TESE
649

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

# UM SINTETIZADOR DE SINAIS DE CORRENTE E TENSÃO PARA TESTES E ENSAIOS EM INSTRUMENTAÇÃO ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA

GIOVANNI FRANCISCO RABELO

ORIENTADOR : Prof. Carlos Alberto Mohallem Guimarães
Departamento de Eletrotécnica

CO-ORIENTADOR : Prof. Carlos Alberto Murari Pinheiro
Departamento de Eletrônica

MAIO -1991-

Ministério da Educação
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

# ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Às 15:30 horas do dia 16.05.91 no Auditório da Biblioteca Mauá da Escola Federal de Engenharia de Itajubá, foram abertos os Trabalhos de Defesa da Dissertação de Mestrado "Um Sintetizador de Sinais de Corrente e Tensão para Testes e Ensaios em Instrumentação Elétrica"

do Candidato Giovanni Francisco Rabelo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica, na Área de Concentração de Sist. Elétricos Industriais.

Estavam presentes à Sessão: Prof. Wilton Ney do Amaral Pereira, prof. do IPD/IME e 1º Examinador; Prof. Germano Lambert Torres, prof. da EFEI e 2º Examinador; Prof. Carlos Alberto Murari Pinheiro, prof. da EFEI e 3º Examinador; Prof. Carlos Alberto Mohallem Guimarães, prof. da EFEI, 4º Examinador e Orientador do candidato.

Foram iniciados os Trabalhos de Defesa Pública da Dissertação com a apresentação dos demais membros da Comissão Examinadora pelo seu Presidente e escolhido Prof. Carlos Alberto Mohallem Guimarães para secretariar a Sessão.

Após a chamada do Candidato pelo Presidente, foi feita a exposição oral da Dissertação, durando a mesma trinta minutos.

Terminada a exposição, o Candidato foi questinado pelos Examinadores. Às 16:25 horas foi encerrada a arguição, retirando-se a Comissão para a realização da Sessão de Julgamento. Os Examinadores consideraram o Candidato Aprovado com os seguintes conceitos: 1º Examinador "A+", 2º Examinador "A+", 3º Examinador "A+" e 4º Examinador "A+".

Ministério da Educação
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

Em vista deste resultado foram preenchidos e assinados os formulários Anexos I e II da Coordenação dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Federal de Engenharia de Itajubá. Voltando ao recinto da Sessão Pública de Defesa de Dissertação o Presidente convocou o Candidato e proclamou o resultado à vista do Quadro Demonstrativo de Apuração, entregando-lhe a 1ª via, para fins de direito. Os trabalhos foram encerrados às 16:40 horas e, para que tudo constasse, foi lavrada a presente Ata pelo Secretário escolhido, a qual, depois de lida e se aprovada, será assinada pelos presentes.

Itajubá, 16 de Maio de 1991.

Prof. Wilton Ney do Amaral Pereira
1º Examinador - IPD/IME

Prof. Germano Lambert Torres
2º Examinador - EFEI

Prof. Carlos Alberto Murari Pinheiro
3º Examinador - EFEI

Prof. Carlos Alberto Mohallem Guimarães
4º Examinador - EFEI
Orientador

Ministério da Educação
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

# A N E X O I

## PRONUNCIAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, nomeada por Portaria nº 188 de 10 / 05 / 91 , considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: "Um Sintetizador de Sinais de Corrente e Tensão para Testes e Ensaios em Instrumentação Elétrica"

apresenta pronunciamento no sentido de que o Coordenador dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico) a expedição do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica, na Área de Concentração de Sistemas Elétricos Industriais, satisfeitas as demais exigências regimentais, a GIOVANNI FRANCISCO RABELO.

Itajubá, 16 de Maio de 1991.

Prof. Wilton Ney do Amaral Pereira
1º Examinador - IPD/IME

Prof. Germano Lambert Torres
2º Examinador - EFEI

Prof. Carlos Alberto Murari Pinheiro
3º Examinador - EFEI

Prof. Carlos Alberto Mohallem Guimarães
4º Examinador - EFEI
Orientador

Ministério da Educação
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 9292 - 05/01/1917

# ANEXO II

## FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

Título da Dissertação "Um Sintetizador de Sinais de Corrente e Tensão para Testes e Ensaios em Instrumentação Elétrica"

Autor: GIOVANNI FRANCISCO RABELO

### JULGAMENTO

| EXAMINADORES | CONCEITO | RUBRICA |
|---|---|---|
| 1º | A+ | |
| 2º | A+ | |
| 3º | A+ | |
| 4º | A+ | |

Resultado Médio: Conceito A+, ou seja, APROVADO COM DISTINÇÃO

Observações:

Itajubá, 16 de Maio de 1991.

Prof. Wilton Ney do Amaral Pereira
1º Examinador - IPD/IME

Prof. Germano Lambert Torres
2º Examinador - EFEI

Prof. Carlos Alberto Murari Pinheiro
3º Examinador - EFEI

Prof. Carlos Alberto Mohallem Guimarães
4º Examinador - EFEI
Orientador

Aos meus pais,

Rubens e Antonieta

# AGRADECIMENTOS


- À CAPES pelo apoio financeiro.

- Ao professor Carlos Alberto Mohallem Guimarães que, com sua experiência, demonstrou muita dedicação e entusiasmo na orientação desse trabalho.

- Ao professor Carlos Alberto Murari Pinheiro pela co-orientação e demonstração de confiança.

- Ao professor José Vantuil Lemos Pinto pela constante atenção e disposição sempre que solicitado.

- Aos funcionários da biblioteca e dos laboratórios de eletrotécnica e de eletrônica, em especial ao funcionário João Carlos da Silva pelo indispensável apoio.

- Aos Amigos Ary Mourão de Araújo Júnior e Robert Guimarães Figueiredo.

- À cidade de Itajubá pela acolhida, em especial à Família Scalzo.

# RESUMO

Em decorrência de cargas especiais instaladas nos sistemas elétricos atuais, surgem certos tipos de deformações nos sinais de corrente e tensão que dão origem às ondas harmônicas.

Sabe-se que a instrumentação elétrica em geral é projetada tomando-se, como nominal, ondas senoidais puras. Esse paradoxo leva a instrumentação elétrica a operar fora de suas condições nominais, produzindo erros inaceitáveis.

Foi desenvolvido então, um sistema sintetizador digital de sinais harmônicos de corrente e tensão que produz situações reais de campo e sua principal aplicação presta-se para auxiliar a análise de desempenho da instrumentação elétrica sob os efeitos de sinais distorcidos.

O sistema divide-se em duas partes distintas, das quais a primeira é responsável pela criação das formas de onda a serem utilizadas e, posteriormente, gravadas em memórias "EPROM"; a segunda é responsável pelas leituras das memórias , conversão D/A ( Digital para Analógico ) e amplificações, reproduzindo-se então, os sinais de tensão e corrente separadamente.

A freqüência de operação da onda fundamental é basicamente 50 ou 60 Hz com saída em tensão de até 115 [V eficazes] e saída em corrente de até 5 [A eficazes].

Permite-se ainda trabalhar como sistema polifásico com até 6 canais de tensão e/ou corrente, controlando-se os ângulos de defasagem entre os sinais.

# ABSTRACT

In consequence of special kinds of loads in electric power systems, certain deformations appear on voltage and current signals which produce harmonic waves.

It's known that electric devices are projected to operate with clear sinusoidal wave signal. Such discrepancy caused by the harmonic waves leads the metering instrumentation to unacceptable errors.

So, a digital syntesizer system of current and voltage harmonics was developed. It provides the real field conditions and its principal application is to help performance analysis of electric instrumentation under the influence of electric deformed signals.

The system is divided in two distinct parts, where the first one is responsible for creating the wave forms to be used and later recorded in EPROM ( Erasable Programable Read Only Memory ) ; the second part is responsible for memory reading, D/A ( Digital to Analogic ) conversion and amplifications, reproducing thus, voltage and current signal separately.

The operation frequency of the fundamental wave is basically 50 or 60 Hz with voltage level up to 115 [V rms] and current level up to 5 [A rms].

The system can also operate as a poliphase system with up to 6 channels of voltage and/or current, by controling the phase angle between the signals.

# ÍNDICE

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO


1.1 - Considerações Iniciais 2
1.2 - O Programa para Composição de Sinais 3
1.3 - Gravação das Memórias 4
1.4 - O Gerador de Ondas Sintetizadas 5
1.5 - Módulo de Amplificaço 6
1.6 - Assuntos Abordados 7


## CAPÍTULO 2 - O GERADOR DE ONDAS SINTETIZADAS


2.1 - Introdução 9
2.2 - Memórias 9
2.3 - Endereçamento das Memórias 11
2.4 - Mudança de Página da "EPROM" 13
2.5 - Circuito de Defasamento Angular 14
2.6 - Programação de Defasamento 15
2.7 - Leitura do ângulo de Defasagem 17
2.7.1- Programação das "EPROMs" decodificadoras Binário Pleno x "BCD" 19
2.8 - Fontes de Alimentação e Base de Tempo 21
2.9 - Conversão Digital para Analógico 23
2.10 - Adaptações para a Otimização do Gerador 25
2.10.1- Variação dinâmica de defasagem 25
2.10.2- "Anti-Bouncing" 28
2.11 - O Circuito Gerador Completo 28


## CAPÍTULO 3 - O PROGRAMA GERADOR DE FUNÇÕES


3.1 - Introdução 35
3.2 - Desenvolvimento 36
3.2.1- Reprodução de ondas padrão 37
3.2.2- Sintetização harmônica 39
3.2.3- Reprodução ponto-a-ponto 42
3.2.4- Consulta arquivo 45

3.2.5- Efetuar cálculos 45
3.2.5.1 Cálculo do valor médio 46
3.2.5.2 Cálculo do valor eficaz 47
3.2.5.3 Cálculo da potência ativa 48
3.2.5.4 Cálculo da potência aparente e reativa 49
3.2.6- Análise harmônica 50

## CAPÍTULO 4 - AMPLIFICADORES PARA CORRENTE E TENSÃO

4.1 - Introdução 54
4.2 - O Amplificador de Corrente 54
4.2.1- Distorção de cruzamento 56
4.2.2- Compensação de distorção de cruzamento 58
a) compensaço por pré-polarização 58
b) compensação por realimentação 61
4.3 - O Amplificador de Tensão 66
4.3.1 - Princípio de funcionamento 68
4.3.2 - Elevação da tensão de saída 69
4.3.3 - Redução de distorções 71

## CAPÍTULO 5 - OPERAÇÃO DO EQUIPAMENTO

5.1 - Introdução 79
5.2 - Alimentação do Equipamento 80
5.3 - Reprodução de Sinais 80
5.4 - Seleção das formas de Onda 81
5.5 - Variação de Defasagem 81
5.6 - Amplificação de Corrente e Tensão 81

## CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES FINAIS

6.1 - Introdução 84
6.2 - Ensaios Realizados Utilizando o Sistema Gerador de Sinais 84
6.2.1 - Introdução 84
6.2.2 - Desenvolvimento 85
a) Medida de tensão 85

b) Medida de Corrente 88
c) Medida de potência 90
d) Análise dos resultados 93

6.3 - Limitações 94
6.4 - Aplicações 94
6.5 - Futuros Trabalhos 95

## - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

## - ANEXOS

ANEXO A-1 - PROGRAMA GERAROM
ANEXO A-2 - CIRCUITAGEM DO MÓDULO PRINCIPAL
ANEXO A-3 - CIRCUITAGEM DO MÓDULO MESTRE
ANEXO A-4 - CIRCUITAGEM DO MÓDULO ESCRAVO
ANEXO A-5 - LISTA DE COMPONENTES EMPREGADOS NOS MÓDULOS PRINCIPAL - MESTRE - ESCRAVO
ANEXO A-6 - LISTAGEM DO PROGRAMA GERADOR DE FUNÇÕES
ANEXO A-7 - CIRCUITAGEM DO AMPLIFICADOR PARA CORRENTE
ANEXO A-8 - LISTA DE COMPONENTES EMPREGADOS NO AMPLIFICADOR PARA CORRENTE
ANEXO A-9 - CIRCUITAGEM DO AMPLIFICADOR PARA TENSÃO
ANEXO A-10 - LISTA DE COMPONENTES EMPREGADOS NO AMPLIFICADOR PARA TENSÃO

# CAPÍTULO 1

# CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

## 1.1- Considerações Iniciais

A exatidão das medidas elétricas vem sendo prejudicada por harmônicos cada vez mais presentes nos sistemas de potência, o que incorre em erros nos equipamentos de medição elétrica tradicionais.

Este trabalho apresenta um sistema gerador de formas de onda eletrônico, para testes e ensaios elétricos, que fornece informações de corrente e tensão nas condições reais de campo, com diversas formas e características, de maneira a auxiliar a análise de desempenho da instrumentação elétrica sob os efeitos de sinais distorcidos.

O sistema desenvolvido recebeu o nome de **Sintetizador de Sinais de Corrente e Tensão** o qual permite reproduzir digitalmente formas de onda diversas, convertendo-as em sinais analógicos.

A obtenção das formas de onda é conseguida através de um programa de microcomputador, desenvolvido de forma a permitir a composição de uma função qualquer a partir de um espectro de freqüência ou a partir dos valores instantâneos e discretizados de uma forma de onda conhecida. As formas de onda obtidas através desse programa são gravadas em memórias programáveis "EPROMs" ( "Erasable Programable Read Only Memory" ) utilizando-se um gravador de "EPROM". As memórias gravadas são levadas a um reprodutor de sinais denominado **gerador de ondas sintetizadas** que processa a conversão dos sinais digitais nelas gravados em sinais analógicos providenciando, em seguida, a amplificação destes através de um módulo de amplificação desenvolvido para esse fim.

Em sua configuração básica, o equipamento possui dois canais os quais permitem reproduzir sinais de corrente e tensão, respectivamente, a níveis compatíveis com a maioria da instrumentação elétrica, como também qualquer ângulo de defasagem entre os dois sinais, de maneira que, situações reais de campo diversas possam ser conseguidas.

É um equipamento portátil, flexível e versátil que fornece condições para estudos da influência de harmônicos na instrumentação elétrica em geral.

A figura 1.1 mostra o diagrama em blocos desse sistema.

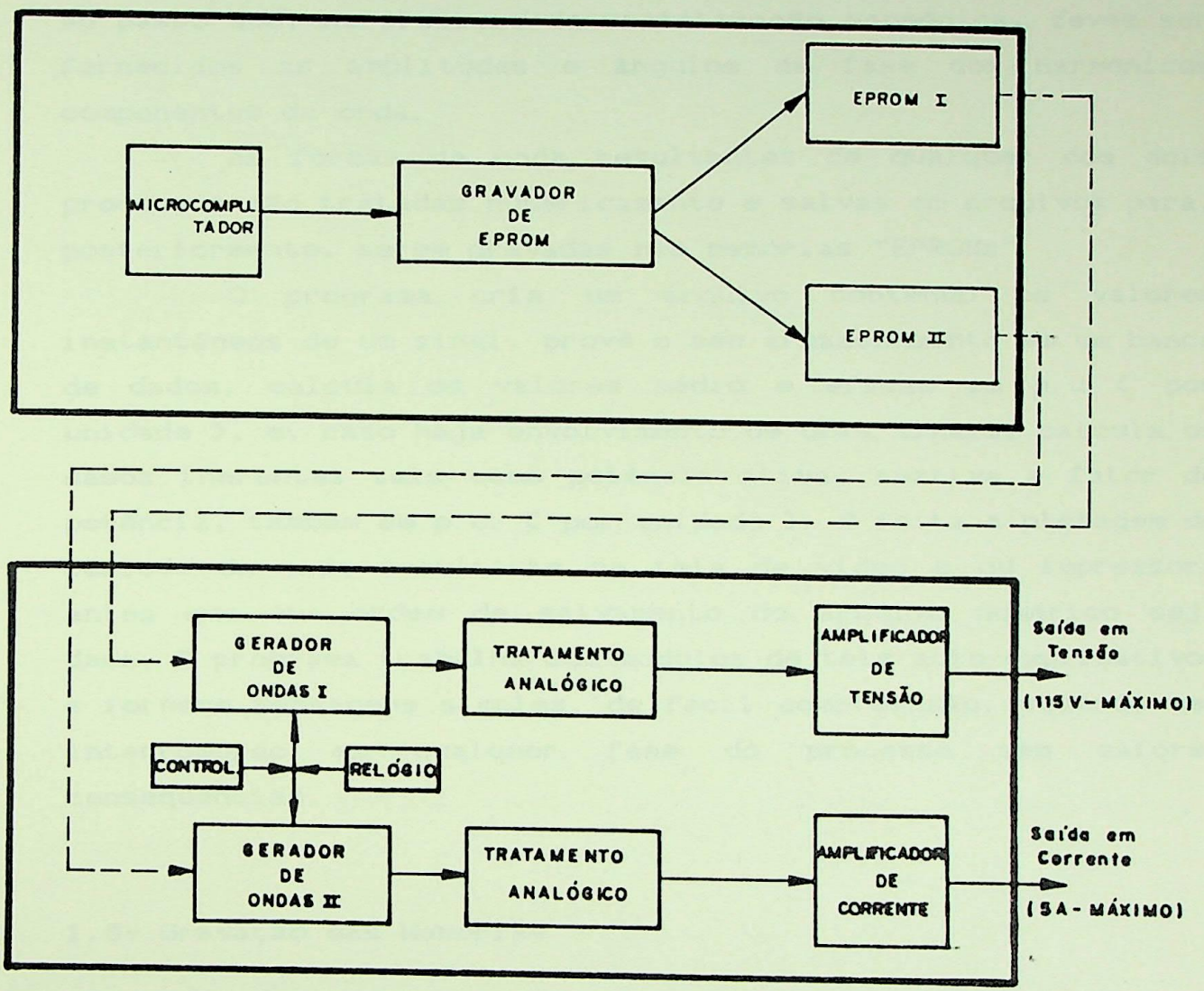



**FIG 1.1 DIAGRAMA EM BLOCOS DO SISTEMA SINTETIZADOR DE SINAIS ELETRICOS**

## 1.2- O Programa para Composição de Sinais

Foi desenvolvido um programa, cuja finalidade fundamental é a geração de arquivos numéricos contendo os valores instantâneos e discretizados de um período de uma onda

obtida a partir de uma recomposição ponto-a-ponto ou através de uma sintetização harmônica.

