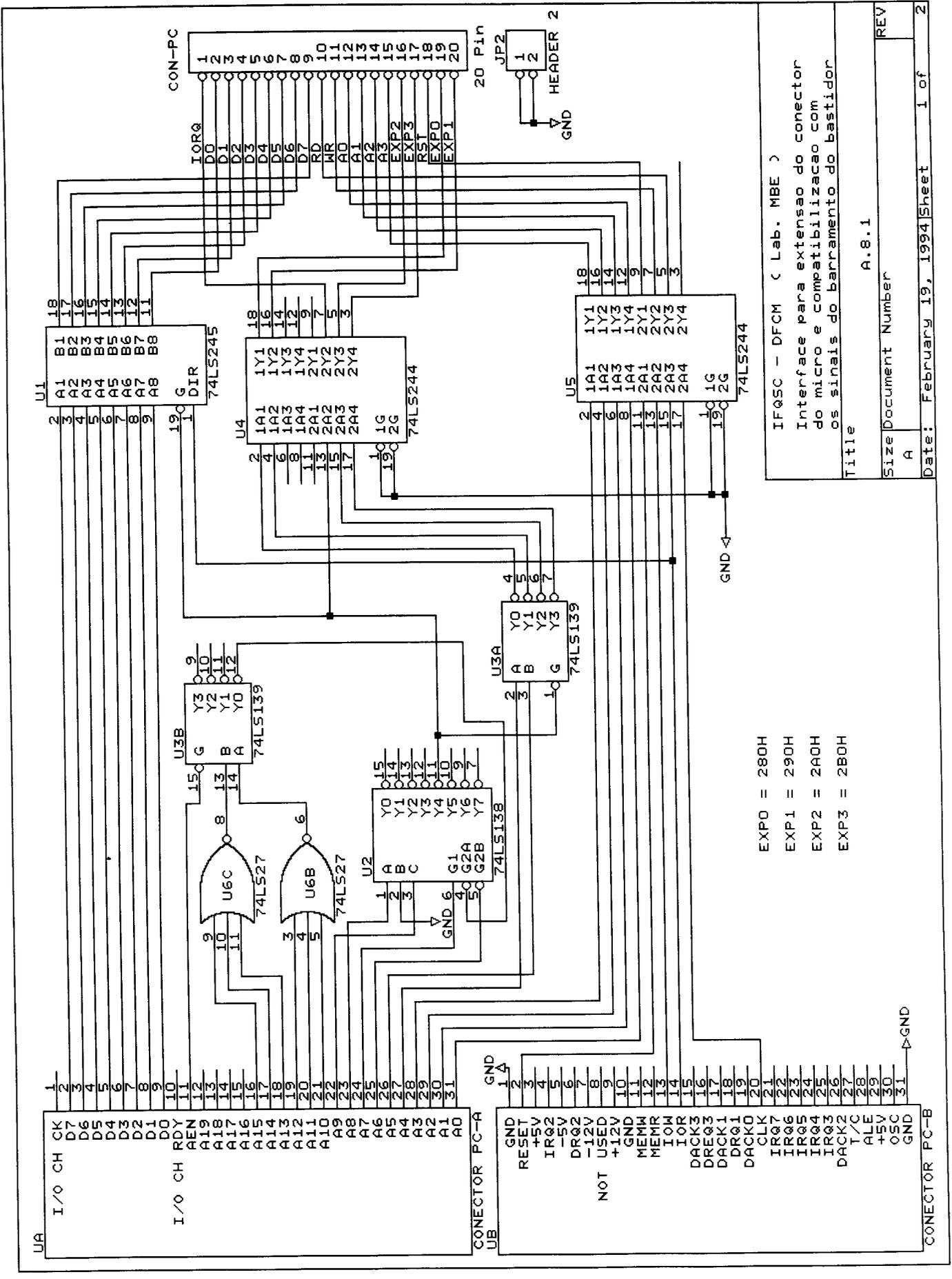
Size Document Number

A

Date: February 19, 1994 Sheet 2 of 2

REV

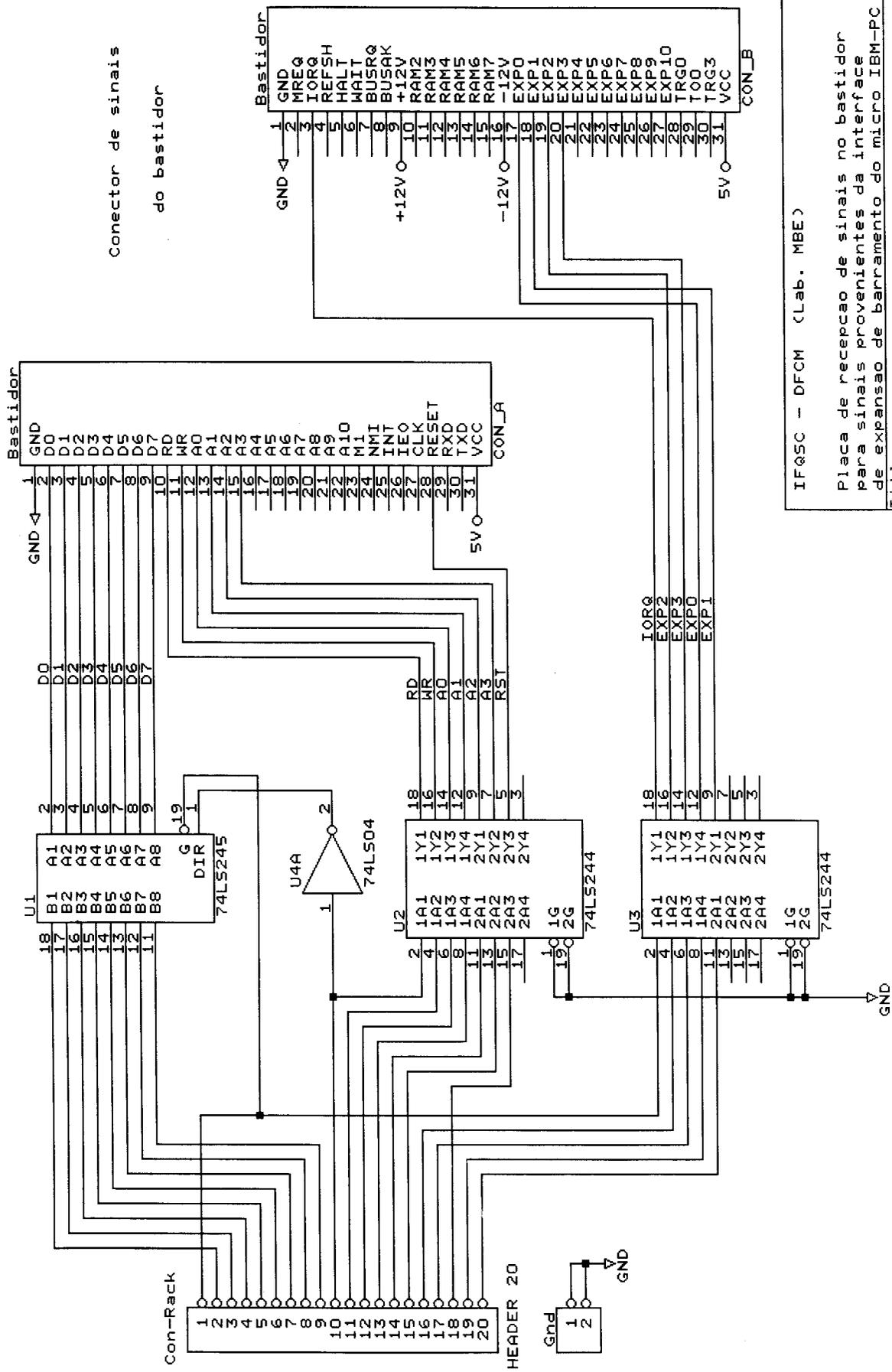
2



IFQSC - DFCM (Lab. MBE)
 Interface para extensao do conector
 do micro e compatibilizacao com
 os sinais do barramento do bastidor

EXPO = 280H
 EXP1 = 290H
 EXP2 = 2A0H
 EXP3 = 2B0H

Title	A.8.1
Size	A
Document Number	
REV	
Date:	February 19, 1994
Sheet	1 of 2



Conector de sinais
do bastidor

- Bastidor
- 1 GND
 - 2 MREQ
 - 3 IORQ
 - 4 REFUSH
 - 5 HALT
 - 6 WAIT
 - 7 BUSRQ
 - 8 BUSAK
 - 9 +12V
 - 10 RAM2
 - 11 RAM3
 - 12 RAM4
 - 13 RAM5
 - 14 RAM6
 - 15 RAM7
 - 16 -12V
 - 17 EXPO
 - 18 EXP1
 - 19 EXP2
 - 20 EXP3
 - 21 EXP4
 - 22 EXP5
 - 23 EXP6
 - 24 EXP7
 - 25 EXP8
 - 26 EXP9
 - 27 EXP10
 - 28 TRG0
 - 29 T00
 - 30 TRG3
 - 31 VCC
- CON_B