Em se tratando de uma recomposição ponto-a-ponto de um sinal, é preenchida uma tabela com os valores instantâneos e discretizados de um período da onda, que se deseja reproduzir, ao passo que, no processo de sintetização harmônica, devem ser fornecidos as amplitudes e ângulos de fase dos harmônicos componentes da onda.

As formas de onda resultantes de qualquer dos dois processos são tratadas numericamente e salvas em arquivos para, posteriormente, serem gravadas nas memórias "EPROMs".

O programa cria um arquivo contendo os valores instantâneos de um sinal, provê o seu armazenamento em um banco de dados, calcula os valores médio e eficaz em p.u ( por unidade ), e, caso haja envolvimento de dois sinais, calcula os dados inerentes tais como potência ativa, reativa e fator de potência, também em p.u. ( por unidade ). É feita a plotagem do período da onda resultante na tela de vídeo e ou impressora antes que uma ordem de salvamento do arquivo numérico seja dada. O programa trabalha com módulos de tela auto-explicativos e fornece mensagens simples, de fácil compreensão, podendo ser interrompido em qualquer fase do processo sem maiores conseqüências.

## 1.3- Gravação das Memórias

As formas de onda compostas pelo programa e salvas em forma de arquivos numéricos são copiadas em memórias programáveis. A essa operação, dá-se o nome de gravação de "EPROM" que, para tal, utiliza-se um equipamento denominado gravador de "EPROM" o qual é conectado ao microcomputador e vem acompanhado de um programa utilizado para possibilitar acessar um arquivo numérico em um banco de dados e copiá-lo para uma memória programável conforme representado na figra 1.2 .

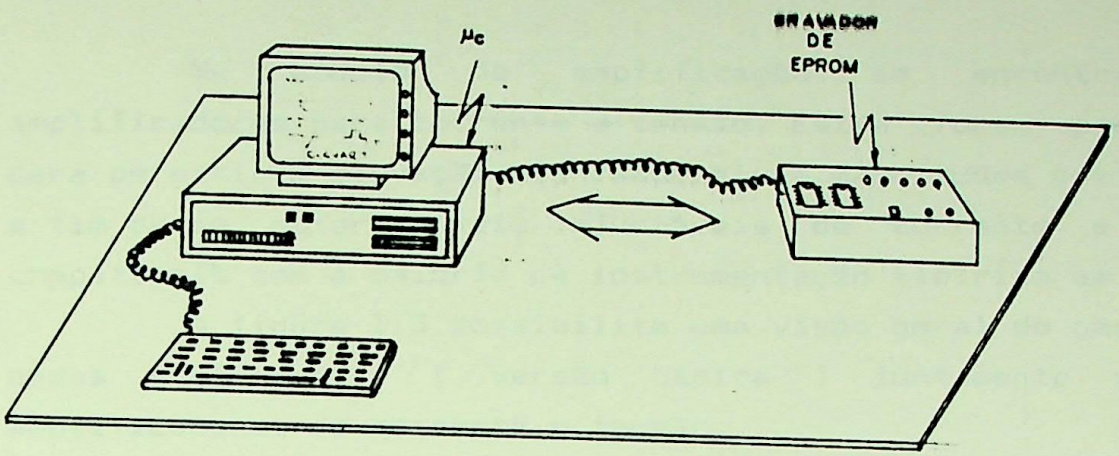



FIGURA 1.2 GRAVAÇÃO DE "EPROM"

## 1.4- O Gerador de Ondas Sintetizadas

É a parte do sistema que reproduz analogicamente os sinais previamente gravados nas memórias de modo a obter-se, sob uma condição satisfatória de resolução, sinais de corrente e tensão com possibilidade de defasamento entre eles.

Para executar esta tarefa, o gerador de ondas sintetizadas é constituído de:

- Contadores;
- Memórias Programáveis;
- Conversores digital-analógico;
- Circuito controlador de defasagem angular;
- Circuito para tratamento analógico dos sinais.

Uma das principais características é a obtenção de inúmeras combinações de sinais, permitindo-se, ainda, a mudança do ângulo de defasagem entre eles.

Visando portabilidade, o equipamento foi projetado para operar independentemente do microcomputador, em outras palavras, o equipamento depende do microcomputador somente na fase de gravação das memórias "EPROM's".

## 1.5- Módulo de Amplificação

No módulo de amplificação se encontram os amplificadores para corrente e tensão. Estes foram projetados para permitir a elevação das respectivas magnitudes dos sinais, a fim de se obter níveis ajustáveis de corrente e tensão compatíveis com a maioria da instrumentação elétrica em geral.

A figura 1.3 possibilita uma visão geral do gerador de ondas sintetizadas ( versão básica ) juntamente com os amplificadores de corrente e tensão.

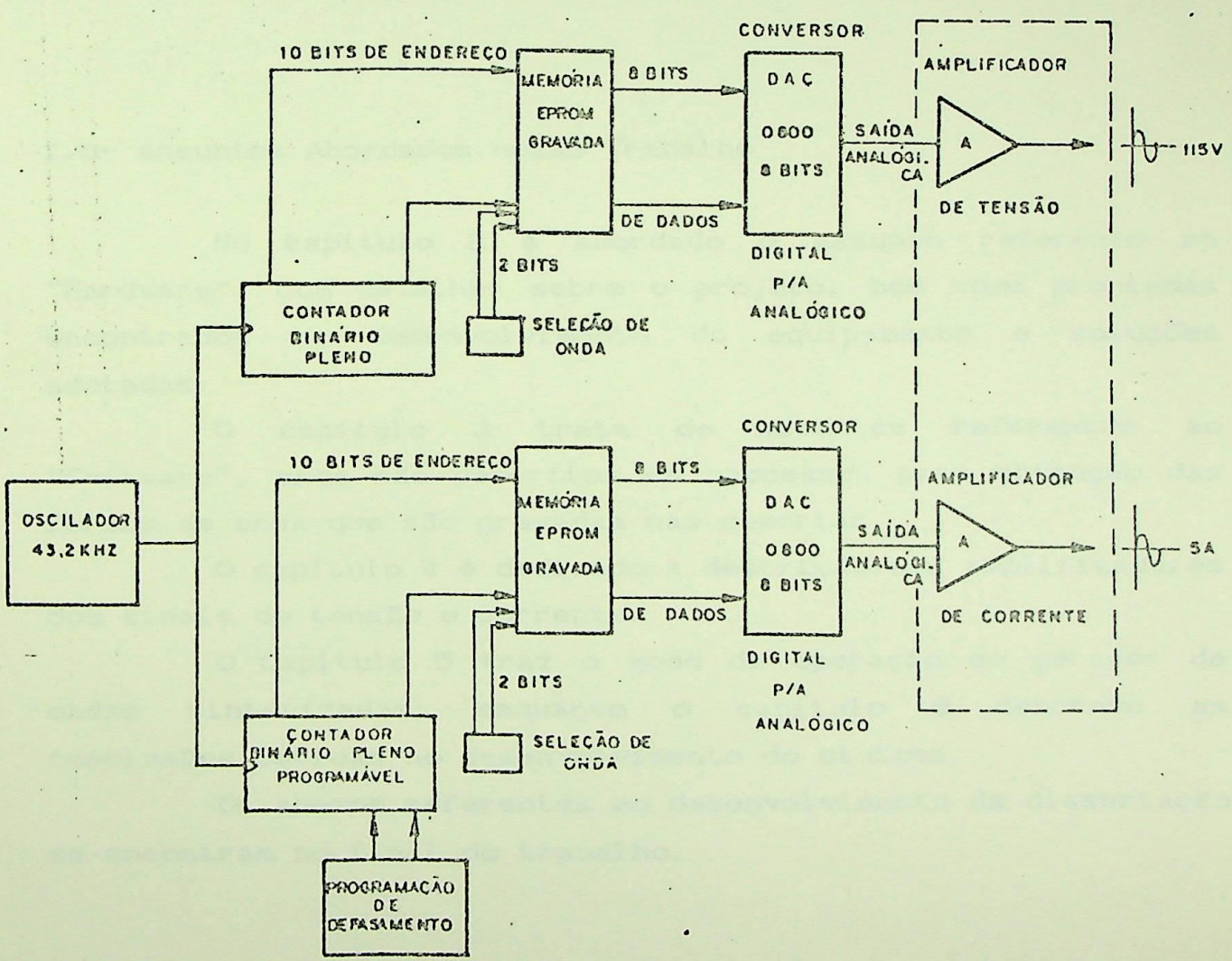



FIG 1.3 VISAO GERAL DO GERADOR DE ONDAS SINTETIZADAS JUNTAMENTE COM OS AMPLIFICADORES

Sendo assim, o conjunto gerador de ondas sintetizadas e amplificadores apresenta as seguintes características gerais:

- Possibilidade de seleção de até 4 ondas diferentes por canal a qualquer instante;
- Possibilidade de mudança do ângulo de defasagem dinamicamente escalonando-o de 0,5 em 0,5 grau;
- Possibilidade de obtenção de freqüência fundamental diferente de 60 Hz;
- Níveis de corrente e tensão ajustáveis e compatíveis com a maioria da instrumentação elétrica em geral ( 5 amperes e 115 volts para sinais senoidais).

## 1.6- Assuntos Abordados nesse Trabalho

No capítulo 2 é abordado o assunto referente ao "Hardware", com detalhes sobre o projeto, bem como problemas encontrados no desenvolvimento do equipamento e soluções adotadas.

O capítulo 3 trata de assuntos referentes ao "Software", onde são descritos os processos para obtenção das formas de onda que são gravadas nas memórias.

O capítulo 4 é dedicado à descrição dos amplificadores dos sinais de tensão e corrente.

O Capítulo 5 traz o modo de operação do gerador de ondas sintetizadas, enquanto o capítulo 6 descreve as conclusões obtidas no desenvolvimento do sistema.

Os anexos referentes ao desenvolvimento da dissertação se encontram no final do trabalho.

# CAPÍTULO 2

# CAPÍTULO 2 - O GERADOR DE ONDAS SINTETIZADAS

## 2.1- Introdução

O gerador de ondas sintetizadas é a parte do sistema responsável pela reprodução dos sinais de tensão e corrente a partir das memórias previamente gravadas, e foi dividido em módulos, os quais são chamados de: módulo principal, módulo mestre e módulo escravo.

No módulo principal, se encontram as fontes de alimentação do equipamento, as conexões de interligação dos módulos e os circuitos osciladores.

O módulo mestre, por sua vez, contém contadores, uma memória gravada, dita como principal, um conversor digital-analógico e circuito para tratamento analógico de sinais.

O módulo escravo diferencia-se do módulo mestre por possuir um circuito de defasamento angular composto por contadores e decodificadores com mostradores digitais para apresentação do ângulo de defasamento. Igualmente ao módulo mestre, possui também uma memória gravada com o sinal a ser reproduzido.

Estão presentes, no módulo principal, conexões para até seis módulos, sendo um módulo mestre e cinco módulos escravos, de forma que, o sinal reproduzido pelo módulo mestre presta-se como referência angular para os sinais reproduzidos pelos outros cinco módulos.

## 2.2- Memórias

Nas memórias dos módulos mestre e escravos, são gravadas, com período completo, quatro formas de onda distintas prévia e numericamente tratadas pelo programa gerador de funções.

São utilizadas as memórias programáveis tipo 2732 de 8 "bits" de dados e 4 "K" de endereços. A figura ( 2.1 ) ilustra o arranjo do vetor de endereços da "EPROM" 2732.

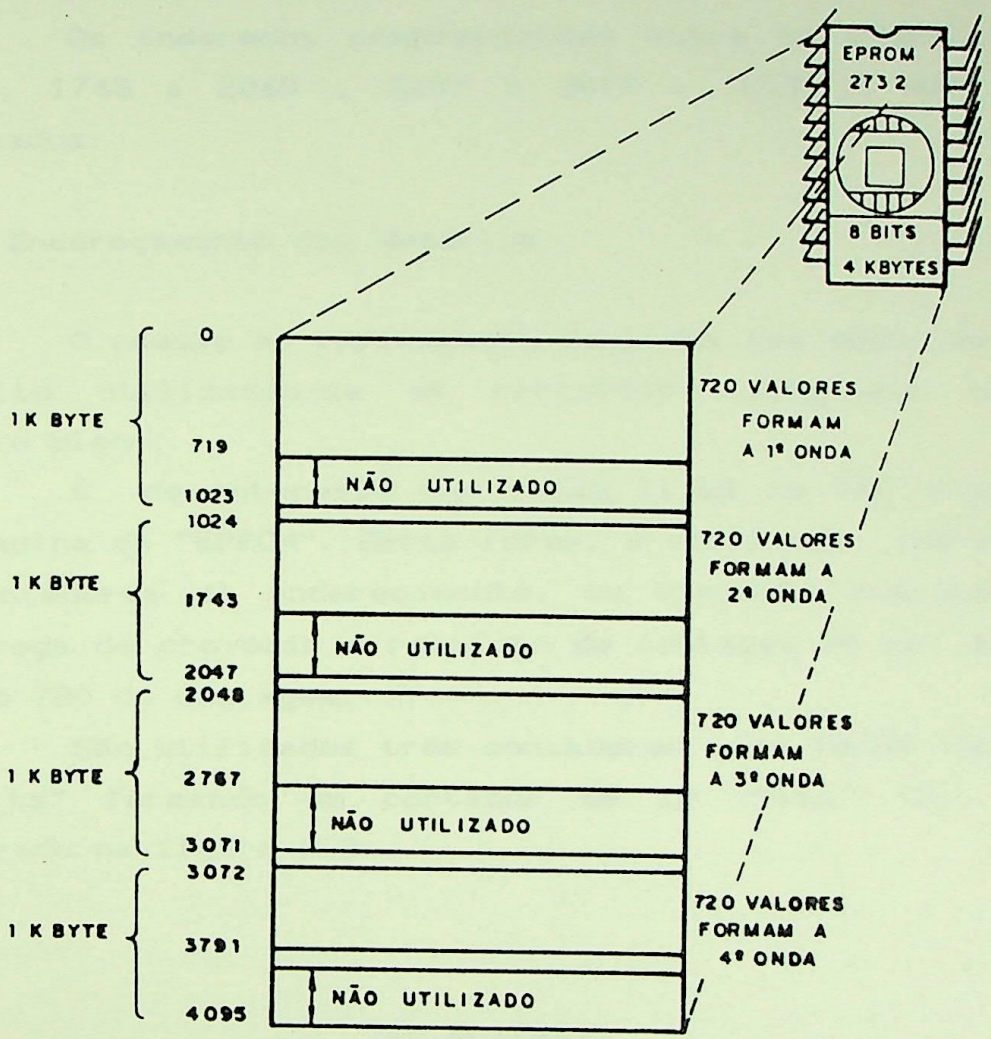



FIG. 2.1 ENDEREÇAMENTO DAS "EPROMs"

Como pode ser observado na figura 2.1 , cada período de onda distinto é representado por 720 pontos. O primeiro valor instantâneo de cada período é gravado no primeiro endereço de cada "Kbyte" da "EPROM", ou seja, a forma de onda 1 inicia-se no endereço 0 e termina no endereço 719 ; a forma de onda 2 inicia-se no endereço 1024 e termina no endereço 1743 ; as formas de onda 3 e 4 iniciam-se nos endereços 2048 e 3072 , terminando nos endereços 2767 e 3791 , respectivamente.

A cada 720 endereços, os quais contêm os valores instantâneos e discretizados de um período de onda gravado, dá-se o nome de página da "EPROM". Desta forma, percebe-se que cada "EPROM" constitui-se de quatro páginas, as quais contêm, isoladamente, valores que representam um período de onda distinto e discretizado.

Os endereços compreendidos entre os endereços 719 a 1024 , 1743 a 2048 , 2767 a 3072 , 3791 a 4095 não são utilizados.

## 2.3 - Endereçamento das Memórias

O acesso às informações contidas nas memórias "EPROMs" é feito utilizando-se os circuitos integrados contadores binário pleno.

É de interesse que sejam lidos os 720 endereços de uma página da "EPROM". Desta forma, é utilizado, juntamente com os contadores de endereçamento, um circuito auxiliar que se encarrega de provocar o reinício de contagem ao ser atingido o número 720 da contagem.

São utilizados três contadores tipo 74193 "up-down" de 4 "bits" formando um contador de 12 "bits" [5], conforme ilustrado na figura 2.2 .

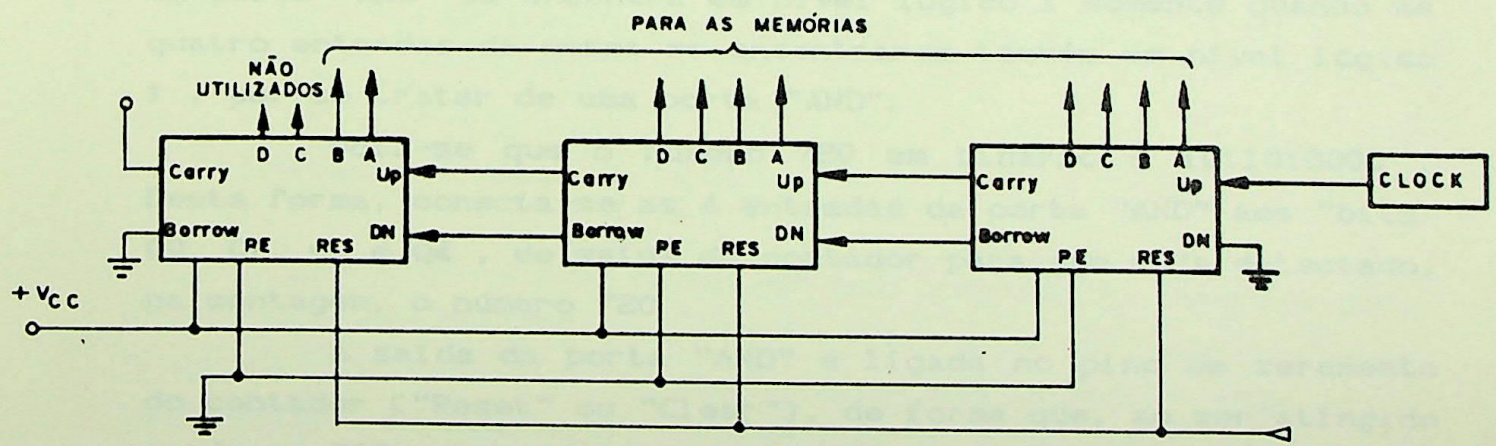



FIG. 2.2 CONTADOR BINÁRIO PLENO DE 12 "BITs"

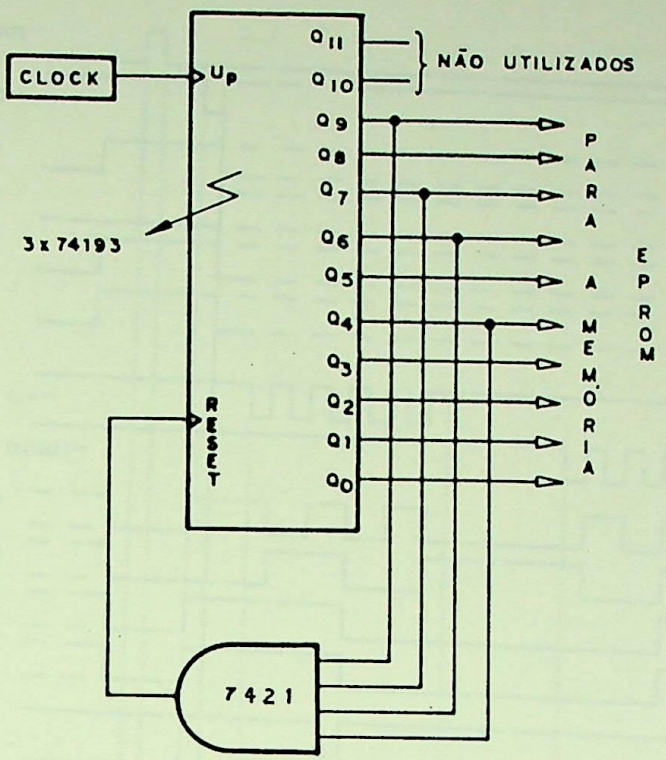



FIG. 2.9 CONTADOR E CIRCUITO DE REINÍCIO DE CONTAGEM

O circuito encarregado de provocar o reinício de contagem é composto por uma porta "AND" de quatro entradas e uma saída do tipo 7421 . Na figura 2.3 , nota-se que a saída da porta "AND" se encontra em nível lógico 1 somente quando as quatro entradas da mesma se encontrarem também em nível lógico 1 , por se tratar de uma porta "AND".

Nota-se que o número 720 em binário é 1011010000 . Desta forma, conecta-se as 4 entradas da porta "AND" aos "bits" Q9, Q7, Q6 e Q4 , de saída do contador para que seja detectado, na contagem, o número 720 .

A saída da porta "AND" é ligada no pino de zeramento do contador ("Reset" ou "Clear"), de forma que, ao ser atingido o número 720 , um pulso de reinício de contagem é fornecido ao contador.

A figura 2.4 representa o diagrama de nível do contador utilizado para formar o contador de 12 "bits".

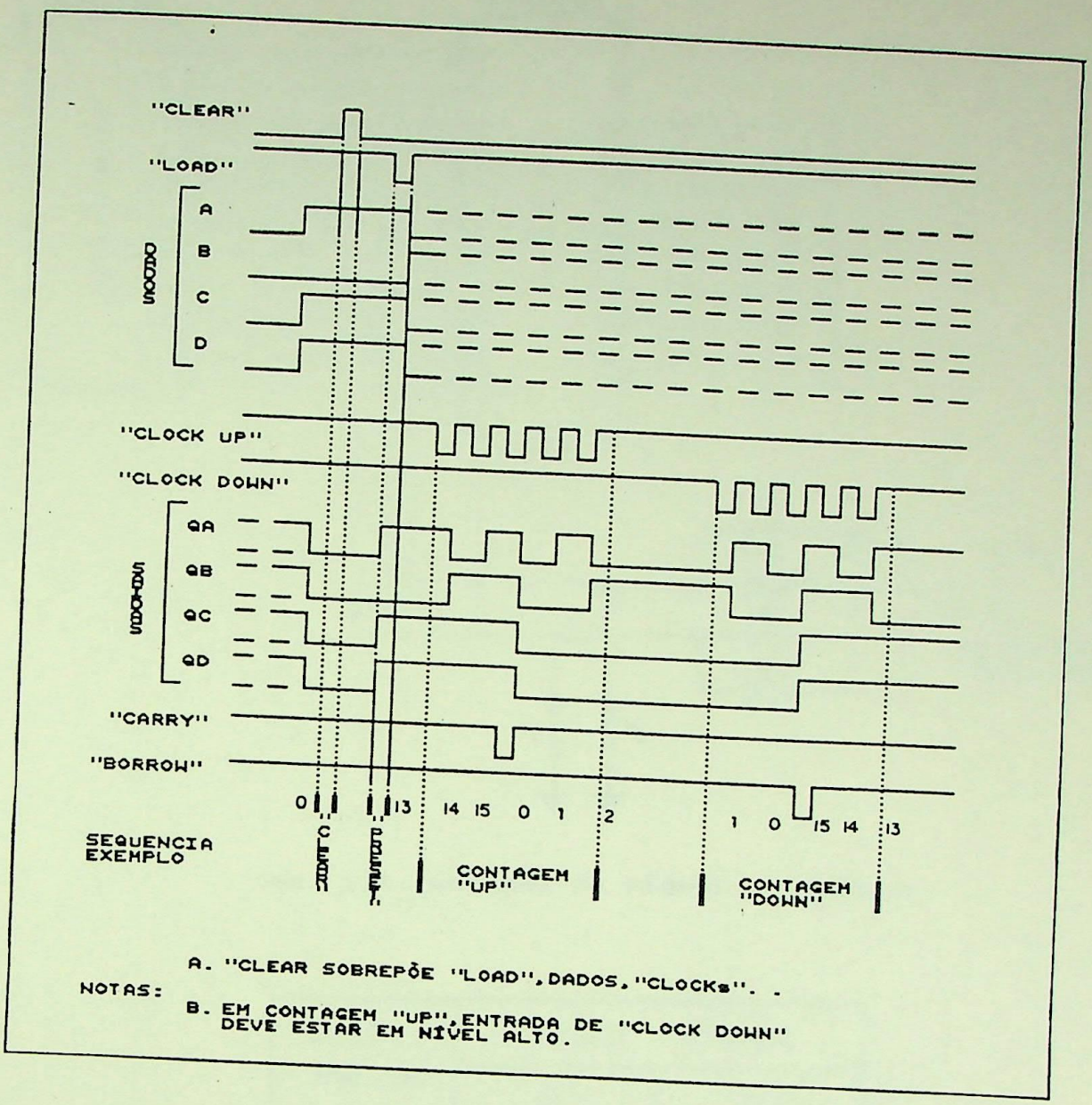



FIG. 2.4 DIAGRAMA DE NÍVEL DO CONTADOR

## 2.4 - Mudança de Página da "EPROM"

Para que outra forma de onda gravada na memória seja selecionada, é utilizado uma chave rotativa de um pólo e quatro posições, que determina o nível lógico nos 2 "bits" mais altos da "EPROM". A figura 2.5 representa a forma de mudança de página da memória. Conforme se observa, existem quatro situações distintas, apresentadas na tabela 2.1 , utilizando-se dois "bits".

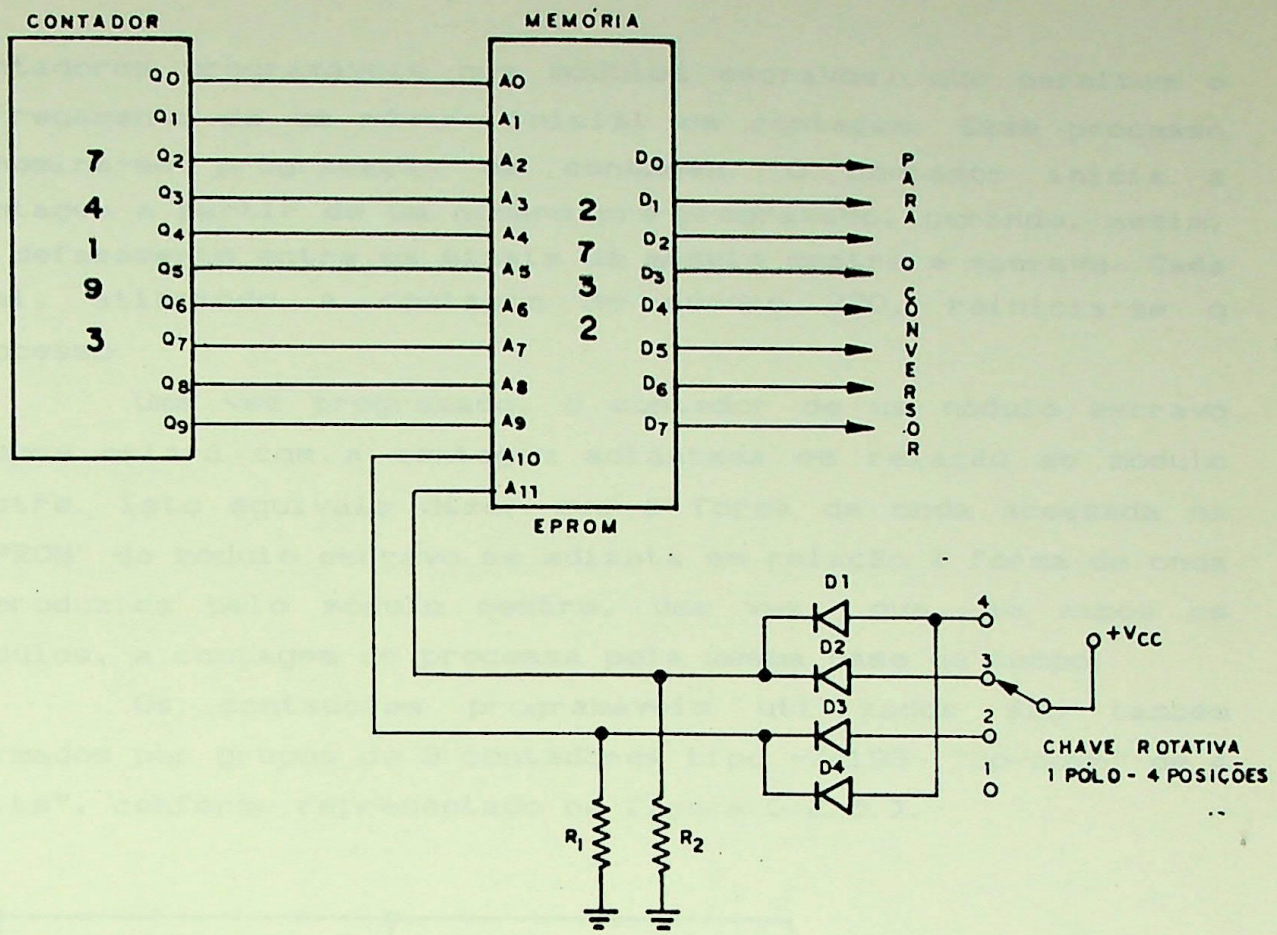



FIG. 2.5 MUDANCA DE PÁGINA DA MEMORIA

| CHAVE/ POSIÇÃO | NÍVEL LÓGICO | |
|---|---|---|
| | A11 | A10 |
| 1 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 1 |
| 3 | 1 | 0 |
| 4 | 1 | 1 |

TABELA 2.1 SELEÇÃO DAS QUATRO PÁGINAS DA MEMÓRIA "EPROM"

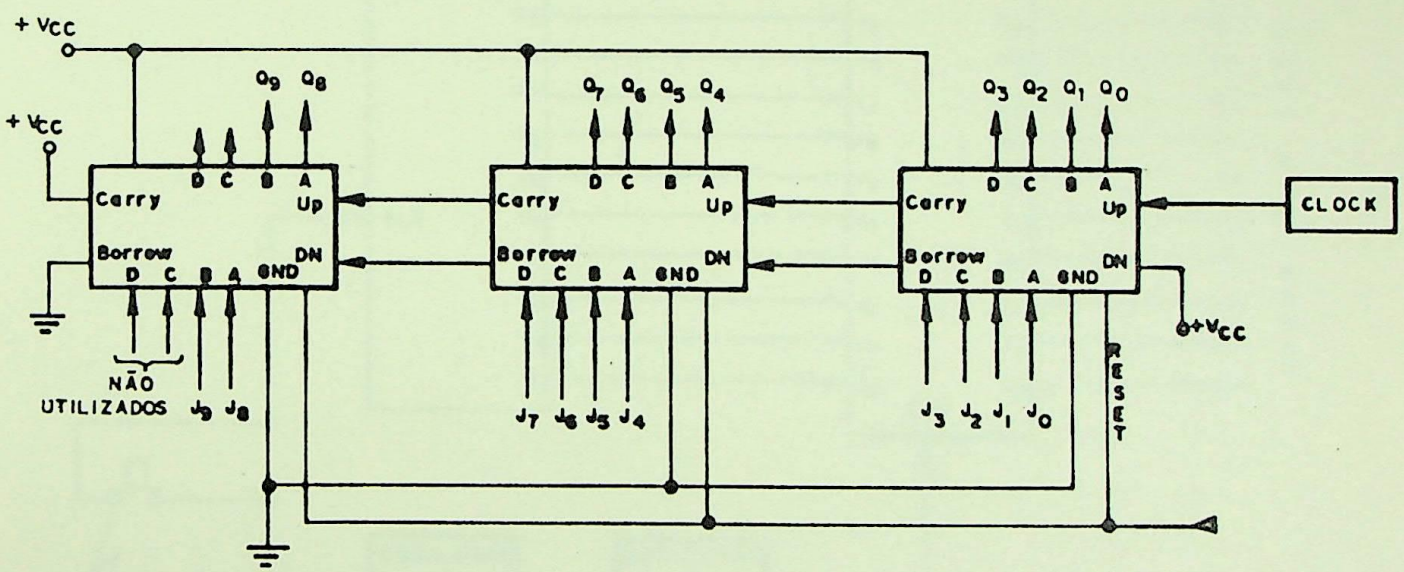
## 2.5 - Circuito de Defasamento Angular

A fim de produzir deslocamento no ângulo de defasegem entre os sinais reproduzidos por módulos distintos, utiliza-se

contadores programáveis nos módulos escravos, que permitem o carregamento de um número inicial de contagem. Esse processo denomina-se programação da contagem. O contador inicia a contagem a partir de um número pré-programado, gerando, assim, um defasamento entre os sinais do módulo mestre e escravo. Cada qual, atingindo a contagem de número 720, reinicia-se o processo.