- Bastidor
- 1 GND
 - 2 D0
 - 3 D1
 - 4 D2
 - 5 D3
 - 6 D4
 - 7 D5
 - 8 D6
 - 9 D7
 - 10 RD
 - 11 MR
 - 12 A0
 - 13 A1
 - 14 A2
 - 15 A3
 - 16 A4
 - 17 A5
 - 18 A6
 - 19 A7
 - 20 A8
 - 21 A9
 - 22 A10
 - 23 NMI
 - 24 INT
 - 25 IEO
 - 26 CLK
 - 27 RESET
 - 28 RXD
 - 29 TXD
 - 30 VCC
 - 31 VCC
- CON_A

IFQSC - DFCM (Lab. MBE)

Placa de rececao de sinais no bastidor
para sinais provenientes da interface
de expansao de barramento do micro IBM-PC

Title

A.8.2

Size Document Number

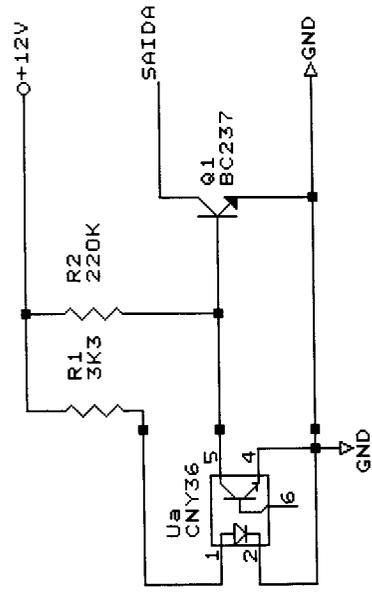
1

REV

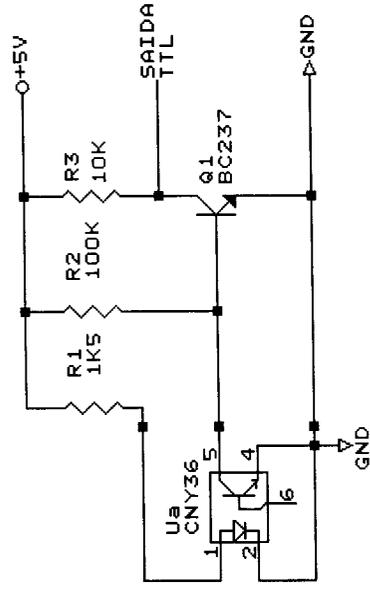
1

Date: February 19, 1994 Sheet 2 of 2

12 Volts



5 Volts



Sensor com acoplador otico

IFQSC - DFCM USP (Lab. MBE)
SENSOR OTICO P/ SINAIS DIGITAIS
- shutters
- bombas ionicas

Title		A.9
Size		Document Number
A	1	REV
Date:		February 19, 1994
Sheet		1 of 1

Apêndice B

IFQSC - DFCM (Lab MBE)

Rotinas de inicializacao e atendimento de interrupcoes
do controlador programavel UCP Z-80 para monitoracao e
controle do sistema de MBE, gravada em EPROM

MONIROM.ASM

Rotinas:

.begin : inicializacao da UCP
WATCH_ : atend. interrupcao do Z80-CTC
PIOINT : atend. interrupcao do Z80-PIO
RXRDY_ : interrup. recepcao de dados serial
TXRDY_ : interrup. transmissao " "
NADA_ : atend. de interrup. nao implementadas

DECLARACAO DE CONSTANTES:

stksize EQU 1024 ;Tamanho da pilha.
LF EQU 0AH ;Carriage Return.
CR EQU 0DH ;Line feed.
EPROM EQU 4*1024 ;Tamanho da EPROM da placa.
;
; Endereco dos perifericos internos
TIMER0 EQU 16*8 ;Ender. canal 0 do Z80-CTC (U13).
TIMER1 EQU TIMER0+1 ;Ender. canal 1 do Z80-CTC (U13).
TIMER2 EQU TIMER0+2 ;Ender. canal 2 do Z80-CTC (U13).
TIMER3 EQU TIMER0+3 ;Ender. canal 3 do Z80-CTC (U13).
;
USARTD EQU 16*9 ;Ender. dados da USART 8251 (U8).
USARTC EQU USARTD+1 ;Ender. controle da USART 8251 (U8).
;
PIOADT EQU 16*10 ;Ender. dados porto A, Z80-PIO (U9).
PIOBDT EQU PIOADT+1 ;Ender. dados porto B, Z80-PIO (U9).
PIOACT EQU PIOADT+2 ;Ender. controle porto A Z80-PIO (U9).
PIOBCT EQU PIOADT+3 ;Ender. controle porto B Z80-PIO (U9).
;
PPI0A EQU 16*11 ;Ender. porto A 8255 (U10).
PPI0B EQU PPI0A+1 ;Ender. porto B 8255 (U10).
PPI0C EQU PPI0A+2 ;Ender. porto C 8255 (U10).
PPI0CTEQU PPI0A+3 ;Ender. controle da 8255 (U10).
;
PPI1A EQU 16*12 ;Ender. porto A 8255 (U15).
PPI1B EQU PPI1A+1 ;Ender. porto B 8255 (U15).
PPI1C EQU PPI1A+2 ;Ender. porto C 8255 (U15).
PPI1CTEQU PPI1A+3 ;Ender. controle da 8255 (U15).
;
DEV0 EQU 16*13 ;Jumper de modo da serial (DTR/RTS)
DEV1 EQU 16*14 ;Dispos. saida para FLAG de erro
DEV2 EQU 16*15 ;Nao utilizado
;
ADCX EQU 16*0 ; Ender. da placa A/D
DACX EQU 16*1 ; Ender. da placa D/A

```

===== Decl. variaveis =====
public USARTC, USARTD, ADCX, DACX, PPI0CT, TIMERO

;
;
bss    stack,stksize ;Reserva 'stksize' bytes para pilha
;
;
extrn  main_
; Areas de programas e dados inicializados e nao inicializados
extrn  _Corg_, _Cend_, _Dorg_, _Dend_, _Uorg_, _Uend_
; Area dos pseudoregistradores para passagem de
; parametros do tipo long.
public Inprm, Intmp, Insec
bss    Inprm,4        ;Pseudoregistrador primario.
bss    Intmp,4        ;Pseudoregistrador temporario.
bss    Insec,4        ;Pseudoregistrador secundario.
;
; Variaveis globais do sistema:
global sbot_,2        ;Contem o endereco final da RAM.
global ermo_,2
;
;
cseg   ; Inicio da area de programa
===== Interrup. =====
; Pontos de entrada das interrupcoes RST 08H a RST 38H
;
;
DS     5
EXTRN RST08DES_
JP     RST08DES_
DS     5
EXTRN RST10DES_
JP     RST10DES_
DS     5
EXTRN RST18DES_
JP     RST18DES_
DS     5
EXTRN RST20DES_
JP     RST20DES_
DS     5
EXTRN RST28DES_
JP     RST28DES_
DS     5
EXTRN RST30DES_
JP     RST30DES_
DS     5
EXTRN RST38DES_
JP     RST38DES_
;
===== .begin =====
;
; Rotina de inicializacao da UCP Z-80
;
public .begin
;
; .begin:
DI                ;Desabilita atendimento de interrupcao.
LD SP,stack+stksize ;Posicionamento da pilha.
IM 2              ;Modo 2 de interrupcao
LD A,03H          ;Reseta e desabilita
OUT (TIMER0),A    ; as interrupcoes de
OUT (TIMER1),A    ; todos os canais