Uma vez programado, o contador de um módulo escravo sempre estará com a contagem adiantada em relação ao módulo mestre. Isto equivale dizer que a forma de onda acessada na "EPROM" do módulo escravo se adianta em relação à forma de onda reproduzida pelo módulo mestre, uma vez que, em ambos os módulos, a contagem se processa pela mesma base de tempo.

Os contadores programáveis utilizados são também formados por grupos de 3 contadores tipo -74193- "up-down" de 4 "bits", conforme representado na figura ( 2.6 ).




ONDE,

Q - SAÍDAS
J - ENTRADAS PARA PROGRAMAÇÃO

FIG. 2.6 CONTADOR PROGRAMÁVEL DE 12 "BITs"

## 2.6 - Programação de Defasamento

Para programar-se um defasamento entre a contagem do

contador do módulo mestre e a de um módulo escravo, as entradas do contador programável foram ligadas às saídas de um contador secundário denominado contador de programação. Procedendo-se dessa forma, evita-se o uso de chaves para programar o início de contagem, além de possibilitar uma variação rápida e dinâmica na defasagem dos sinais reproduzidos nas saídas dos conversores, o que constitui uma das características de versatilidade do equipamento gerador de ondas sintetizadas.

Conforme se observa na figura 2.7 , para prover a programação atua-se junto ao "clock" do contador de programação. A cada pulso de "clock" deste, um "bit" é incrementado nas entradas de programação do contador programável.

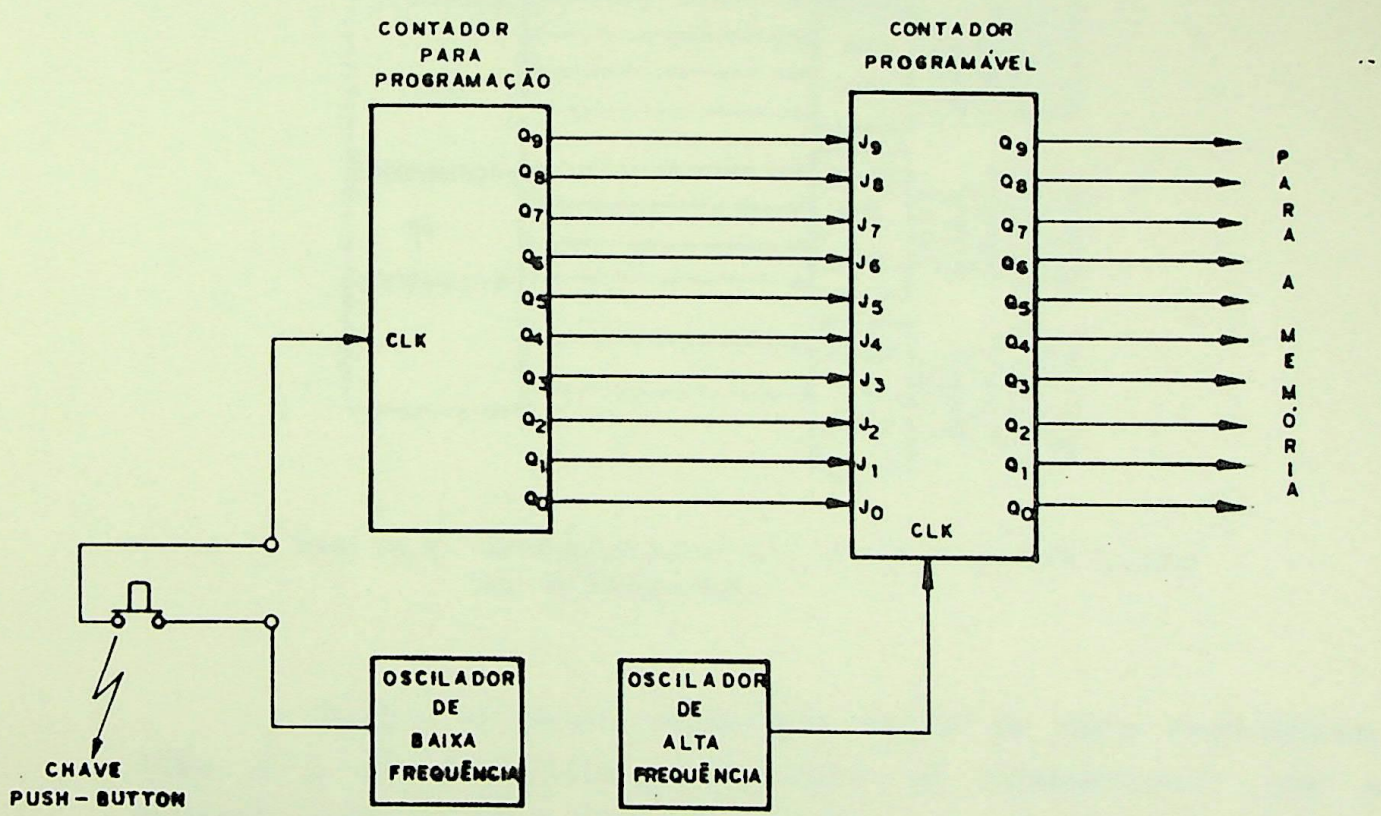



FIG. 2.7 PROGRAMAÇÃO DE DEFASAMENTO DE CONTAGEM

O contador de programação também possui um circuito auxiliar para deteção do ponto de zeramento ( pulso nº 720 = "Reset". ver item 2.3, Fig. 2.3 ) e reinício de contagem, similarmente aos contadores principais.

## 2.7 - Leitura do Ângulo de Defasagem

Visando a facilidade de operação do equipamento, foi providenciada a apresentação do número correspondente ao defasamento entre os contadores do módulo mestre e escravo, em mostradores digitais .

Ligando-se as saídas do contador de programação a decodificadores (binário para sete segmentos) como indicado na figura 2.8 , tem-se um número hexadecimal nos mostradores, o qual representa a defasagem angular entre as formas de onda reproduzidas pelo módulo mestre e módulo escravo.

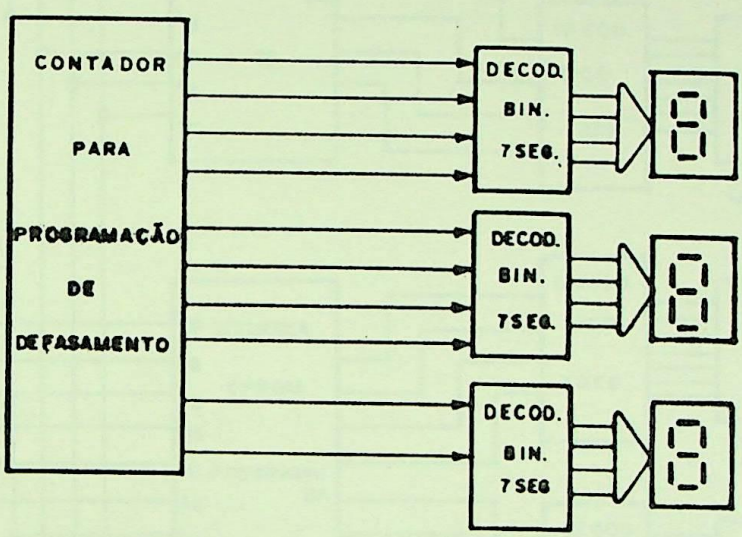



FIG. 2.8 APRESENTAÇÃO DO ÂNGULO DE DEFASAGEM EM HEXADECIMAL

Assim, a menor defasagem entre os dois contadores é $000_H$ e a maior defasagem é $2CF_H$ em hexadecimal, que são respectivamente $0_D$ e $719_D$ em decimal, e, em termos angulares, $000,0^\circ$ e $359,5^\circ$ .

A fim de evitar-se o uso de tabelas e cálculos para proceder a conversão do número hexadecimal, que representa o ângulo de defasagem, em um número decimal, optou-se por apresentar, nos mostradores digitais, um número decimal a 4 dígitos representando a defasagem angular diretamente em graus elétricos.

A figura 2.9 representa a forma pela qual são decodificadas as saídas do contador de programação (binário) em graus (decimal).

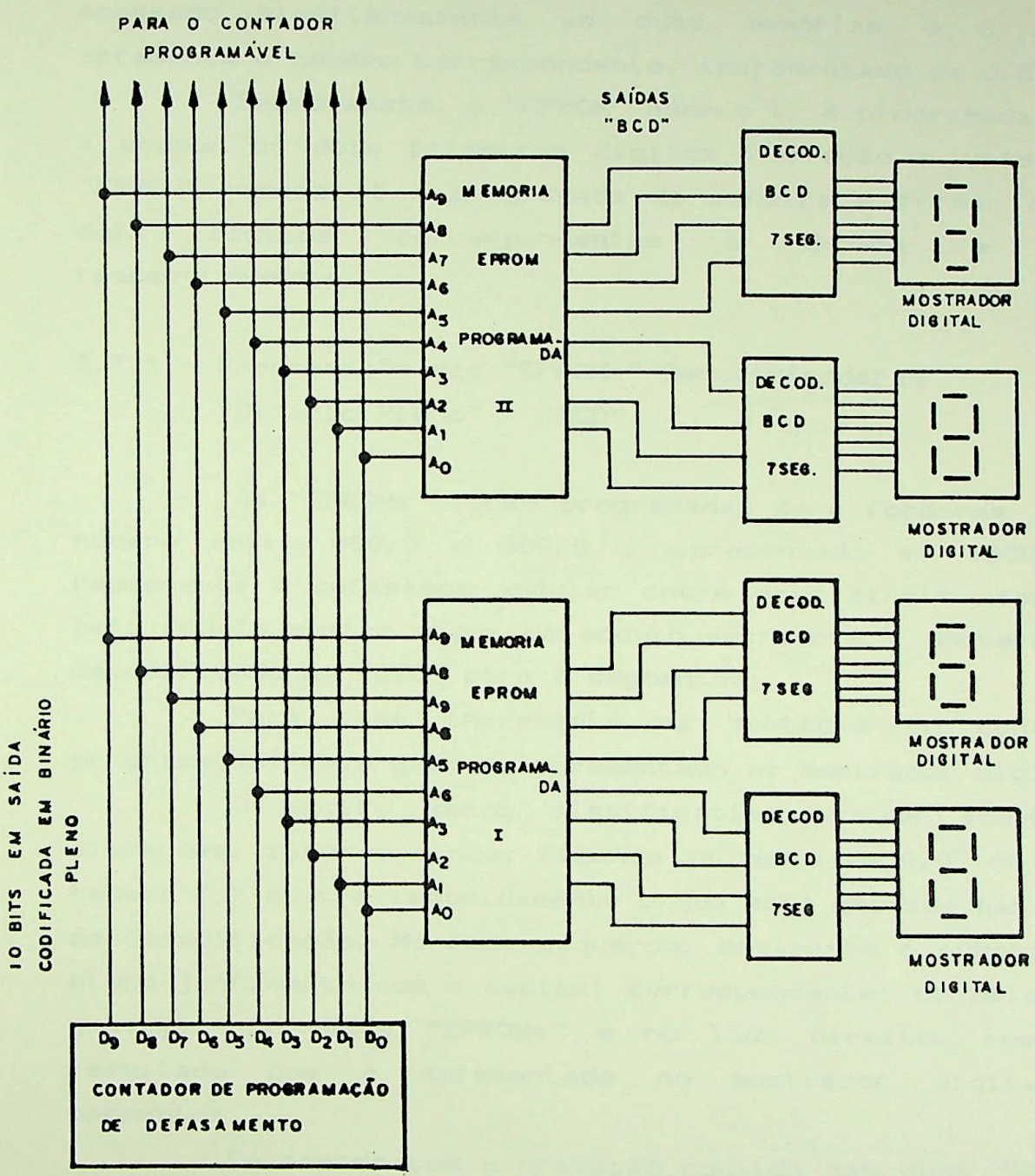



FIG. 2.9 DECODIFICAÇÃO DA DEFASAGEM ANGULAR

Note-se que o barramento de saída do contador de programação é conectado aos barramentos de endereços de duas memórias programadas. São utilizadas memórias "EPROMs" tipo 2716 de 8 "bits" e tanto os 4 "bits" de dados mais altos quanto

os 4 "bits" de dados mais baixos de cada memória são decodificados de "BCD" para 7 segmentos, de forma a obter-se, finalmente, nos mostradores digitais, um número decimal de 4 dígitos.

A cada incremento do contador de programação, é acessado simultaneamente as duas memórias e o mostrador apresenta o número correspondente, incrementado de 0,5 grau.

Sendo assim, a "EPROM" número I é programada de forma a compor os dois primeiros dígitos ( fração e unidade ); a "EPROM" número II é programada de maneira a formar os outros dois dígitos correspondentes à dezena e centena, respectivamente.

2.7.1 - Programação das "EPROMs" Decodificadoras "Binário Pleno" X "BCD"

As "EPROMs" foram programadas para formarem juntas um número entre 000,0 e 359,5 , apresentado em "BCD" , que representa a defasagem angular entre dois sinais reproduzidos pelo módulo mestre e por um módulo escravo e , posteriormente, decodificado de "BCD" para 7 segmentos.

Para cada incremento na contagem do contador de programação, meio grau é incrementado no mostrador digital.

O dígito menos significativo assume somente duas situações: zero ou cinco, fazendo as vezes de $0,0^{\circ}$ ou $0,5^{\circ}$ . A tabela 2.2 mostra resumidamente o que está gravado nas memórias de decodificação. No lado esquerdo, mostra-se o número binário pleno juntamente com o decimal correspondente; no meio, está a gravação das duas "EPROMs" e no lado direito, mostra-se o resultado que é apresentado no mostrador digital de 7 segmentos.

De acordo com a gravação contida nas duas "EPROMs" de decodifição, o dígito de unidade mantém o número apresentado até que o dígito de fração mude de 5 ( cinco ) para 0 ( zero ).

O dígito de dezena é incrementado na transição do dígito de unidade de 9 ( nove ) para 0 ( zero ).

O dígito de centena, e último, é incrementado na transição do dígito de dezena de 9 ( nove ) para 0 ( zero ).

O programa, **GeraRom** , desenvolvido para gerar os

números em hexadecimal, utilizados na conversão dos números binários para "BCD", está apresentado no anexo A-1 .

| BINÁRIO PLENO | DECIMAL | MEMÓRIA II | MEMÓRIA I | MOSTRADORES |
|---|---|---|---|---|
| 0000000000 | 0 | 0000 0000 | 0000 0000 | 000,0 |
| 0000000001 | 1 | 0000 0000 | 0000 0101 | 000,5 |
| 0000000010 | 2 | 0000 0000 | 0001 0000 | 001,0 |
| 0000000011 | 3 | 0000 0000 | 0001 0101 | 001,5 |
| 0000000100 | 4 | 0000 0000 | 0010 0000 | 002,0 |
| 0000000101 | 5 | 0000 0000 | 0010 0101 | 002,5 |
| 0000000110 | 6 | 0000 0000 | 0011 0000 | 003,0 |
| 0000000111 | 7 | 0000 0000 | 0011 0101 | 003,5 |
| 0000001000 | 8 | 0000 0000 | 0100 0000 | 004,0 |
| 0000001001 | 9 | 0000 0000 | 0100 0101 | 004,5 |
| 0000001010 | 10 | 0000 0000 | 0101 0000 | 005,0 |
| 0000001011 | 11 | 0000 0000 | 0101 0101 | 005,5 |
| 0000001100 | 12 | 0000 0000 | 0110 0000 | 006,0 |
| 0000001101 | 13 | 0000 0000 | 0110 0101 | 006,5 |
| 0000001110 | 14 | 0000 0000 | 0111 0000 | 007,0 |
| 0000001111 | 15 | 0000 0000 | 0111 0101 | 007,5 |
| 0000010000 | 16 | 0000 0000 | 1000 0000 | 008,0 |
| 0000010001 | 17 | 0000 0000 | 1001 0101 | 008,5 |
| 0000010010 | 18 | 0000 0000 | 1010 0000 | 009,0 |
| 0000010011 | 19 | 0000 0000 | 1010 0101 | 009,5 |
| 0000010100 | 20 | 0000 0001 | 0000 0000 | 010,0 |
| 0000010101 | 21 | 0000 0001 | 0000 0101 | 010,5 |
| . | . | . | . | . |
| 0001100010 | 98 | 0000 0100 | 1001 0000 | 049,0 |
| 0001100011 | 99 | 0000 0100 | 1001 0101 | 049,5 |
| 0001100100 | 100 | 0000 0101 | 0000 0000 | 050,0 |
| 0001100101 | 101 | 0000 0101 | 0000 0101 | 050,5 |
| . | . | . | . | . |
| 0011000110 | 198 | 0000 1001 | 1001 0000 | 090,0 |
| 0011000111 | 199 | 0000 1001 | 1001 0101 | 090,5 |
| 0011001000 | 200 | 0001 0000 | 0000 0000 | 100,0 |
| 0011001001 | 201 | 0001 0000 | 0000 0101 | 100,5 |
| 0011001010 | 202 | 0001 0000 | 0001 0000 | 101,0 |
| . | . | . | . | . |
| 0101000000 | 320 | 0001 0110 | 0000 0000 | 160,0 |
| 0101000001 | 321 | 0001 0110 | 0000 0101 | 160,5 |
| 0101000010 | 322 | 0001 0110 | 0001 0000 | 161,0 |
| 0101000011 | 323 | 0001 0110 | 0001 0101 | 161,5 |
| 0101000100 | 324 | 0001 0110 | 0010 0000 | 162,0 |
| 0101000101 | 325 | 0001 0110 | 0010 0101 | 162,5 |
| . | . | . | . | . |
| 1011001011 | 715 | 0011 0101 | 0111 0101 | 357,5 |
| 1011001100 | 716 | 0011 0101 | 1000 0000 | 358,0 |
| 1011001101 | 717 | 0011 0101 | 1000 0101 | 358,5 |
| 1011001110 | 718 | 0011 0101 | 1001 0000 | 359,0 |
| 1011001111 | 719 | 0011 0101 | 1001 0101 | 359,5 |

TABELA 2.2 DECODIFICAÇÃO BINÁRIO PLENO x "BCD" x 7 SEGMENTOS

## 2.8 - Fontes de Alimentação e Base de Tempo

O equipamento gerador de ondas sintetizadas tem um módulo, dito principal, que contém as fontes de alimentação e os osciladores utilizados como base de tempo dos módulos mestre e escravos.

É utilizada uma fonte de tensão contínua de 5 volts e uma fonte simétrica de ± 12 volts também contínua.

A fonte de ± 12 volts é utilizada para alimentação do conversor Digital-Analógico e a de 5 volts para alimentação dos demais componentes do gerador de ondas sintetizadas, bem como dos mostradores digitais.

O equipamento gerador de ondas sintetizadas visa reproduzir sinais analógicos, em princípio, na freqüência fundamental de 60 Hz e trabalha com um número fixo de valores instantâneos, que representam o sinal, totalizando 720 pontos discretizados.

Para obter-se sinais na saída do conversor digital-analógico, na freqüência fundamental de 60 Hz, atua-se junto à freqüência de "clock" dos contadores encarregados de acessar os endereços das memórias "EPROMs" ( contadores principais ).

A freqüência do oscilador da base de tempo que implica numa determinada freqüência fundamental ( f ), na saída do conversor digital-analógico, é obtida multiplicando-se o número de pontos discretos do sinal pela freqüência fundamental desejada, conforme a equação 2.1 .

Assim, tem-se :

Para 60 Hz

f = "720 pontos" x "60 Hz" ➡ ( 2.1 )

f = "43.200 Hz".

A figura 2.10 ilustra o oscilador encarregado de produzir a freqüência de **43200 Hz** , onde, é utilizado um circuito integrado tipo 555 operando como astável.

Essa configuração não permite uma estabilidade muito boa de freqüência devido ao fato de trabalhar com constante de tempo RC . No entanto, para aplicações que necessitem de alta estabilidade, deve ser utilizada uma base de tempo a cristal.

Também está presente, no módulo principal, um circuito divisor de freqüência usado para obter as baixas freqüências de "clock" , utilizadas para avançar os contadores de programação. São utilizadas quatro freqüências, de modo a facilitar o ajuste do ângulo de defasagem. O circuito divisor de freqüência está representado na figura 2.11. São utilizados dois contadores, que dividem a freqüência de 43200 Hz obtendo-se: 0,5 Hz, 1,0 Hz, 20Hz e 100 Hz , aproximadamente .

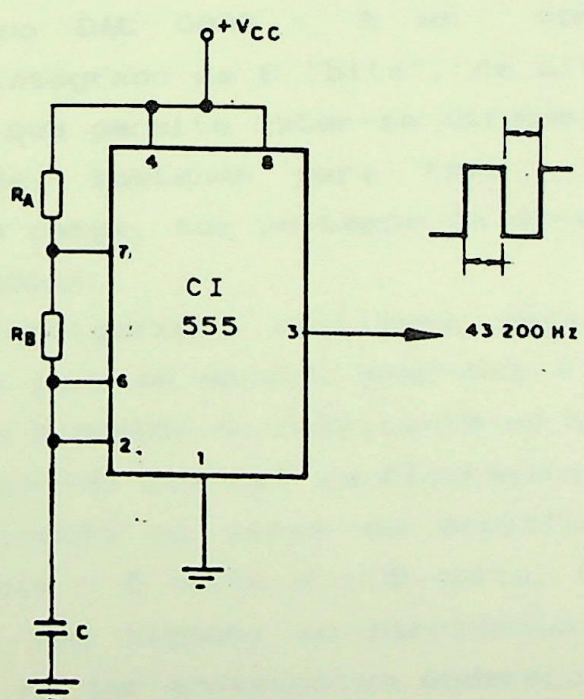



FIG. 2.10 OBTENÇÃO DA FREQÜÊNCIA DE 43,2 KHZ

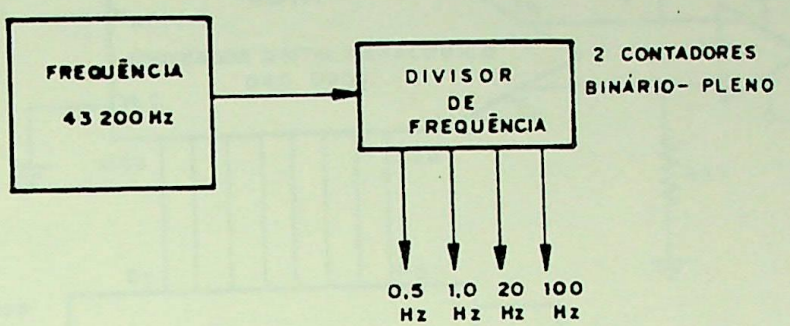



FIG. 2.11 FREQÜÊNCIA DE VARIAÇÃO DE DEFASAGEM

## 2.9 - Conversão Digital para Analógico

Para proceder a conversão dos dados gravados nas memórias "EPROMs" em valores analógicos, utiliza-se um circuito integrado tipo **DAC 0800** . É um conversor **Digital para Analogico** , integrado de 8 "bits", de alta velocidade e saída em corrente, que permite obter-se diferentes valores de tensão em sua saída, bastando para isto , alterar valores de resistores de carga, com um tempo de conversão da ordem de 100 ns (nanosegundos).

A configuração utilizada para o módulo mestre e identicamente para os módulos escravos é apresentada na figura 2.12 conforme sugestão do fabricante do conversor.[5]

De acordo com tal configuração, os valores máximos e minimos de tensão na saída do amplificador operacional são respectivamente + 5 volts e - 5 volts. Os 8 "bits" de entrada do conversor são ligados ao barramento de saída da "EPROM". Desta forma, ao ser acessado um endereço da "EPROM", um dado é escrito na entrada do conversor e um valor fixo de tensão aparece na saída do amplificador operacional, até que outro endereço da "EPROM" seja acessado e o processo se repita.

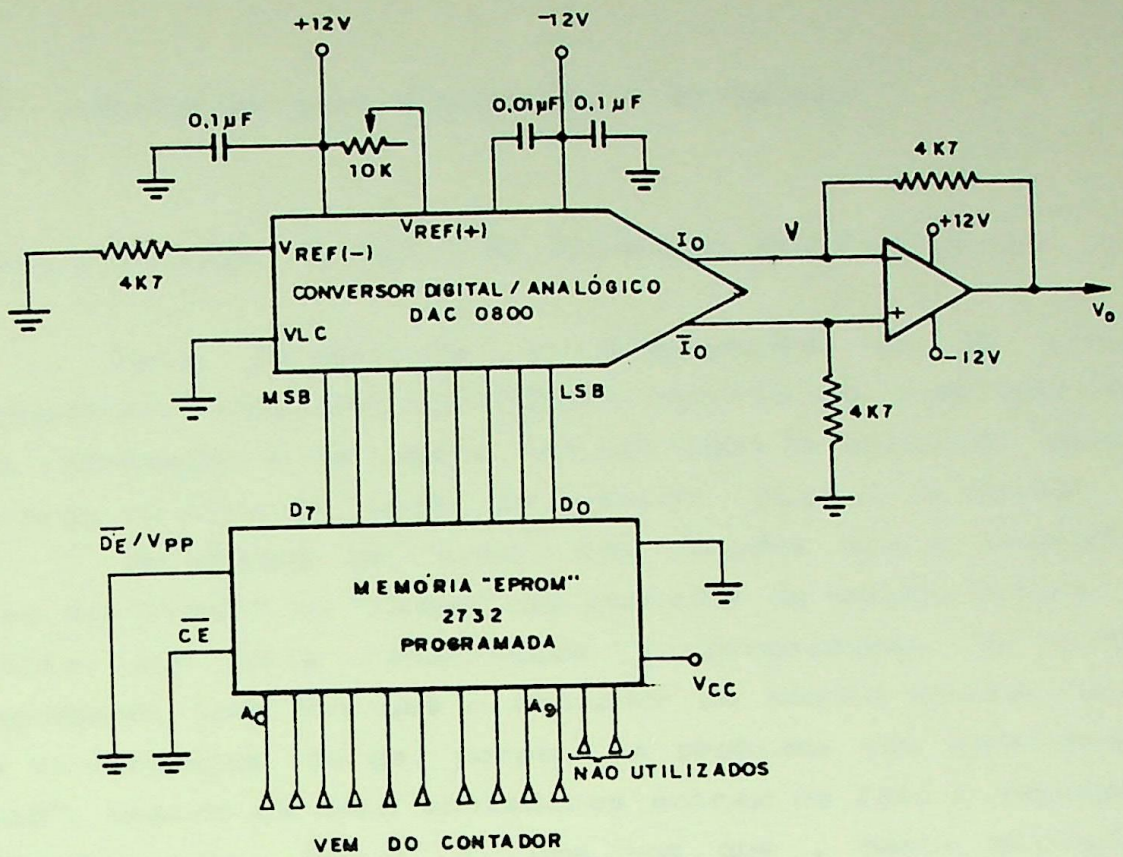



FIG. 2.12 CONVERSÃO DIGITAL-ANALÓGICA

Pelo fato de o conversor Digital-Analógico ter saída em corrente, utiliza-se o amplificador operacional tipo 741 como conversor de corrente em tensão [13, 15] , ou seja, a tensão de saída é proporcional à corrente de entrada como mostra a equação 2.2 .

$$V - V_o = 4{,}7 \cdot 10^3 \cdot I_o \Rightarrow$$

$$0 - V_o = 4{,}7 \cdot 10^3 \cdot I_o \Rightarrow$$

$$V_o = -4{,}7 \cdot 10^3 \cdot I_o \qquad (2.2)$$

Onde,

- $V$ - Tensão na entrada inversora do amplificador
- $V_o$ - Tensão de saída do amplificador
- $I_o$ - Corrente de saída do DAC 0800

## 2.10 - Adaptações para a Otimização do Gerador

### 2.10.1 - Variação dinâmica de defasagem entre os sinais

Para permitir-se a programação de um contador programável, coloca-se um número binário em suas entradas e esta informação é carregada, ao ser dado um pulso de "Load" ou de carga no pino de "Load" do contador (pino 11 do 74193).

Os pulsos de "Load" são obtidos com a inversão do pulso de "Reset" ou "Clear" do contador do módulo mestre. Isto garante que seja recarregada a programação no contador programável toda vez que o contador do módulo mestre atinge o fim de contagem. Surge, porém, um problema com este pulso de "Load", quando os dois contadores entram em fase ( passagem da defasagem pelo $000,0^{\circ}$ ), uma vez que , nesta situação, o contador programável recebe o seu próprio pulso de "Reset" e um pulso de "Load" com um atraso muito pequeno ( 10 nanosegundos ) [5], ocasionando a perda da programação anterior e, a partir daí, a contagem entra em fase com a contagem do módulo mestre. Isto ocorre devido ao fato de o pulso de "Reset" sobrepor o pulso de "Load" como indicado pelo diagrama de nível na figura 2.13 .

Desta forma, torna-se necessário que o pulso de "Load" seja fornecido com um atraso maior em relação ao pulso de "Reset", o que é conseguido por meio de duas inversões consecutivas do pulso de "Load" através de duas portas inversoras ( CI 7404 ) produzindo um atraso de 20 nanosegundos. A figura 2.14 ilustra os dois pulsos defasados no tempo.

Resumindo, a cada 16,67 milisegundos, o contador recebe um pulso de recarga da programação. Caso haja variação do número binário presente em suas entradas, altera-se a defasagem angular. entre os sinais.

Este sistema de recarregamento funciona como uma confirmação cíclica de programação que permite a variação dinâmica da defasagem.