```

```

OUT (TIMER2),A          ; do CTC.
OUT (TIMER3),A          ;
LD A,_Dorg_/256 ;Determina a pagina da tabela de
LD I,A ; interrupcoes no inicio da RAM
----- .begin ---
; Inicializacao da porta A da PIO:
;
EXTRN PIOAVET_
;
LD A,PIOAVET_           ;Carregamento do vetor
OUT (PIOACT),A          ; de interrupcao.
LD A,0FFH               ;Seleciona
OUT (PIOACT),A          ; modo 3.
LD A,0FFH               ;Seleciona todos
OUT (PIOACT),A          ; sinais como entrada.
LD A,00110111B          ;Inibe interr., seleciona
OUT (PIOACT),A          ; modo OU ativado em nivel alto
LD A,0FCH               ;Seleciona alarmes 0 e 1 da
OUT (PIOACT),A          ; porta para serem monitorados
JP PIOBINIT
----- .begin ---
; Ponto de entrada da interrup. nao mascaravel NMI: 0066H
;
EXTRN NMIDES_
JP NMIDES_
----- .begin ---
; Inicializacao da porta B da PIO.
;
EXTRN PIOBVET_
PIOBINIT:
LD A,PIOBVET_           ;Carregamento do vetor
OUT (PIOBCT),A          ; de interrupcao.
LD A,0FFH               ;Seleciona
OUT (PIOBCT),A          ; modo 3.
LD A,0FFH               ;Seleciona todos
OUT (PIOBCT),A          ; sinais como entrada.
LD A,00110111B          ;Inibe interr., seleciona
OUT (PIOBCT),A          ; modo OU ativado em nivel alto
LD A,0FFH               ;Des-Habilita a monitoracao
OUT (PIOBCT),A          ; de todos os alarmes da porta
----- .begin ---
; . Rotina de teste das RAM:
;
LD HL,_Dorg_ ;HL = endereco inicial da RAM.
DENOVO: LD B,(HL) ;Obtem o dado da memoria.
LD (HL),55H ;Grava na memoria o padrao de teste.
LD A,0AAH ;Acumulador = complemento do padrao
LD A,(HL) ;Obtem o dado gravado.
LD (HL),B ;Restaura o dado original.
INC HL ;Aponta para o proximo endereco.
CP 55H ;Verifica se o dado
JR Z,DENOVO ; foi gravado corretamente.
DEC HL
LD (sbot_),HL ;Armazena a quantidade de memoria.
;

```

```

; Transferencia dos dados inicializados da EPROM para RAM:
LD HL,_Cend_
LD DE,_Dorg_
LD BC,_Dend_-_Dorg_
LD A,H
CP D
JR NZ,MOVADADO
LD A,L
CP E
JR Z,RSBAUD
MOVADADO:
LDIR
;----- .begin ---
; Inicializa o canal 1 do CTC, definindo TxCRxCR
; (cristal de 6.144MHz e clock de 3.072MHz)/16/05 = 38400
RSBAUD: LD A,00000111B ;Programa a palavra
OUT (TIMER1),A ; de controle do CTC (CLK/16)
LD A,05 ;Carrega o registrador de
OUT (TIMER1),A ; constante de tempo do CTC.
;----- .begin ---
; Inicializacao da USART 8251 com os seguintes parametros:
;
; 1 STOP bit, paridade PAR (even),
; 7 bits de dados, baud rate = TxCR x 1
; Ver dip switch = 1200 / 2400 / 4800 / 9600 / 19200 baud
EXTRN RSMOD_
RSMODE:
LD A,01111001B ;Carrega a palavra
OUT (USARTC),A ; de instrucao de MODO.
IN A,(DEV0) ;Le jumper de modo de operacao (RTS/DTR)
AND 00100010B ;
LD (RSMOD_),A ; e grava em RSMOD_
OR 00010000B ; ativa Reset flag
OUT (USARTC),A ; Envia instrucao de COMANDO.
;
LD A,80H ; Programacao da PPI0 - todos os
OUT (PPIOCT),A ; portos como saida
OR 0FFH ; Porto C controla a direcao e habilit.
OUT (PPIOC),A ; dos shutters - todos desabilitados
;----- .begin ---
; Inicializacao do cao de guarda (watch-dog timer)
EXTRN CTCVET_
LD A,CTCVET_ ;Carrega o vetor de
OUT (TIMER0),A ; interrupcoes do Z80-CTC.
;
; Inicializa o canal 2 do CTC com periodo de 15ms.
LD A,00100111B ;Programa a palavra
OUT (TIMER2),A ; de controle do CTC.
LD A,180 ;Carrega o registrador de
OUT (TIMER2),A ; constante de tempo do CTC
;

```

```
; Inicializa o canal 3 do CTC com periodo de 10ms.
LD A,10100111B ;Programa a palavra
OUT (TIMER3),A ; de controle do CTC.
LD A,120 ;Carrega o registrador de
OUT (TIMER3),A ; constante de tempo do CTC
;
; Prepara TIMER0 para velocidade dos pulsos para 'shutter'
LD A,27H ; determinada pela constante
OUT (TIMER0),A ; de tempo do 'timer0'
;
LD A,83H ;Habilita a geracao de interrupcoes
OUT (PIOACT),A ; pelas portas A e B da PIO.
OUT (PIOBCT),A
EI ;Habilita o atendimento de interrupcao.
JP main_ ;Desvia para o programa principal em C.
```

===== WATCH DOG =====

Rotina de atendimento de interrupcao do Z80-CTC
Relogio Cao de Guarda (Watch Dog Timer)

PUBLIC WATCH_
EXTRN TIMFLAG_, DIAFLAG_

WATCH_:

```
DI
PUSH AF ;Salva todos os
PUSH BC ; registradores
PUSH DE ; de uso geral.
PUSH HL
PUSH IX
PUSH IY
```

----- WATCH DOG ---

Atualiza relógio da UCP

```
LD HL,TIMFLAG_ ;Obtem o end. do contador de tempo.
LD C,(HL) ; Obtem o valor do
INC HL ; contador de tempo
LD E,(HL)
INC HL ; Reg. DE e C
LD D,(HL)
LD A,01 ;Incrementa o
ADD A,C ; contador
LD C,A
JR NC,CONT ;
INC DE ;
CONT: LD HL,83D5H ;
OR A ; Verifica se ultrapassou
SBC HL,DE ; um dia de contagem
JR NC,NODIA ;
XOR A ;
LD C,A ; Zera contador
LD E,A ; e
LD D,A ;
LD HL,DIAFLAG_ ; incrementa dia
INC (HL) ;
NODIA: LD HL,TIMFLAG_ ;Atualiza o
LD (HL),C ; valor da
INC HL ; contagem.
LD (HL),E ;
INC HL ;
LD (HL),D ;
```

----- WATCH DOG ---

Verificacao da memoria RAM:

EXTRN RAMTST_, SYSFLG_, ADRAM_

```
LD HL,(RAMTST_) ;Toma HL o ponteiro de teste da RAM
LD B,(HL) ;Salva o dado da memoria.
```

```

LD (HL),0AAH ;
LD A,55H ; Grava e le padrao de teste
LD A,(HL) ;
LD (HL),B ;Restaura o valor original.
CP 0AAH ;Compara o padrao de teste
JR Z,RAMSEG ; Se correto, segue.
LD A,(SYSFLG_) ; Se nao,
OR 01H ; seta flag de erro de RAM (bit 0)
LD (SYSFLG_),A ; na variavel flag de sistema
LD (ADRAM_),HL ; Guarda endereco falho de RAM
OUT (DEV1),A ; Envia sinal de erro no porto de saida
RAMSEG: INC HL ;Incrementa o ponteiro
LD (RAMTST_),HL ; e atualiza na memoria
LD BC,(sbot_) ;Obtem a quantidade de memoria RAM.
OR A ;Zera o flag carry.
SBC HL,BC ;Se toda a RAM
JR C,PROSG ; foi verificada,
LD DE,_Dorg_ ; carrega o ponteiro
LD (RAMTST_),DE ; no inicio da RAM

```

----- WATCH DOG -----

Teste da memoria EPROM:

EXTRN ROMTST_, CHEKSUM_

PROSG:

```

LD HL,(ROMTST_) ;DE contem o dado
LD E,(HL) ; da EPROM a ser somado.
LD D,0 ;
INC HL ;HL = proximo end. teste da EPROM
LD (ROMTST_),HL
EX DE,HL ;HL = dado e DE = endereco.
LD BC,(CHEKSUM_) ;BC = soma parcial.
ADD HL,BC ;HL = soma atualizada.
LD (CHEKSUM_),HL ; Salva soma parcial atualizada
EX DE,HL ;DE = soma e HL o end. atualizado
LD BC,EPROM-2 ;BC = maior endereco da EPROM.
OR A ;Verifica se e' o ultimo
SBC HL,BC ; endereco a ser testado.
JR C,SEGUE

```

TESTA:LD DE,(CHEKSUM_)

```

LD A,(BC) ;Se sim,
LD L,A ; carrega HL com
INC BC ; a soma gravada no
LD A,(BC) ; ultimo endereco
LD H,A ; da EPROM e
XOR A ; compara com
SBC HL,DE ; a soma obtida
JR Z,ROMSEG ;
LD A,(SYSFLG_) ; Se erro,
OR 02H ; Seta flag de erro de EPROM
LD (SYSFLG_),A ; e envia sinal no porto
OUT (DEV1),A ; de saida

```

ROMSEG: XOR A

```

LD B,4 ;Reinicializa os
LD HL,ROMTST_ ; os dados da

```

```

LROM: LD (HL),A      ; tabela de
      INC HL         ; testes da
      DJNZ LROM      ; EPROM.

```

```

;----- WATCH DOG -----
; Controle de temporizacao do 'clock do shutter'
;

```

```

      EXTRN SHCNT_, FASE1_

```

```

SEGUE:

```

```

      LD A,(SYSFLG_) ;Verifica se acionamento
      AND 40H        ;de 'shutter' esta ativo
      JR Z,TMOUT    ; Se nao, cai fora
      LD HL,FASE1_  ; Se sim,
      LD A,(SHCNT_) ; carrega contador de controle
      INC A         ;Incremente e verifica contagem
      LD (SHCNT_),A ; que corresponde ao angulo
      CP (HL)       ;Verifica contagem = angulo de
      JR NZ,SEGUE1  ; Se estiver perto do fim,
      LD A,32       ; reprograma 'timer0'
      OUT (TIMER0),A ; para reduzir velocidade do motor
      LD A,(SHCNT_) ; entrando na Fase 2 de atuacao
SEGUE1: INC HL      ; Fase 2 de acionamento
      CP (HL)       ; Verifica se chegou ao
      JR NZ,TMOUT   ; fim de curso
      LD A,27H     ; Se sim,
      OUT (TIMER0),A ; reseta o 'clock'
      LD A,0FFH    ; Desabilita todos
      OUT (PPIOC),A ; os motores
      LD A,(SYSFLG_) ; Zera 'flag' indicador de
      AND 10111111B ; acionamento em transito
      LD (SYSFLG_),A ;

```

```

;----- WATCH DOG -----

```

```

; Verifica 'Time out' ou fim de recepcao da comunicacao serial
;

```

```

TMOUT: LD A,(SYSFLG_) ;
      AND 80H        ; Verifica se Recepcao ativada
      JR Z,WDOG      ; Se nao, cai fora
      LD A,(RXTM_) ; Se sim,
      INC A         ;
      LD (RXTM_),A ; Verifica se houve 'time out'
      CP 04H        ;
      JR Z,EOTX     ; Se sim, fecha recepcao
      IN A,(USARTC) ; Caso 'Handshake' DSR/DTR
      AND 80H       ; verifica de DSR ativo
      JR NZ,WDOG    ;
EOTX: LD A,(RSMOD_) ;
      AND 11111011B ; Encerra recepcao e
      LD (RSMOD_),A ;
      OUT (USARTC),A ;
      LD A,(SYSFLG_) ; zera flag de recepcao
      AND 7FH       ; ativa
      LD (SYSFLG_),A ;

```

----- WATCH DOG -----

Reprograma o canal 2 do Z80-CTC com periodo de 15ms.

EXTRN RXTM_

WDOG:

LD A,00100111B ;Programa a palavra
OUT (TIMER2),A ; de controle do CTC.
LD A,180 ;Carrega o registrador de
OUT (TIMER2),A ; constante de tempo do CTC

POP IY ;Restaura todos
POP IX ; os registradores
POP HL ; de uso geral.
POP DE
POP BC
POP AF
EI ; Habilita interrupcao
RETI ; e retorna

```

===== PIO INT =====
;
; Rotina de atendimento de interrupcao do Z80-PIO
; Busca bit que ativou a interrupcao no porto A ou B e
; a rotina de atend. na tabela de desvios na RAM
;
EXTRN PIOATAB_
PUBLIC PIOAINT_ ; Interrupcao do porto A
PIOAINT_:
DI
PUSH AF ;Salva todos os
PUSH BC ; registradores
PUSH DE ; de uso geral.
PUSH HL
PUSH IX
PUSH IY
IN A,(PIOADT) ;Obtem alarmes do porto A acionados
LD DE,PIOATAB_ ;DE = ponteiro da tabela de desvios
JR BUSCA ;Busca qual sinal da porta A ativo
;
EXTRN PIOBTAB_
PUBLIC PIOBINT_ ; Interrupcao do porto B
PIOBINT_:
DI
PUSH AF ;Salva todos os
PUSH BC ; registradores
PUSH DE ; de uso geral.
PUSH HL
PUSH IX
PUSH IY
IN A,(PIOBDT) ;Obtem alarmes do porto B acionados.
LD DE,PIOBTAB_ ;DE = ponteiro tabela de desvios na RAM
;
BUSCA: LD B,08H ;Inicializa contador de iteracoes.
PROXIMO:
EX DE,HL ;HL = ponteiro da tabela de enderecos
SRL A ;Verifica qual sinal
JR NC,OUTRO ; foi ativado
LD E,(HL) ;Carrega DE
INC HL ; com endereco
LD D,(HL) ; da rotina
INC HL ; e HL aponta o proximo endereco
EX DE,HL ; DE ponteiro e HL endereco da rotina
PUSH AF ;Salva todos os
PUSH BC ; registradores
PUSH DE ; de uso geral.
PUSH HL
PUSH IX
PUSH IY
LD BC,RETORNO ;Salva o endereco
PUSH BC ; de retorno da rotina.
JP (HL) ;Desvia para a rotina de alarme
RETORNO:
POP IY ;Restaura todos
POP IX ; os registradores
POP HL ; de uso geral.

```

```

POP DE
POP BC
POP AF
JR SAI ;Verifica o proximo sinal de alarme.
OUTRO:
INC HL ;HL aponta proximo
INC HL ; endereco.
EX DE,HL ;Toma DE ponteiro do proximo endereco.
SAI: OR A ; Verifica se existem outros
JR Z,PIOFIM ; sinais ativos. Se nao, encerra busca
DJNZ PROXIMO ;Continua busca de alarmes ativos
PIOFIM: POP IY ;Restaura todos
POP IX ; os registradores
POP HL ; de uso geral.
POP DE
POP BC
POP AF
EI ;Habilita o atendimento de novos
RETI ;alarmes e retorna ao programa principal

```

```

===== RXRDY ===
: Atendimento do alarme de recepcao de dados da USART
: ativado pelo bit 0 do porto A do Z80-PIO
:

```

```

PUBLIC RXRDY_
EXTRN COMFLAG_, RXINIT_, RXCONT_, RXTAM_
RXRDY_:
LD BC,(RXCONT_) ; BC - quantidade de caract.
LD HL,(RXINIT_) ; HL - ponteiro do buffer
ADD HL,BC ; HL - endereco livre
LD A,(COMFLAG_) ;Verifica se hove erro
LD E,A ; erro de comunicacao
IN A,(USARTC) ; le o status da USART
AND 00111000B ; e verifica se houve erro.
OR E ; Atualiza COMFLAG
LD (COMFLAG_),A ;
LD A,(SYSFLG_) ; Seta flag de
OR 80H ; recepcao ativa
LD (SYSFLG_),A ;
XOR A ; Reseta time out
LD (RXTM_),A ;
RXOK: IN A,(USARTD) ; Le dado da USART e
LD (HL),A ; escreve no buffer.
INC BC ;Incrementa o contador do buffer.
LD (RXCONT_),BC ; e atualiza na memoria
CP 0DH ; Verifica se fim de transmissao
RET NZ ; por <CR>. Se nao, retorna
LD A,(RSMOD_) ; Se sim,
AND 11111011B ; Encerra/desabilita recepcao
LD (RSMOD_),A ;
OUT (USARTC),A ;
LD A,(SYSFLG_) ;
AND 7FH ; Reseta flag de
LD (SYSFLG_),A ; recepcao ativa
RET

```

```

===== TXRDY =====
:
:   Atendimento do alarme de transmissao de dados
:   ativado pelo bit 1 do porto A do Z80-PIO
:
:   PUBLIC      TXRDY_
:   EXTRN TXCONT_, TXTAM_, TXINIT_
TXRDY_:
LD BC,(TXCONT_) ;Obtem o indice do buffer.
LD HL,(TXTAM_)  ;Obtem a quantidade de dados
OR  A           ; a ser transmitido.
SBC HL,BC      ;Verifica se todos os dados
JR  Z,BUFVAZ   ; foram transmitidos.
LD HL,(TXINIT_) ;Se nao, obtem o
ADD HL,BC      ; dado a ser transmitido
LD A,(HL)      ; e
OUT (USARTD),A ; escreve na USART
INC BC         ;Incrementa indice do buffer.
JR  FIMTX
BUFVAZ: LD A,(RSMOD_) ; Se buffer vazio,
AND 1111110B ; Posiciona flag de transmissao (TxBuf)
LD (RSMOD_),A ; acabada em RSMOD_
OUT (USARTC),A ; e desabilita Tx dados na USART
LD B,0         ;Zera o indice
LD C,0         ; do buffer.
FIMTX: LD (TXCONT_),BC ;Atualiza o indice do buffer
RET