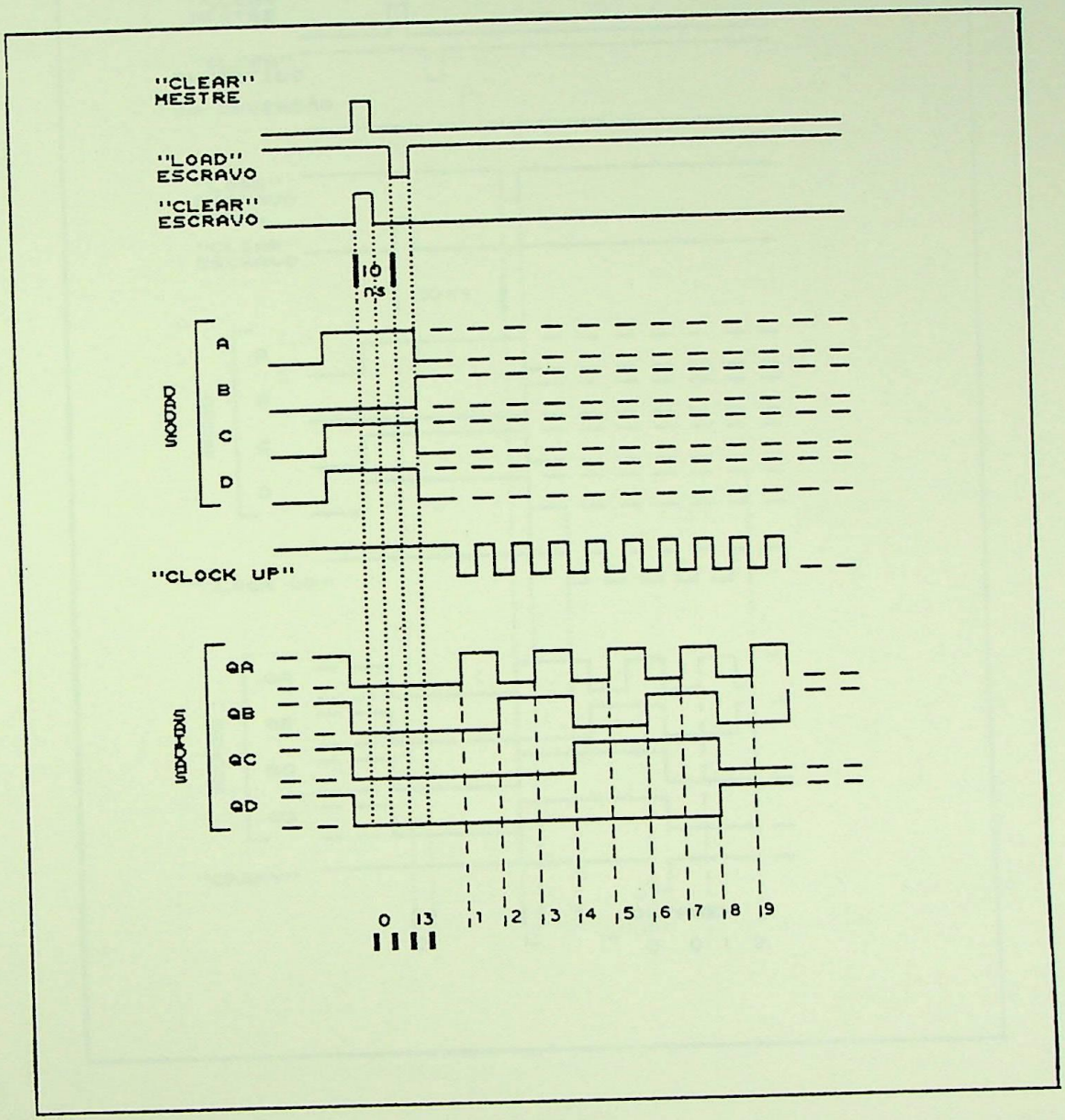



FIG. 2.13 OCORRÊNCIA SIMULTÂNEA DOS PULSOS DE "LOAD" E "RESET"

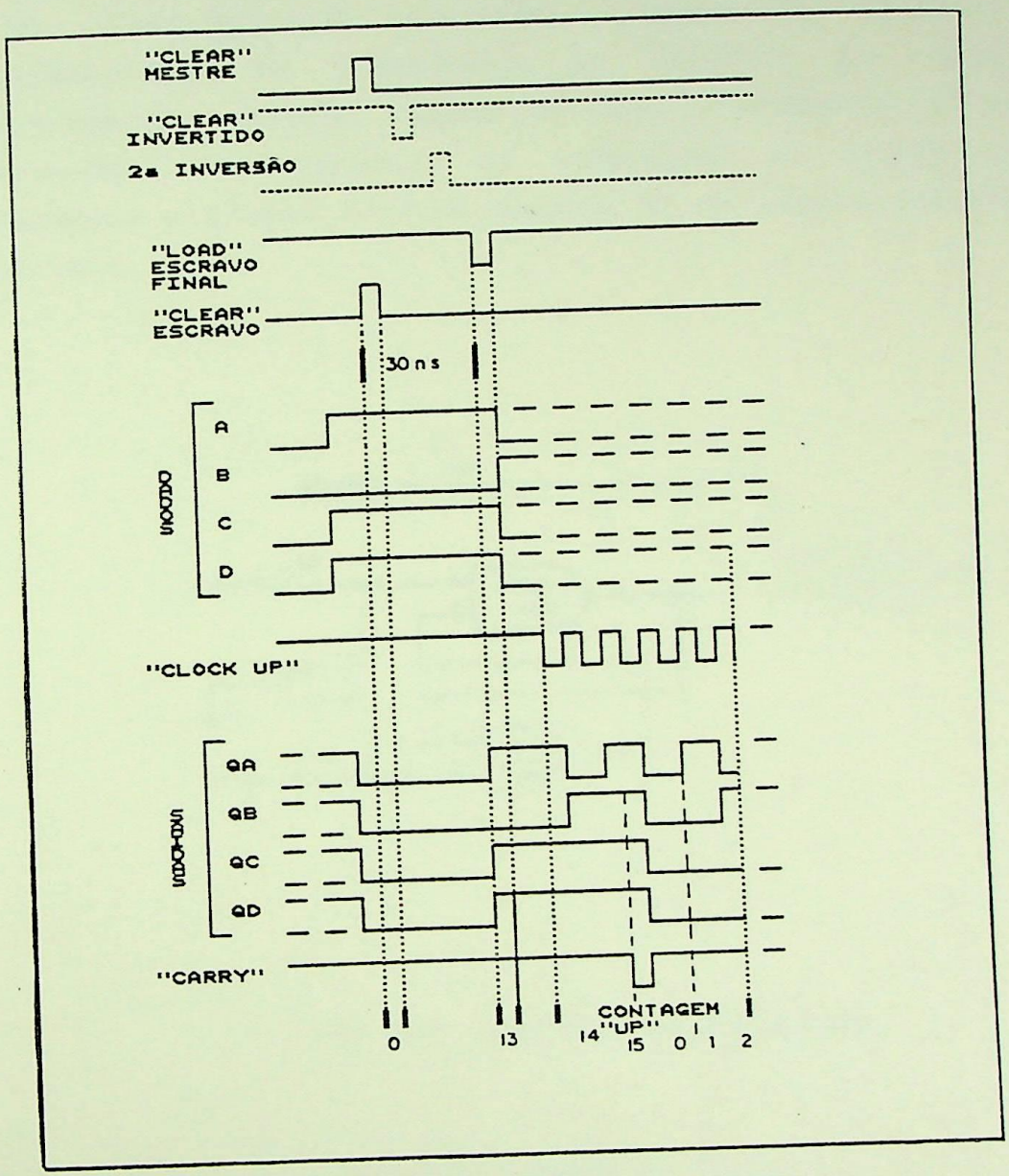



FIG. 2.14 PULSO DE "LOAD" E "RESET" DEFASADOS

## 2.10.2 - "Anti-Bouncing"

Um circuito "anti-bouncing", representado na fig.2.15, é previsto na entrada de "clock" do contador de programação . Este circuito tem a finalidade de evitar ricochetes provenientes do fechamento e abertura dos contatos da chave tipo "Push-Button" utilizada. Esses ricochetes produzem instabilidade na freqüência de "clock" do contador de programação, gerando ruídos de alta freqüência, o que produz variações desordenadas na contagem e, consequentemente, prejudica o ajuste fino do ângulo de defasagem nos mostradores digitais.

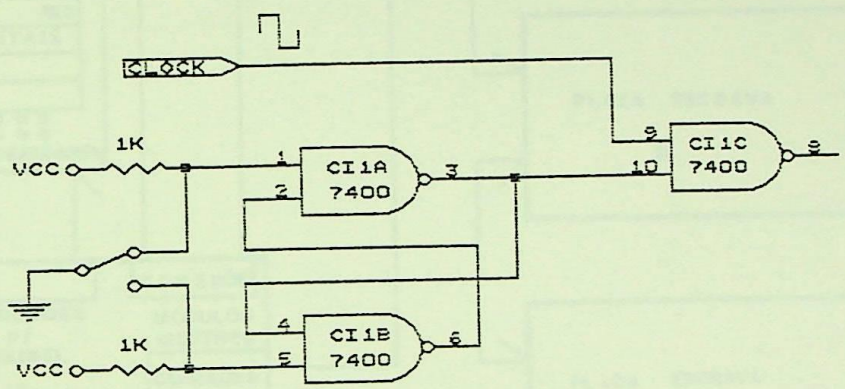



FIG 2.15 CIRCUITO "ANTI-BOUNCING"

## 2.11 - O Circuito Gerador Completo

O circuito completo do gerador de ondas sintetizadas está representado pelo diagrama em blocos da figura 2.16 . Como se observa, o equipamento constitui-se de um módulo mestre ou de referência e cinco módulos escravos, além do módulo principal que constitui a alimentação e base de tempo do equipamento.

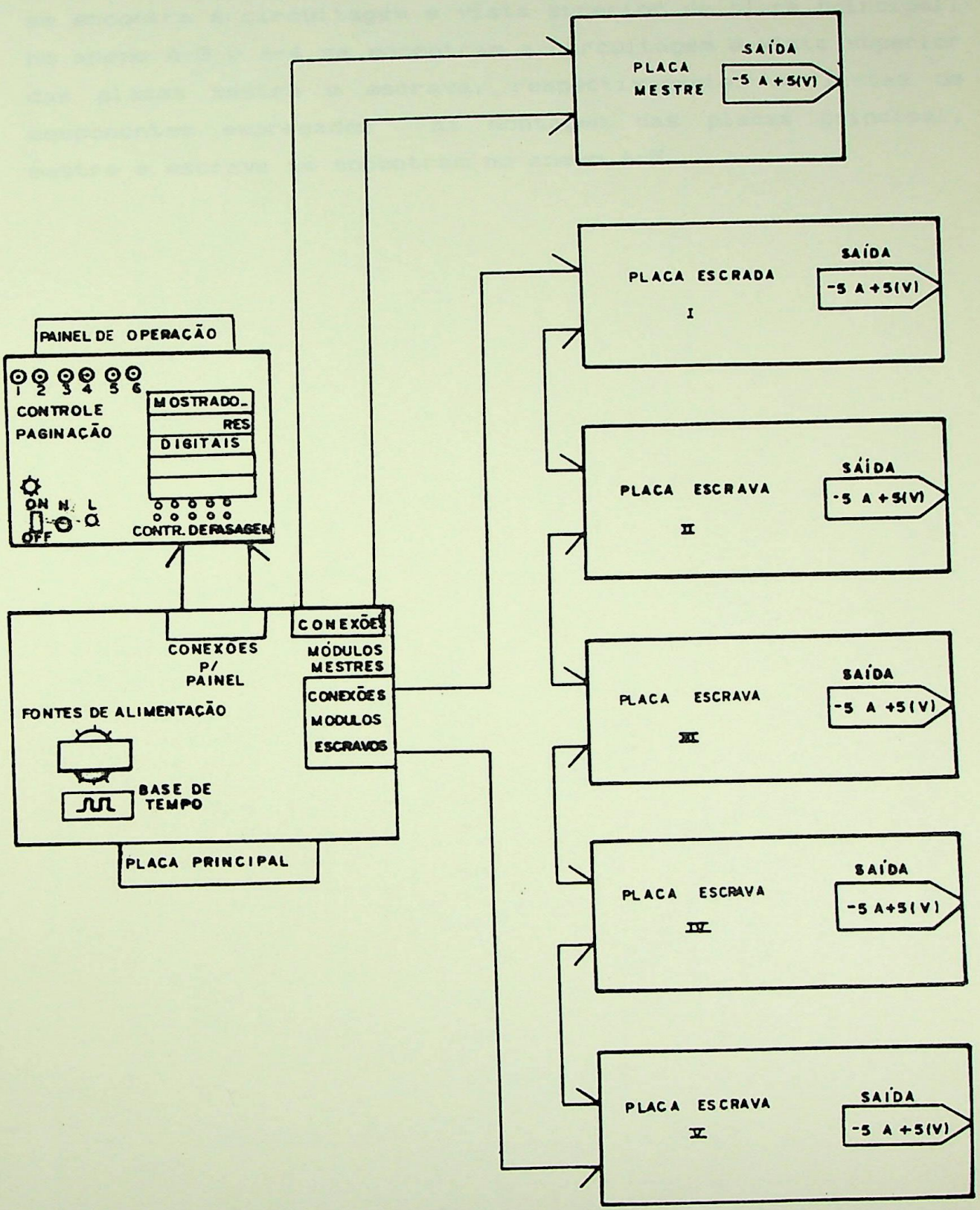



FIG. 2.16 DIAGRAMA EM BLOCOS COMPLETO DO GERADOR DE ONDAS SINTETIZADAS

As figuras 2.17 a , 2.17 b e 2.17 c correspondem aos diagramas esquemáticos para montagem das placas principal, placa mestre e placa escrava, respectivamente. No anexo A-2 , se encontra a circuitagem e vista superior da placa principal, no anexo A-3 e A-4 se encontram a circuitagem e vista superior das placas mestre e escrava, respectivamente. As listas de componentes empregados na montagem das placas principal, mestre e escrava se encontram no anexo A-5.

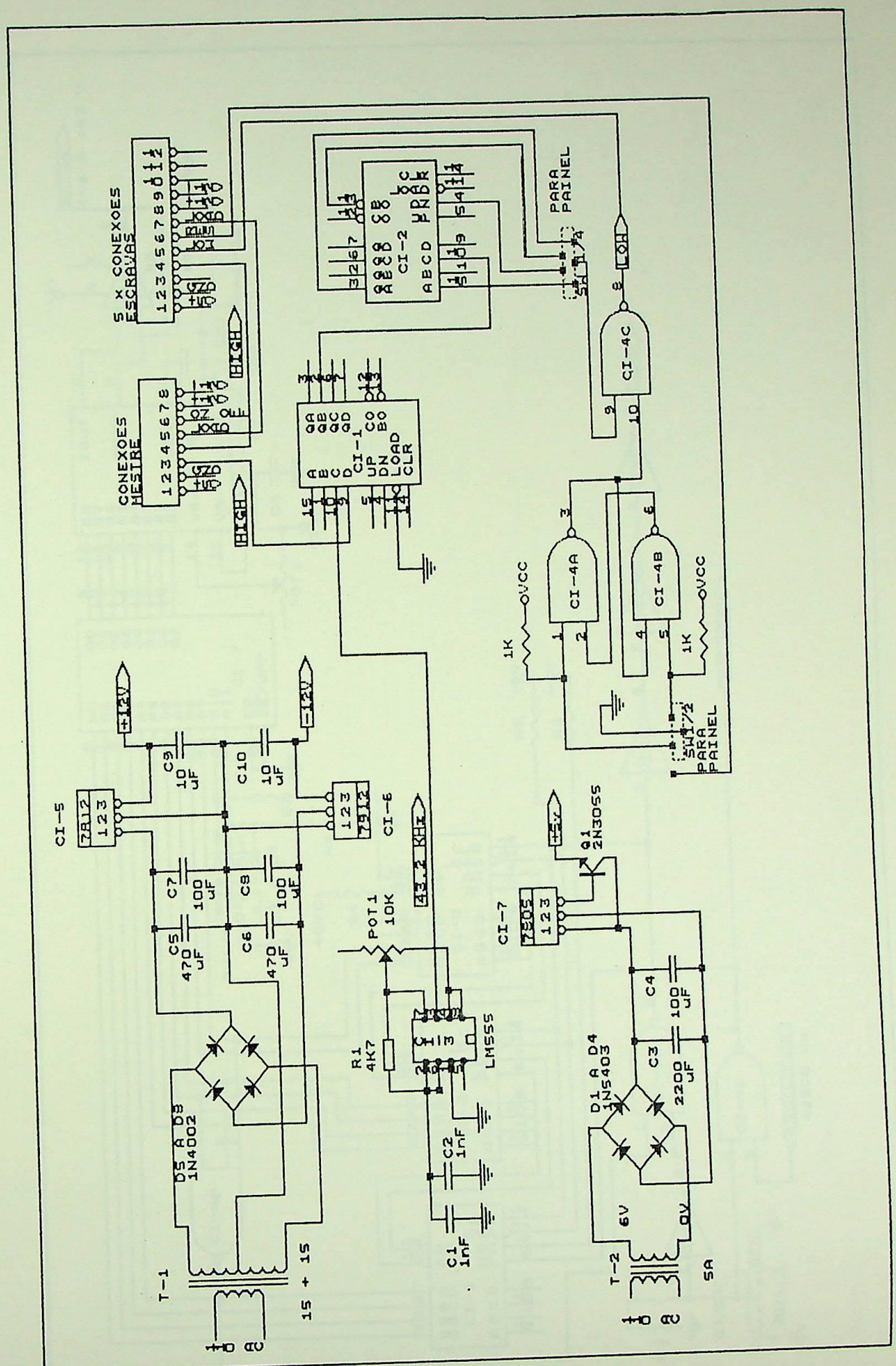



FIG. 2.17 a DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA PLACA PRINCIPAL