```

```

===== NADA =====
:
:   Instrucao de retorno para rotinas nao implementadas.
:
:   PUBLIC      NADA_
NADA_:
RET
:
:   END .begin
:

```

```

=====
valor = ATOI (n,buffer)   ( n menor/igual a 4 )

Converte 'n' caracteres ASCII enderecados por 'buffer'
para inteiro (Hexa), e retorna o 'valor' no par HL

PUBLIC      atoi_
atoi_:
LD      HL,2
ADD     HL,SP
LD      A,(HL) ;Recupera o valor de n, em A
INC     HL     ;ignorando o byte mais significativo
INC     HL
LD      E,(HL) ;Recupera o endereco do buffer
INC     HL     ;no par DE
LD      D,(HL) ;
LD      HL,0000H ; Zera valor inicial de retorno (HL)
CP      01     ; Jump de acordo com o numero
JR      Z,UM   ; de caracteres ASCII
CP      02     ;
JR      Z,DOIS;
CP      03     ;
JR      Z,TRES ; se maior que 1 byte ( > 2 caracteres)
CALL    DOIS  ; converte byte + significativo e
FIM:    LD     H,L ; armazena no reg. H (troca H por L)
JR      DOIS  ; converte byte - signif., no reg. L
TRES:   CALL   UM
JR      FIM

;
; Converte dois caracteres ASCII enderecados pelo par DE
; [(DE) = + sign. e (DE+1) = - sign.], em um byte no reg. L
;
DOIS:   CALL   ASCHEX
        SLA   A
        SLA   A
        SLA   A
        SLA   A
        LD   L,A
UM:     CALL   ASCHEX
        OR   L
        LD   L,A ;O valor de retorno em HL
        OR   H ;Posiciona flag para retorno
        RET

;
; Converte o caracter ASCII apontado por DE, e retorna
; um valor hexadecimal no acumulador A
;
ASCHEX: LD     A,(DE) ;Carrega A com o caracter ASCII
        INC   DE     ;Incrementa HL para proximo caracter
        SUB   30H    ;Verifica se alfanumerico
        CP   0AH     ;
        RET   C
        SUB   07H    ;Valor decimal
        RET

```

: endereco = ITOA(i , buffer)
:

: Converte o valor inteiro/hexa 'i' de 2 bytes em 4 caract.
: ASCII e armazena na memoria apontada por 'buffer'.
: Retorna o endereco do 'buffer' no par HL
:

PUBLIC itoa_

itoa_:

```
LD HL,2
ADD HL,SP ;HL aponta parametro i.
LD E,(HL) ;Carrega E com byte - significativo de i
INC HL
LD D,(HL) ;Carrega D com byte + significativo de i
INC HL ;HL aponta parametro buffer.
LD A,(HL) ;Carrega HL com ender. do buffer
INC HL ; a ser convertido
LD H,(HL)
LD L,A
PUSH HL
CALL HEXASC ; converte byte + sign.
LD D,E
CALL HEXASC ; converte byte - sign.
POP HL
LD A,L
OR H
RET
```

: Converte o conteudo do reg. D (byte HEXA) em dois caracteres
: ASCII, armazenados no endereco apontado por HL
:

```
HEXASC: LD A,D ; Carrega byte no reg. A
RRA ;
RRA ; Troca 4 bits +signif. com -signif.
RRA ;
RRA ;
CALL TOASC ; converte 4 bits +sign. em um caracter ASCII
LD A,D ;
CALL TOASC ; converte 4 bits -significativos
RET
```

: Converte os quatro bits - sign. do reg. A em um caracter
: ASCII, armazena no ender. apontado por HL.
:

```
TOASC: AND 0FH
CP 0AH ; Verifica de [0..9] ou [A..F]
JR C,NUMERO ;
ADD A,07H ; Se [A..F], soma 37H = 07H + 30H
NUMERO: ADD A,30H ; Se [0..9], soma 30H
LD (HL),A ; Escreve o caracter na memoria
INC HL ; incrementa para o endereco do proximo
RET
```

□

.z80

===== RS232COM.ASM

IFQSC - DFCM (Lab. MBE)

Rotinas de comunicacao serial

=====

EN VIA (qtd, buffer)

Rotina para transmissao de dados: envia uma quantidade de 'qtd' caracteres enderecados por 'buffer'

=====

EXTRN TXINIT_, TXTAM_, TXCONT_, COMFLAG_, RSMOD_
EXTRN USARTC, USARTD

PUBLIC envia_

envia_:

```
LD A,(RSMOD_) ;Aguarda ate' que nao haja
RRA ; transmissao em transito.
JR C,envia_
LD HL,2 ; Recuperacao de parametros
ADD HL,SP ;
LD E,(HL) ; DE com quantidade de dados
INC HL ;
LD D,(HL) ;
LD (TXTAM_),DE ;Carrega qtd de dados na memoria.
INC HL
LD A,(HL) ; HL com inicio do buffer.
INC HL ;
LD H,(HL) ;
LD L,A ;
LD (TXINIT_),HL ;Carrega inicio do buffer na memoria
LD A,(RSMOD_)
OR 01H ;Posiciona o flag TxBUF em "1",
LD (RSMOD_),A ; indic. transmissao em transito
LD DE,0000H ;Zera o contador do
LD (TXCONT_),DE ; buffer de transmissao.
DSREN: LD A,(RSMOD_) ;Habilita a transmissao de dados
OR 00000011B ;
OUT (USARTC),A ; da USART.
EOTW: LD A,(RSMOD_) ;
AND 01H ; Espera fim de transmissao
JR NZ,EOTW ; antes de retomar
TNOHS: LD A,L ;
OR H ; Posiciona flag de retorno
RET
```

```
quantid = RECEBE ( destino )
char *destino
```

```
Rotina para recepcao de dados: le o buffer de recepcao
e transfere para o endereco apontado por 'destino'
Retorna a 'quantid.' de caracteres lidos no par HL
```

```
EXTRN      RXINIT_, RXCONT_
EXTRN COMFLAG_, SYSFLG_, erro_
PUBLIC     recebe_
```

```
recebe_:
LD A,(RSMOD_)      ; Habilita DTR
OR 00000100B       ; e atualiza em RSMOD
LD (RSMOD_),A      ;
OR 00000110B       ;
OUT (USARTC),A     ;
RXWAIT: LD HL,(RXCONT_) ;
LD A,L             ; Espera recepcao do primeiro
OR H               ; caracter
JR Z,RXWAIT       ;
RXEND: LD A,(RSMOD_) ;
AND 04H           ; Espera fim de recepcao
JR NZ,RXEND       ;
LD HL,02          ; DE aponta
ADD HL,SP         ; para o inicio
LD E,(HL)         ; do buffer de
INC HL            ; destino dos dados.
LD D,(HL)         ;
LD HL,(RXINIT_)   ; HL aponta buffer de leitura.
DI
PUSH BC           ; Salva reg. afetado
LD BC,(RXCONT_)  ; BC contem qtd de dados no buffer
LDIR              ; Transfere os dados lidos
POP BC
LD A,(COMFLAG_)  ; Verifica se houve
AND 00111000B    ; erro de recepcao.
JR Z,RXCLR       ; Se nao, termina
LD (erro_),A     ; Se sim, posiciona 'erro_'
LD A,(COMFLAG_)
AND 11000111B    ; Posiciona COMFLAG indicando
LD (COMFLAG_),A ; ausencia de erro.
DEC DE
LD A,0DH         ; Coloca ultimo caracter como <CR>
LD (DE),A
RXCLR: LD HL,(RXCONT_) ;
LD DE,0          ; Zera 'buffer' de leitura
LD (RXCONT_),DE ;
EI
LD A,H           ; Posiciona 'flag' de retorno
OR L
RET
```

Rotinas para controle dos conversores A/D, D/A e dos obturadores

valor = ADC(canal)

Rotina para controle do conversor A/D

Seleciona o 'canal' desejado, e faz uma media de 8 medidas.

Retorna o valor lido (a media) no par HL

EXTRN ADCX, DACX

PUBLIC adc_

adc_:

LD HL,02H ;

ADD HL,SP ;

LD A,(HL) ; Recupera parametro 'canal' do A/D

OUT (ADCX),A ; envia selecao de canal da placa A/D

PUSH BC ; Salva Reg. afetado

LD HL,0000H ; Zera acumulo das medidas

LD C,3FH ;

adlop: DEC C ; Espera estabilizacao do 'sample/hold'

JR NZ,adlop ;

LD B,08 ; reg. B com numero de medidas

; Acumulo de 8 medidas em HL e no reg. C

media: OUT (ADCX+1),A ; envia pulso de 'start'

NOP ; espera entre pulso de 'start' e

NOP ; sinal de EOC = 0

NOP

noeoc:

IN A,(ADCX+1) ; loop de verificacao

AND 80H ; de fim de conversao (EOC = 1)

JR Z,noeoc ; (bit 7 do byte mais signif.

IN A,(ADCX+1) ; Le byte mais significativo

AND 7FH ; zera bit mais significativo

LD D,A ;

IN A,(ADCX) ; reg. DE com o valor lido

LD E,A ;

ADD HL,DE ; acumula a medida

JR NC,adovf ; Se ocorreu 'overflow' no

INC C ; acumulo, soma 1 ao reg. C

adovf: DJNZ media ; Decrementa e verifica contador B

; Media das 8 medidas (C+HL)/8 = shift right C+HL 3 vezes

SRL C ;

RR H ; Primeiro deslocamento

RR L ;

SRL C ;

RR H ; Segundo deslocamento

RR L ;

SRL H ; Terceiro deslocamento, reg. C nao e

RR L ; necessario por usar no maximo 2 bits

ADSEG1: POP BC ; Recupera reg. afetado

LD A,L ; posiciona 'flag' de retorno

OR H ;

RET

DAC (canal, valor)

Rotina para enviar um 'valor' a um 'canal' da placa D/A
O 'valor' e' de 12 bits, separados em 4 + 8 bits
Os 4 bits + sign. de valor sao juntados aos
3 bits de selecao de 'canal', formando um unico byte.

O conversor D/A opera com o valor digital complementado,
feito aqui por software.

```

PUBLIC      dac_
:
dac_: LD    HL,02
      ADD  HL,SP
      LD   A,(HL) ; recupera parametro 'canal' (3 bits)
      INC  HL
      INC  HL
      PUSH BC      ; Salva Reg. afetado
      LD   C,(HL) ; recupera parametro 'valor'
      INC  HL      ; no reg. BC
      LD   B,(HL) ;
; montagem com 3 bits de ender. e os 4 bits + sign. de valor
      SLA  A
      SLA  A      ; deslocamento dos bits do 'canal'
      SLA  A
      SLA  A
      CPL          ; Complemento do canal
      AND  0F0H   ; Zera os 4 bits - significativos
      OR   B      ; Montagem: canal + (4 bits +sign. valor)
      CPL          ; Complemento do valor e descomplem. do canal
      OUT  (DACX+1),A ; envio do canal e os 4 bits + sign.
      LD   A,C    ; reg. A com byte - signif.
      CPL          ; Complementa byte - signif.
      OUT  (DACX),A ; envio dos 8 bits - signif.
      POP  BC     ; Recupera Reg. afetado
      LD   A,H    ; Posiciona Flag de retorno
      OR   L
      RET
```

```

=====
:
: valor = SHUTTER(numero, comando)
:
: Rotina de controle dos 'shutters' (obturadores)
: onde: numero = numero do shutter (0 a 3)
: comando = LSB (0-fechar ou 1-abrir) MSB (0-executar 1-esperar)
: retorno de 'valor no par HL : 0 = OK ou 1 = erro
:
: EXTRN SYSFLG_, SHSTT_, SHCNT_, PPIOCT, TIMER0
: PUBLIC shutter_
shutter_:
LD A,(SYSFLG_) ;Espera o termino de alguma
AND 40H ;atuacao em andamento
JR NZ,shutter_ ;
LD HL,02 ; posiciona HL para
ADD HL,SP ; recuperacao dos parametros
PUSH BC ; Salva Registr. afetado
LD A,(HL) ; Recupera 'numero' do shutter
INC HL ; no reg. A
INC HL
CP 04 ; Verifica se 'numero' e compativel
JR NC,SHRET ; Se nao, cai fora
LD B,(HL) ; Recupera parametro 'comando' em B
INC HL ;
LD E,(HL) ;Recupera controle de exec. no reg. E
LD C,A
RLCA ; Monta numero do shutter (n)
OR B ; mais comando (c) 0000nnnc
LD HL,SHSTT_ ; Busca a variavel estado do 'shutter'
LD B,0 ; na tabela
ADD HL,BC ; HL = inicio da tabela de estado
LD B,(HL) ; BC = numero do shutter
CP B ; Le estado anterior e compara com o comando
JR Z,SHRET ; Se erro, retorna
LD (HL),A ; Se OK, atualiza estado na tabela,
OUT (PPIOCT),A ; e envia direcao ao porto C-
OR 00001000B ; Muda para porto C+ = habilitacao
AND 0FEH ; e habilita a operacao do 'shutter'
OUT (PPIOCT),A ;
XOR A ; Verifica controle de execucao
OR E ; Se for para executar, continua
JR NZ,SHRET ; Se nao, cai fora
LD (SHCNT_),A ; Zera contador de controle,
LD A,20 ; inicia pulsos de clock
OUT (TIMER0),A ; atraves do 'timer 0' do Z80-CTC
LD A,(SYSFLG_) ; e posiciona 'flag' de atuacao
OR 40H ; em transito ( bit 6 de SYSFLG)
LD (SYSFLG_),A ;
LD A,25H ; Prepara 'timer' para reduzir a velocid.
OUT (TIMER0),A ; do motor na fase final de atuacao
LD HL,0 ; Zera HL para indicar retorno sem erro
SHRET: POP BC ; Recupera Reg. afetado
LD A,H ; Posiciona flag para retorno
OR L ;
RET

```

IFQSC - DFCM (Lab. MBE)

Rotinas de Leitura e Escrita em
um endereco de E/S ou memoria

valor = INPORTB (endereco)

Rotina para leitura de um 'endereco' de E/S
Retorna o 'valor' no par HL

PUBLIC inportb_

```
inportb_:  
LD HL,02 ;HL aponta parametro endereco  
ADD HL,SP ;  
PUSH BC ;salva registradores afetados  
LD C,(HL) ;reg. C com o endereco de E/S  
IN A,(C) ;le o endereco de E/S  
POP BC ;restaura registradores  
LD H,0 ;carrega HL com  
LD L,A ;valor lido  
OR H ;posiciona flag para retorno  
RET
```

OUTPORTB (endereco, valor)

Rotina para escrever um 'valor' em um 'endereco' de E/S

PUBLIC outportb_

```
outportb_:  
LD HL,02 ; posiciona HL para recuperacao  
ADD HL,SP ; de parametros da rotina  
PUSH BC ; salva reg. afetado  
LD C,(HL) ; recupera parametro 'endereco'  
INC HL ; no reg. C  
INC HL ; recupera parametro 'valor'  
LD A,(HL) ; no reg. A  
OUT (C),A ; escreve o valor no ender. de E/S  
POP BC  
LD A,H ;  
OR L ; posiciona flag para retorno  
RET
```

```

===== mread
valor = MREAD (endereço)

Le um 'endereço' de memória (1 byte) e retorna o 'valor' lido no par HL

PUBLIC      mread_
mread_: LD HL,02H ;
ADD HL,SP ; Recupera ender. da memória em HL
LD A,(HL) ; LSB
INC HL ;
LD H,(HL) ; MSB
LD L,A ;
LD L,(HL) ; Le byte/dado da memória em L
LD H,00H ; Zera H (Retorno em HL)
LD A,L
OR H
RET

```

```

===== mwrit
MWRIT (endereço, valor)

Escreve 'valor' de 1 byte em um endereço de memória

PUBLIC      mwrit_
mwrit_: LD HL,02H ; HL com endereço do primeiro
ADD HL,SP ; parametro
PUSH DE ; Salva reg. afetado
LD E,(HL) ;
INC HL ; Reg. DE com ender. de memória
LD D,(HL) ;
INC HL ;
LD A,(HL) ; Reg. A com o byte/dado a escrever
LD (DE),A ; Escrita na memória
POP DE ; Recupera reg. afetado
LD A,H
OR L
RET

```

```

===== exec
EXEC (endereço)

Transfere a execução do programa para um 'endereço'

PUBLIC      exec_
exec_: LD HL,02H ;
ADD HL,SP ;
LD E,(HL) ; Recupera parametro endereço
INC HL ; de execução do programa
LD D,(HL) ;
EX DE,HL
LD DE,RAMRET ; Salva endereço de retorno
PUSH DE ; da rotina
JP (HL)
RAMRET: LD A,H
OR L
RET