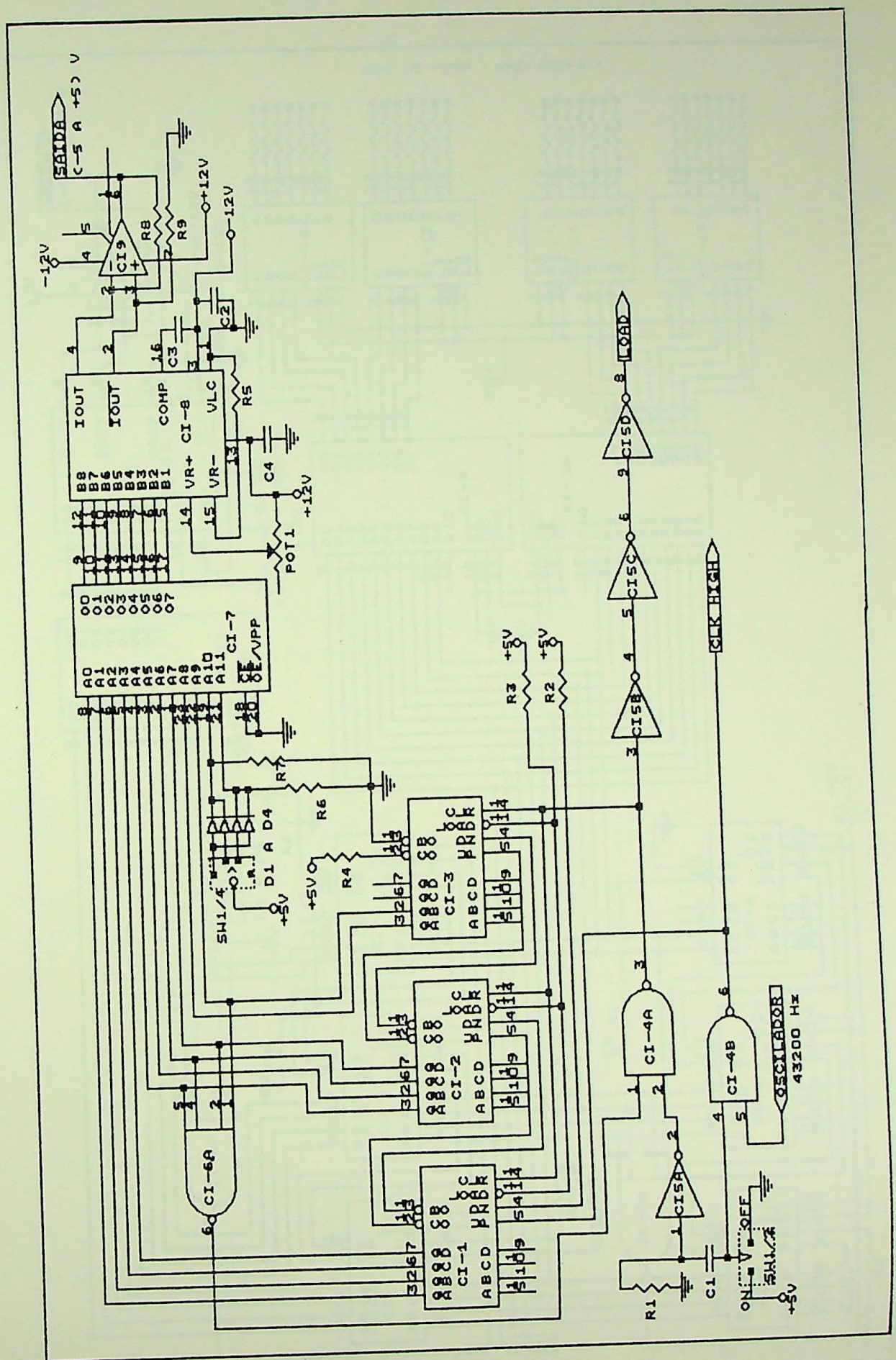



FIG. 2.17 b DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA PLACA MESTRE

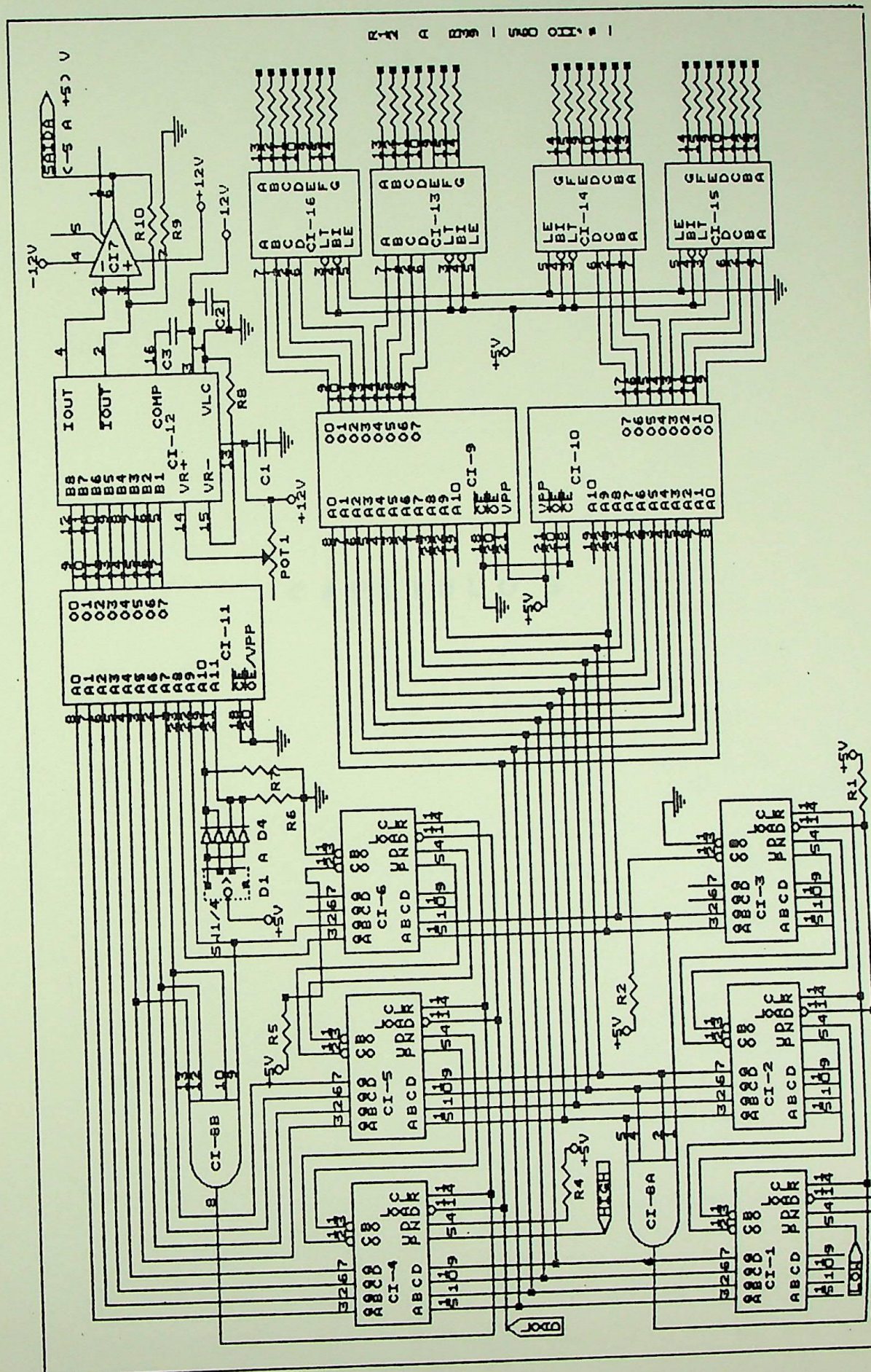



FIG. 2.17 c DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA PLACA ESCRAVA

# CAPÍTULO 3

# CAPÍTULO 3 - PROGRAMA GERADOR DE FUNÇÕES

## 3.1- Introdução

Visto o desenvolvimento do "hardware" do gerador de ondas sintetizadas, no capítulo 2, esse capítulo é dedicado à apresentação do "software" que atende a algumas necessidades fundamentais para o desenvolvimento desse trabalho de dissertação.

O programa foi desenvolvido visando, como principal finalidade, a reprodução de formas de onda que representem os sinais de corrente e tensão que ocorrem nos sistemas de potência atuais.

É um programa auto-explicativo e foi concebido para ser operado mesmo por usuários sem qualquer formação em informática ou microinformática e, para isto, utiliza de "menu" de comunicações com mensagens simples, providenciando uma interação usuário-máquina que possibilita a operação correta do aplicativo, visando a correta utilização do sistema como um todo.

O programa foi desenvolvido em forma de módulos individuais para um microcomputador de 16 "bits".

Em função do grande número de operações aritméticas que são efetuadas implicarem em um gasto considerável de tempo, o programa desenvolve-se com maior rapidez em máquinas que possuem um co-processador matemático.

A figura 3.1 apresenta o fluxograma do programa gerador de funções.

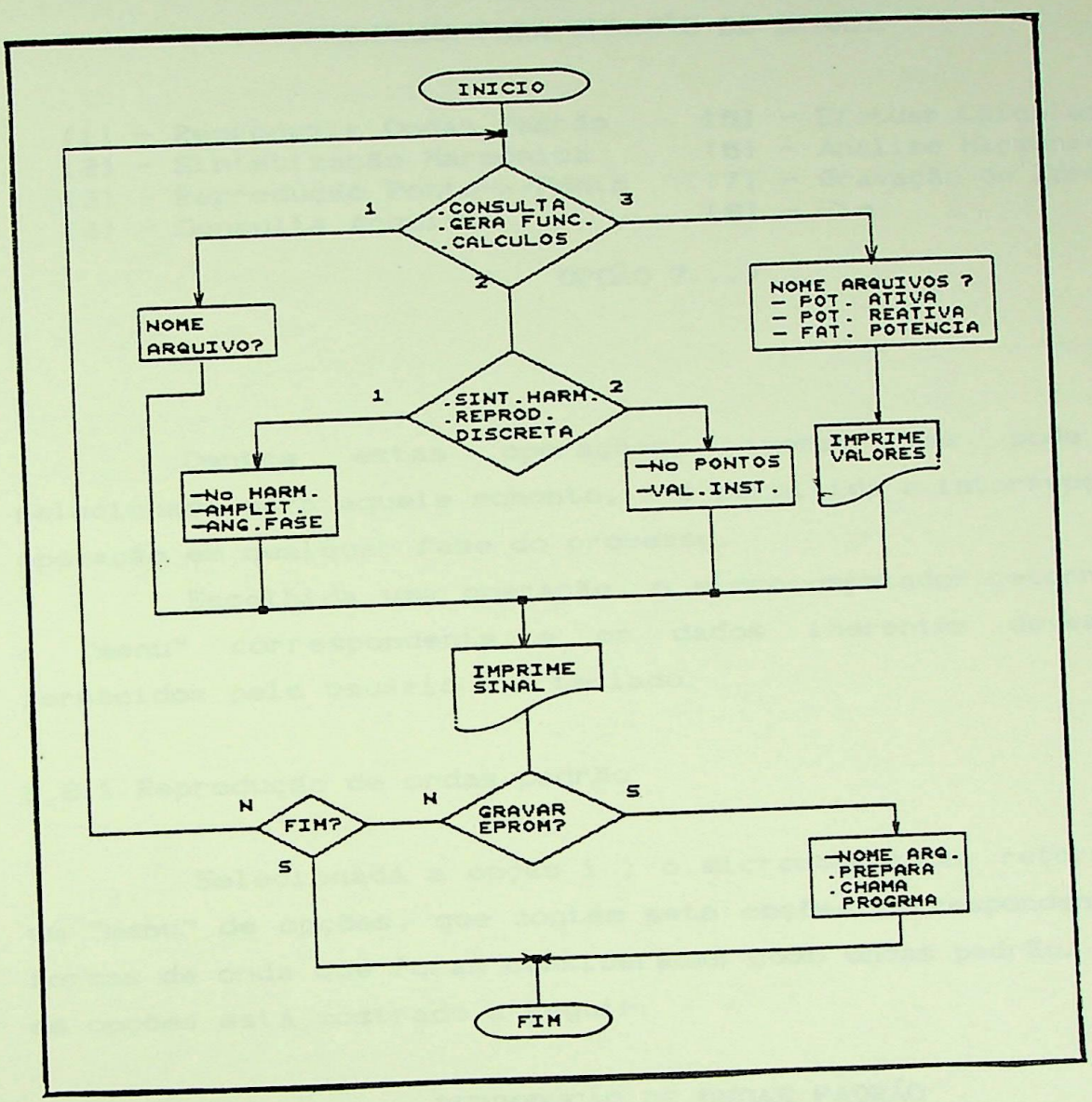



**FIG. 3.1 FLUXOGRAMA DO PROGRAMA GERADOR DE FUNÇÕES**

## 3.2- Desenvolvimento

Ao ser executado o programa, o microcomputador retorna com o "menu" principal de opções como mostrado a seguir:

MENU PRINCIPAL

PROGRAMA PARA GERAÇÃO DE SINAIS

[1] - Reproduzir Ondas Padrão
[2] - Sintetização Harmônica
[3] - Reprodução Ponto-a-Ponto
[4] - Consulta Arquivo
[5] - Efetuar Cálculos
[6] - Análise Harmônica
[7] - Gravação de "Eprom"
[8] - Fim

OPÇÃO ?...> __

Dentre estas operações, apenas uma pode ser selecionada para aquele momento, e é permitida a interrupção da operação em qualquer fase do processo.

Escolhida uma operação, o microcomputador retorna com o "menu" correspondente e os dados inerentes devem ser fornecidos pelo usuário via teclado.

3.2.1 Reprodução de ondas padrão

Selecionada a opção 1 , o microcomputador retorna com um "menu" de opções, que contém sete opções correspondentes às formas de onda que foram consideradas como ondas padrão. O menu de opções está mostrado a seguir:

REPRODUÇÃO DE ONDAS PADRÃO

[1] - Onda Senoidal
[2] - Onda Dente-de-Serra
[3] - Onda Triangular
[4] - Onda Quadrada
[5] - Corrente AC 6 Pulsos
[6] - Corrente AC 12 Pulsos
[7] - Corrente AC 24 Pulsos
[8] - Fim

OPÇÃO ?...> __

Uma única opção pode ser selecionada e após escolhida a forma de onda, o microcomputador solicita o número de pontos desejado para representá-la, os quais constituem os valores instantâneos e discretizados de um período da onda.

As formas de onda representadas pelas opções 5 , 6 , e 7 são, respectivamente, as formas de onda da corrente no lado alternado (AC) de uma ponte chaveada de 6 , 12 , e 24 pulsos. As demais dispensam comentários. A opção 8 retorna ao menu principal.

O programa provê a impressão do período da onda na tela de vídeo e ou impressora, após ser fornecido o número de pontos. Poderá, ainda, este período de onda ser armazenado em um banco de dados para ser utilizado posteriormente em outras operações.

A figura 3.2 ilustra um período das 7 formas de onda.