```

```

=====
Declaracao de variaveis inicializadas do programa
principal em C, para a UCP Z-80

Tabelas de enderecos de desvio para atendimento das
intempcoes geradas por Z80-CTC, Z80-PIO e NMI
Tabela de dados inicializados do programa em EPROM

TABELAS.H
=====*/

extern int sbot, ermo;

extern void NADA(), WATCH(), PIOAINT(), PIOBINT(), RXRDY(), TXRDY();

/*=====      Z80-CTC - Tabela de enderecos das rotinas de atendim. =====*/

void (*CTCVET[])() = {
    NADA,          /*          rot. do canal 0 */
    NADA,          /*          rot. do canal 1 */
    NADA,          /* rot. do canal 2 (watch-dog) */
    WATCH };      /* rot. do canal 3 (relogio ) */

/*=====      Z80-PIO - Ender. de atendim. e vetor de interrupcao =====*/

void (*PIOAVET)() = PIOAINT; /* rot. da porta A do Z80-PIO */
void (*PIOBVET)() = PIOBINT; /* rot. da porta B do Z80-PIO */

/*-- Tabela de enderecos dos alarmes da porta A da Z80-PIO */

void (*PIOATAB[])() = {
    RXRDY,          /* rotina de recepcao da USART */
    TXRDY,          /* rot. de transmissao USART */
    alm2, /* rotina do sinal de alarme AL2*/
    alm3, /* rotina do sinal de alarme AL3*/
    alm4, /* rotina do sinal de alarme AL4*/
    alm5, /* rotina do sinal de alarme AL5*/
    alm6, /* rotina do sinal de alarme AL6*/
    alm7,}; /* rotina do sinal de alarme AL7*/

/*-- Tabela de enderecos dos alarmes da porta B da Z80-PIO */

void (*PIOBTAB[])() = {
    alm8, /* rotina do sinal de alarme AL8*/
    alm9, /* rotina do sinal de alarme AL9*/
    alm10, /*rotina do sinal de alarme AL10*/
    alm11, /*rotina do sinal de alarme AL11*/
    alm12, /*rotina do sinal de alarme AL12*/
    alm13, /*rotina do sinal de alarme AL13*/
    alm14, /*rotina do sinal de alarme AL14*/
    alm15}; /*rotina do sinal de alarme AL15*/

/*=====      Vetor para falhas em operacoes de ponto flutuante: =====*/

int (*Sysvec[])() = { 0, 0, 0, 0 };

```

```
/*==== Tabela de enderecos de desvios de outras interrupcoes ===*/
```

```
#define JP 0xc3
```

```
typedef struct {  
    char opcode;  
    void (*rotina)();  
} jump;
```

```
jump NMIDES = {JP, NADA}; /* desvio interrupcao NMI */  
jump RST08DES = {JP, NADA}; /* desvio da interrupcao RST 08H */  
jump RST10DES = {JP, NADA}; /* desvio da interrupcao RST 10H */  
jump RST18DES = {JP, NADA}; /* desvio da interrupcao RST 18H */  
jump RST20DES = {JP, NADA}; /* desvio da interrupcao RST 20H */  
jump RST28DES = {JP, NADA}; /* desvio da interrupcao RST 28H */  
jump RST30DES = {JP, NADA}; /* desvio da interrupcao RST 30H */  
jump RST38DES = {JP, NADA}; /* desvio da interrupcao RST 38H */
```

```
/*=====
```

```
                Variaveis do sistema:                                */
```

```
char COMFLAG = 0,          /* status da comunicacao serial */  
    RSMOD = 0,             /* Modo de comun. (DTR/RTS) */  
    RXTM = 0,  
    SYSFLG = 0,           /* status sist.: erros de funcoes ativas*/  
/*---- Variaveis dos shutters */  
    FASE1 = 17,           /* contador fase1 da atuacao */  
    FASE2 = 25,           /* " fase2 " */  
    SHCNT = 0,           /* Contador do 'clock do shutter' */  
    SHSTT[] = { 40, 40, 40, 40}, /* Status dos shutters */  
/*---- Buffer de mensagem de falha da RAM */  
    FAILRAM[] = "FALHA NA RAM: ",  
/*---- Buffer para 4 caracteres ASCII */  
    TXBUF[] = { 32, 32, 32, 32, '\n', 0x0D },  
    RXBUF[64];           /* buffer de recepcao de dados */  
int RAMTST = 0x8000,     /* ponteiro de teste da RAM */  
    ADRAM = 0xFFFF,     /* Endereco falho da RAM */  
    ROMTST = 0,          /* ponteiro de teste da EPROM */  
    CHEKSUM = 0,         /* soma de teste da EPROM */  
    RXINIT = RXBUF,      /* inicio do buffer de recepcao */  
    RXCONT = 0,          /* contador do buffer recepcao */  
    RXTAM = 64,          /* tamanho do buffer recepcao */  
    TXINIT = TXBUF,      /* inicio do buffer transmissao */  
    TXCONT = 0,          /* cont. do buffer transmissao */  
    TXTAM = 0,           /* tamanho do buffer transmissao*/  
    MEMRY = 0xFFFF;     /* deve ser gravado com _Uend_ */  
long int  
    TIMFLAG = 0,         /* Calendario - contador (10ms) */  
    DIAFLAG = 0;
```

```
—
```

```

/*=====
IFQSC - DFCM ( Lab. MBE )

Programa principal do controlador logico programavel
UCP Z80 para automacao do sistema de MBE

MBEROM.C
=====*/

```

```

envmsg( ptm )          /* Rotina de envio de mensagens */
char *ptm;
{ envia( strlen(ptm), ptm);
  envia( 2, "\n\x0D"); }

```

```

/* Rotinas de atendimento de alarmes disponiveis da Z80-PIO */

```

```

alm2() { envmsg( "Al 2" ); }      /* Envia mensagens de */
alm3() { envmsg( "Al 3" ); }      /* alarmes ativos */
alm4() { envmsg( "Al 4" ); }
alm5() { envmsg( "Al 5" ); }
alm6() { envmsg( "Al 6" ); }
alm7() { envmsg( "Al 7" ); }
alm8() { envmsg( "Al 8" ); }
alm9() { envmsg( "Al 9" ); }
alm10() { envmsg( "Al 10" ); }
alm11() { envmsg( "Al 11" ); }
alm12() { envmsg( "Al 12" ); }
alm13() { envmsg( "Al 13" ); }
alm14() { envmsg( "Al 14" ); }
alm15() { envmsg( "Al 15" ); }

```

```

/*=====

```

Programa Principal

Recebe um comando do micro formato 'ceeeedddd', onde
 'eeee' = endereco de mem., canal de E/S A/D D/A shutter
 'dddd' = valor/dado ou comando a ser escrito
 'c' = comando
 Verifica se foi corretamente recebido e executa

```

----- */
char *pte,          /* Aponta para os dados a serem transmitidos */
ptr[64];          /* Buffer de recepcao de dados */
int qtd,          /* Quantidade de dados transmitidos/recebidos */
ender, valor,     /* Parametros de comunicacao */
lixo;
char tst,
com,             /* comando */
check[16];      /* buffer de caracteres de verificacao */
int vadc[8],    /* valores dos canais do conv. A/D */
vdac[8];       /* " " " " D/A */
/*=====*/

```

```

#include "tabelas.h" /* tabela de variaveis inicializadas */

```

```
/*=====*/
```

```
main()
{
    pte = "Mem. RAM : ";          /* Envia mensagem inicial*/
    envia( strlen(pte), pte );
    envia( 6, itoa( sbot, TXBUF ) ); /* com tamanho da RAM */

    while (1) {                  /* Looping principal */
        tst = '?';

        while(tst != '*') {
            qtd = 0;
            qtd = recebe( ptr );  /* Recebe comando */
            envia( qtd, ptr); /* e ecoa */
            lixo = 0;
            lixo = recebe(check); /* Recebe verificacao */
            qtd=0;
            do {
                if (check[qtd++] == '*') /*Verifica se correto*/
                    tst = '*';
            } while (check[qtd] != 13);
            if (tst != '*')        /* Se nao ecoa verificacao */
                envia(lixo,check);
        }                          /* Se sim inicia execucao */

        com = ptr[0]; /* Separa parametros 'comando'*/
        ender = atoi( 4, &ptr[1]); /* 'endereco' */
        valor = atoi( 4, ptr+5); /* e 'dado' */

        switch(com)               /* Executa comando */
        {
            case 'I': /* ===== leitura de canal de I/O */
                valor = inportb(ender);
                envia( 6, itoa(valor, TXBUF) );
                break;
            case 'O': /* ===== escrita em canal de I/O */
                outportb(ender, valor);
                envia( 6, itoa(ender, TXBUF) );
                break;
            case 'A': /* ===== conversor A/D */
                valor = adc(ender);
                vadc[ender] = valor;
                envia( 6, itoa(valor, TXBUF) );
                break;
            case 'D': /* ===== conversor D/A */
                vdac[ender] = valor;
                dac( ender, valor );
                envia( 6, itoa(valor, TXBUF));
                break;
            case 'R': /* ===== leitura de memoria */
                valor = mread(ender);
                envia( 6, itoa(valor, TXBUF));
                break;
        }
    }
}
```

```
case 'W': /* ===== escrita em memoria */
    mwrit(ender, valor);
    envia( 6, itoa(ender, TXBUF));
    break;
case 'S': /* ===== controle do 'shutter' */
    valor = shutter(ender,valor);
    envia( 6, itoa(valor, TXBUF));
    break;
case 'E': /* ===== transf. e exec. progr. */
    exec(ender);
    break;
default :
    envmsg( "Nada" );
```

```
}
}
}
```

□

Apêndice C

```

/* =====
IFQSC - DFCM ( Lab. MBE )

Programa para teste do sistema de controle e
automacao (UCP Z-80) para o sistema de MBE,
com linhas de Handshake (DSR/DTR) conectadas

Microcomputador IBM-PC , Linguagem C (Turbo C)

TESTMBE.C
=====*/

#include <conio.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <ctype.h>
#include <string.h>
#include <math.h>

/* Declaracao de variaveis */

char  rxbuf[64], txbuf[64], /* buffer de recepcao e transmissao de caracteres */
      chkok[] = "*****\r", chker[] = "?????\r", /* strings de resposta a verificacao */
      iabuf[16], /* buffer usado para conversao inteiro X ASCII */
      *ptr, *ptr2,
      status, dado, erro, ercom, par;
int    valor, canal, cnt, temp,
      j, jj, i, ii;
int far *farptr;
unsigned int  ender;
float  fvalor, fval;
double xx,yy,zz;

/*--- Variaveis para ajuste de off set e ganho do conversor ---- */
float fator[8]={1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0},
      ofset[8]={0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0};

/*--- Valores das interfaces A/D e D/A ----- */
float  dac[8]={0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0},
      adc[8]={0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0};

/* ===== Programacao da serial ===== */
void progser()
{
  outportb(0x2fb,0x80); /* acesso a dlab - prog. Baud Rate */
  outportb(0x2f8,0x06); /* 60-1200 30-2400 18-4800 0c-9600 06-19200 */
  outportb(0x2f9,0x00);
  outportb(0x2fb,0x1e);
  outportb(0x2f9,0x00);
  outportb(0x2fc,0x00);
}
/*===== Recepcao de caracteres =====*/
recebe(rxpt)
char *rxpt;

```

```

{char cx;
outportb(0x2fc,0x03);
do { while((inportb(0x2fd)&0x01)==0);
    ercom = ercom | inportb(0x2fd)&0x0e;
    *rxpt = inportb(0x2f8);}
while(*rxpt++ != 13);
*rxpt = '\0';
outportb(0x2fc,0x00);
}
/*===== Envio de caracteres =====*/
envia(txpt)
char *txpt;
{ outportb(0x2fc,0x03);
do{ while((inportb(0x2fd)&0x20)==0);
    outportb(0x2f8, *txpt); }
while (*txpt++ != 13);
outportb(0x2fc,0x00);
recebe(rxbuf);
}
/*===== Converte string para numero =====*/
aschex(c)
int c;
{ c=c-48;
if(c>9)
    c=c-7;
return(c);}
/*-----*/
ascint(aipt,os1)
char *aipt;
int os1;
{ int    mx = 4096,
      tmp;
unsigned int val = 0;
aipt = aipt + os1;
for(i=0;i<4;i++)
{ *aipt = toupper(*aipt);
  val = val + mx*aschex(*aipt++);
  mx = mx/16; }
return(val);
}
/*===== Converte numero p/ string 4 digitos HEXA =====*/
intasc(val1,os)
int val1,os; /* val1 = numero    os = posicao da string no buffer de conversao */
{
    itoa(val1,iabuf,16);
    ii = strlen(iabuf)-1;
    j = 3-ii;
    for(i=ii;i>-1;i--)
        iabuf[i+j]=toupper(iabuf[i]);
    for(i=0;i<j;i++)
        iabuf[i]='0';
    for(i=0;i<4;i++)
        txbuf[i+os]=iabuf[i];
    txbuf[4+os]='\r';
    txbuf[5+os]='\0';
}

```

```

/*===== Loop de envio de comando =====*/
envloop()
{ erro=1;
  cnt=1;
  do { envia(txbuf);
      if (strcmp(&txbuf[0], &rxbuf[0])== 0)
          { erro = 0;
            envia(chkok); }
        else
          { erro = 1;
            envia(chker); }
      if(cnt++ > 5)          /* 5 tentativas de envio */
          {erro = 0;
            printf("\nsem sucesso em %d tentativas ercom :%x",cnt-2,ercom);}
    }
  while(erro != 0);
}
/*===== Leitura de Keyboard =====*/
keyb(kbptr)
char *kbptr;
{do *kbptr=getche();
  while(*kbptr++ != 13); /* leitura ate encontrar <CR> */
  *kbptr='\0';
}

/*=====
                                     Programa principal
=====*/
main()
{
char par, com;

progser();      /* programa a interface serial */

/*===== MENU DE SELECAO DE COMANDOS =====*/
do{
printf("\n\n [R]eceiver [X]Hexadec [A]A/D [D]D/A [S]hutter [E]chkok <ESC>Fim :");
com = getche() & 0xdf; /* le caracter e converte para maiuscula */
txbuf[0] = com;
printf("\n");
erro = 1;
switch (com)
{

case 'X': /*----- Envio de comando no formato CXXXXYYYY<CR> */
  erro = 1;
  printf("\n-----Carac enviar :");
  keyb(txbuf); /* leitura de teclado */
  envloop();
  printf("\n----- - Resposta :%s",rxbuf);
  break;

case 'R': /*----- Recepcao de caracteres */

```

```

recebe(rxbuf);
printf("\n-----Recebe :%s",rxbuf);
valor = ascint(rxbuf,0);
printf("\n----- Valor Dec :%d",valor);
break;

case 'D': /*----- Escrita em canal do conversor D/A */
for(canal=0;canal<8;canal++)
printf("\n Valor D/A[%d] = %6.2f",canal,dac[canal]);
printf("\n Entre com canal do D/A - 0 a 7 : ");
scanf("%d",&canal);
if((canal >-1) && (canal<8))
{ intasc(canal,1);
printf("\n Entre temperatura em grau C (resol. 0.5 C :)");
scanf("%f",&fvalor);
dac[canal] = fvalor;
valor = ((fvalor+0.25-ofset[canal])*2.0)/fator[canal];
intasc(valor,5);
envloop();}
break;

case 'A': /*-----Leitura do canal de A/D */
printf("\n----- Entre canal:");
scanf("%d",&canal);
intasc(canal,1);
envloop();
fval = ascint(rxbuf,0)/1.0035 - 8192.0;
valor = fval;
if(canal == 7)
{ fvalor = abs(valor)/1000.0; /* relacao inversa de correcao*/
temp = 11 - (int)fvalor ;
fval = fvalor - (int)fvalor ;
zz = pow(10.0,fval);
printf("\n ----- VACUO : %5.2f E-%d",zz,temp);}
else
{fvalor = (valor/4.0)*fator[canal] + ofset[canal];
for (jj=0;jj<7;jj++)
{printf("\nCanal :%d Temper.(grau C) :%7.2f",jj,adc[jj]);}
printf("\n novo valor canal :%d = %7.2f",canal,fvalor);
adc[canal] = fvalor;
}
break;

case 'E': /*----- Envia caracteres '*****' */
printf("\n----- envio chkok:%s",chkok);
envia(chkok);
printf("\n-----recebe:%s",rxbuf);
break;

case 'S': /*----- Operacao dos obturadores */
printf("\n Entre numero do 'shutter' - 0 a 3 :");
scanf("%d",&valor);
intasc(valor,1);
printf("\n Entre comando [A]brir [F]echar:");
par = getche() & 0xdf;
switch(par)

```

```
{case 'A':
    valor = 1;
    break;
case 'F':
    valor = 0;
    break;
default:
    { printf("\n erro de comando-----xxxxxxx");
      valor=5;}
}
if(valor != 5)
{ intasc(valor,5);
envloop();
printf("Execucao OK se resposta = 0 -->:%s",rxbuf);}
break;

default: ;
}
}
while (com != 27);
}□
```