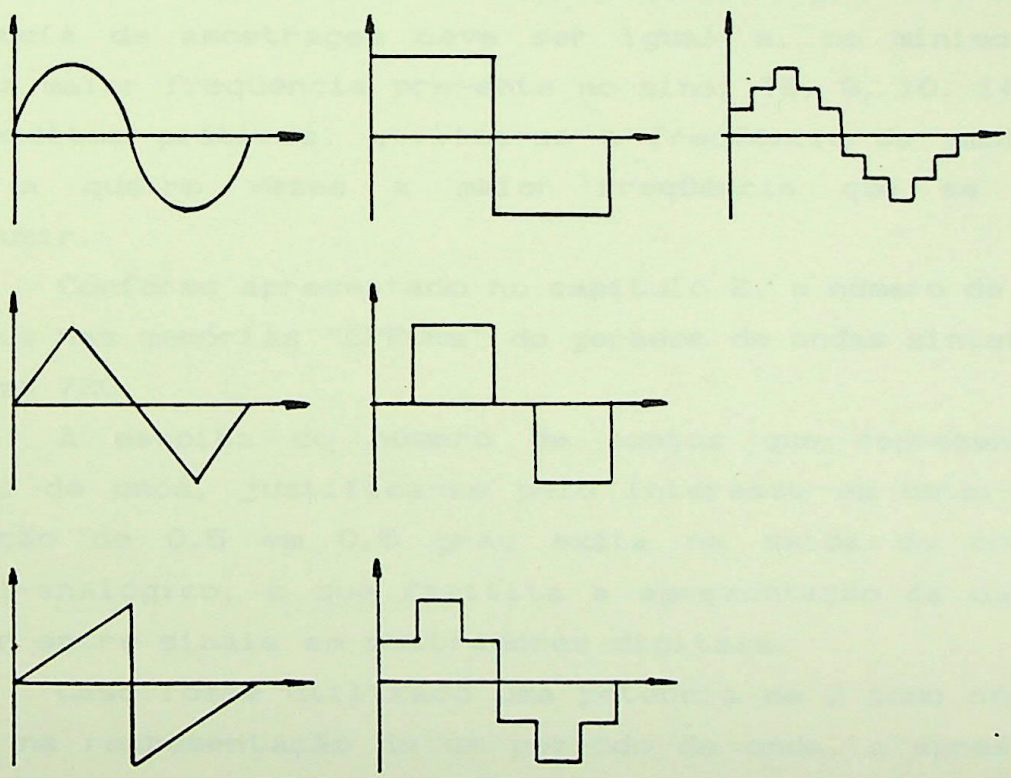


FIG. 3.2 FORMAS DE ONDA PADRÃO

### 3.2.2- Sintetização harmônica

O que denominou-se sintetização harmônica, refere-se a obtenção de uma função a partir de seu espectro de amplitudes no domínio da freqüência, em outras palavras, sintetizar um sinal é transformá-lo do domínio da freqüência para o domínio do tempo.

Quando esta operação é selecionada, ou seja, quando no "menu" principal é selecionada a opção 2 , o microcomputador solicita o número de harmônicos que irão compor a onda a ser sintetizada.

O maior número de harmônicos aceitável neste programa é 64. Essa limitação deve-se ao fato de se utilizar no máximo 256 amostras discretas nas operações que utilizam a transformada de Fourier.

De acordo com a teoria de amostragem de sinais a freqüência de amostragem deve ser igual a, no mínimo, duas vezes a maior freqüência presente no sinal [8, 9, 10, 14], mas para efeitos práticos, utiliza-se a freqüência de amostragem igual a quatro vezes a maior freqüência que se deseja reproduzir.

Conforme apresentado no capítulo 2, o número de pontos gravados nas memórias "EPROMs" do gerador de ondas sintetizadas totaliza 720.

A escolha do número de pontos que representam um período de onda, justifica-se pelo interesse em obter-se uma resolução de 0,5 em 0,5 grau exata na saída do conversor digital-analógico, o que facilita a apresentação da defasagem angular entre sinais em mostradores digitais.

Caso fosse utilizado uma potência de 2 como número de pontos na representação de um período de onda, a apresentação da defasagem angular em mostradores digitais tornar-se-ia difícil e inexata; o exemplo 3.1 ilustra a idéia.

Exemplo ( 3.1 ):

Seja "n" - o número de amostras
"t" - o intervalo entre amostras em graus

$$t = \frac{360}{n} \qquad (3.1)$$

para n = 128 ; t = 360/128 = 2,8125 graus
n = 512 ; t = 360/512 = 0,7031 graus
n = 720 ; t = 360/720 = 0,5 grau

Para efetuar a sintetização harmônica, é utilizado o algoritmo da "Transformada Inversa de Fourier (IDFT)" [1, 8].

$$Y(t) = \sum_{j=1}^{N} An \cdot \mathrm{Sin}(n\,\omega\,t + \phi); \qquad (3.2)$$

Onde,

Y(t) - Valor instantâneo da onda no instante (t)
An - Amplitude da n-ésima harmônica
$\phi$ - Ângulo de fase de An

O exemplo 3.2 ilustra uma operação de sintetização harmônica realizada pelo programa, e o resultado é representado graficamente na figura 3.3 .

Exemplo 3.2 :

SINTETIZAÇÃO HARMÔNICA

No Harmônicos ? 5
Confirma (S/N) ? --> S

Após a confirmação, é solicitada a amplitude e ângulo de fase dos harmônicos conforme ilustrado a seguir.

| HARM. | AMPLITUDE % | FASE ° |
|---|---|---|
| 1 | 100 | 0 |
| 2 | 0 | 0 |
| 3 | 30 | 0 |
| 4 | 0 | 0 |
| 5 | 20 | 0 |

$$Y(t) = \sum_{t=1}^{720} \text{Sin}(\omega t) + 0{,}30\ \text{Sin}(3\omega t) + 0{,}20\ \text{Sin}(5\omega t) \qquad (3.3)$$

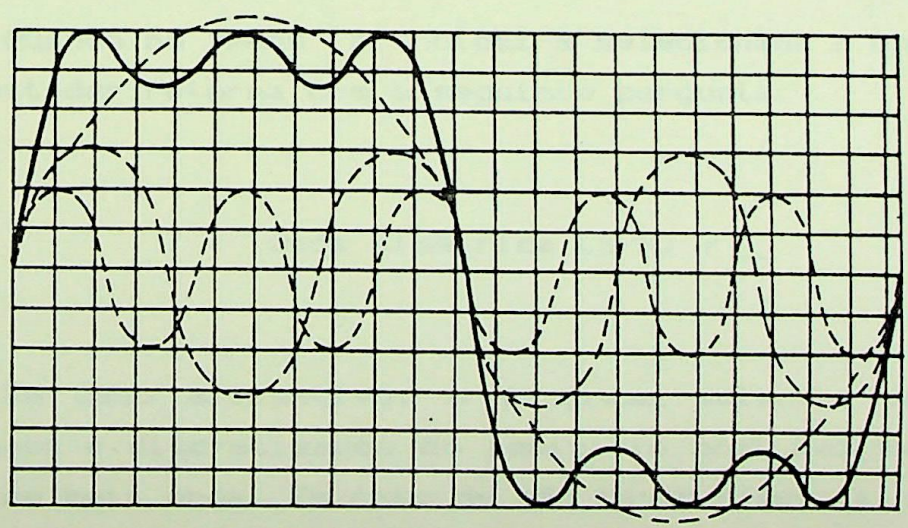


FIG. 3.3 SINTETIZAÇÃO HARMÔNICA

A primeira harmônica é amostrada 720 vezes por ciclo, a terceira harmônica 240 vezes por ciclo e a quinta harmônica amostrada 144 vezes por ciclo. O excesso de amostragem não incorre em erros na reprodução do sinal original, embora, teoricamente, duas amostras sejam suficientes para representar um ciclo da harmônica de maior ordem .

### 3.2.3- Reprodução ponto-a-ponto

Para permitir a reprodução de qualquer forma de onda, decidiu-se incluir no programa uma rotina que possibilite obter uma forma de onda representada por um arquivo numérico tendo, como fonte, um oscilograma obtido em campo.

O processo se realiza a partir do fornecimento, pelo usuário, dos valores instantâneos e discretizados do sinal oscilografado.

Embora a discretização manual do sinal seja um processo trabalhoso, ela permite reproduzir sinais reais de campo quando não se dipõem de um sistema de aquisição de dados para se fazer uma amostragem do sinal.

A figura 3.4 ilustra o processo de discretização de um sinal.

Quando no "menu" principal é selecionada a opção 3 , o microcomputador retorna com a seguinte pergunta:

Onda Simétrica (S/N) ? __

Em caso afirmativo, o programa solicita os valores instantâneos e discretizados do semiciclo positivo por existir simetria de meia onda. Em caso de não haver simetria, o usuário deverá fornecer os valores de um ciclo completo.

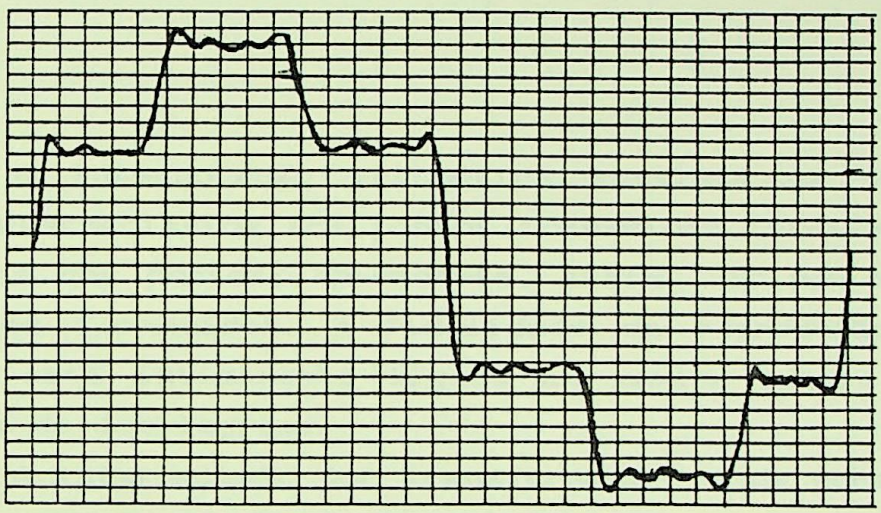


FIG. 3.4 DISCRETIZACAO EM UM OSCILOGRAMA

O número de pontos a ser fornecido, também é de escolha do usuário, porém , esse número deve, obrigatoriamente, ser uma potência de 2.

No capítulo referente ao "hardware", foi dito que o equipamento gerador de ondas sintetizadas trabalha com 720

posições de endereços das memórias "EPROMs". Isto significa que para gravar um período de onda em uma memória, deve-se ter um arquivo que contenha um período de onda representado por 720 valores instantâneos. Obter 720 pontos de um oscilograma torna-se um processo trabalhoso. Em função disso, decidiu-se abrir uma opção para escolha de dois processos de interpolação, a saber:

- Interpolação Aritmética
- Interpolação por Transformada Rápida

A interpolação aritmética consiste na obtenção de pontos intermediários aos pontos fornecidos, através da média aritmética dos pontos; obtendo-se, assim, 720 pontos a partir dos pontos fornecidos. A fidelidade da reprodução do sinal original está intimamente ligada ao máximo número de pontos extraídos do oscilograma.

A interpolação por transformada rápida consiste em se fazer a análise harmônica do sinal com base nos valores instantâneos fornecidos pelo usuário; em seguida, procede-se a sintetização de um período do sinal para 720 pontos com base no espectro de amplitudes resultante do processo de análise harmônica realizado, obtendo-se, assim, o sinal original reproduzido no domínio do tempo.

A análise harmônica é conseguida utilizando-se o algoritmo da **Transformada Rapida de Fourier** ( "FFT" ) [1, 8] , o que justifica a importância de o número de amostras ser uma potência de 2 . A figura 3.4 ilustra o processo de interpolação por transformada rápida, onde, foi escolhido arbitrariamente um número de pontos igual a 256 para o procedimento da FFT .

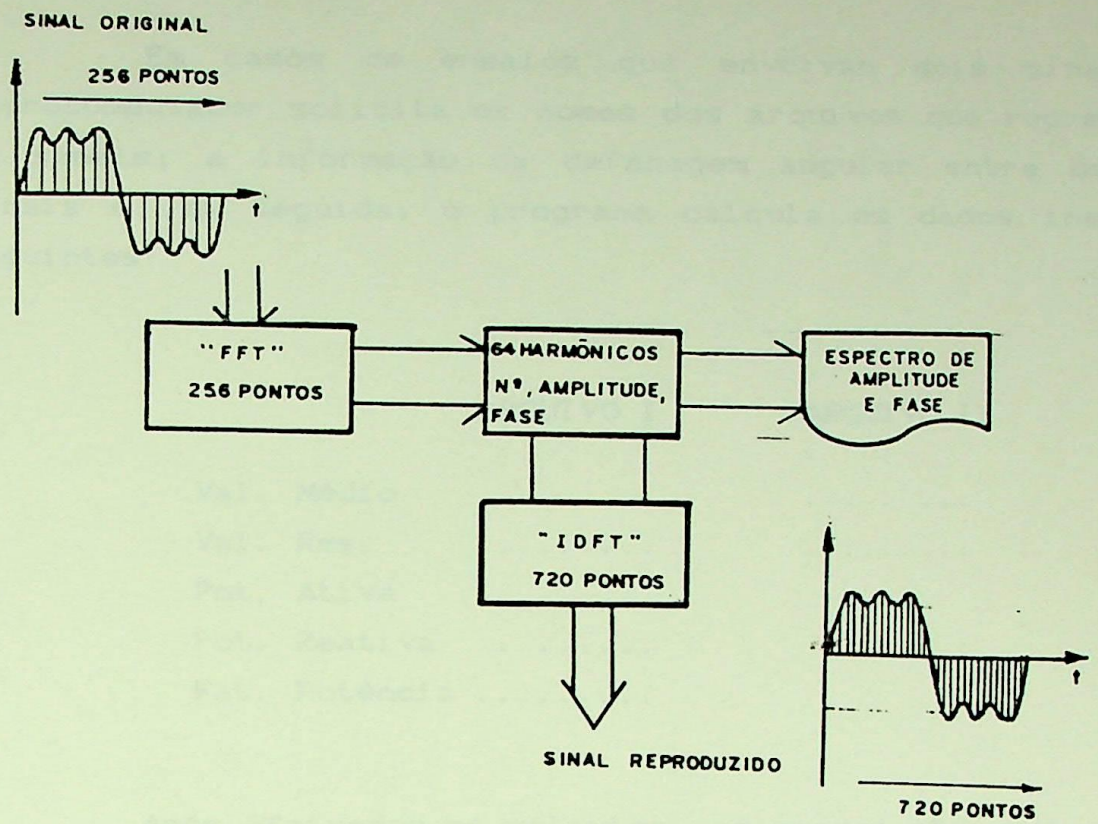



FIG. 3.4 PROCESSO DE INTERPOLAÇÃO POR TRANSFORMADA RÁPIDA

### 3.2.4- Consulta arquivo

Esta opção foi incluída no programa para que o usuário possa certificar-se das formas de onda que serão gravadas nas "EPROMs". Nesta operação o microcomputador pergunta o nome do arquivo, pede confirmação e apresenta a forma de onda na tela de vídeo, abrindo opção de apresentação da mesma na impressora.

### 3.2.5- Efetuar cálculos

Selecionada a opção 5 no "menu" principal, é requerido do usuário o número de arquivos, ou seja, se os cálculos serão efetuados para um sinal ou mais.

Caso seja um único sinal, o programa calcula os valores médio e eficaz, fornece a opção de imprimir um período do sinal juntamente com os valores calculados em P.u ( por unidade ) e o nome do arquivo.

Em casos de ensaios que envolvam dois sinais, o microcomputador solicita os nomes dos arquivos que representam os sinais; a informação da defasagem angular entre os dois sinais e ,em seguida, o programa calcula os dados inerentes seguintes:

| | ARQUIVO I | ARQUIVO II |
|---|---|---|
| Val. Médio | ..... | ..... |
| Val. Rms. | ..... | ..... |
| Pot. Ativa | ..... | |
| Pot. Reativa | ..... | |
| Fat. Potência | ..... | |

Após efetuados os cálculos, os mesmos são apresentados na tela de vídeo e o programa abre a opção para impressão das formas de onda juntamente com os valores calculados.

3.2.5.1- Cálculo do valor médio

A definição do valor médio é dada pela equação 3.4 .

$$Y_{av} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} Y(t)\, dt \qquad (3.4)$$

onde,

$Y_{av}$ - Valor médio da função

$T$ - Intervalo definido para a integração

$Y(t)$ - Função periódica do tempo

O método de cálculo utilizado neste programa segue diretamente a definição do valor médio, onde a integral é substituída pelo somatório dado pela equação 3.5 .

$$Y_{av} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} Y_i \qquad (3.5)$$

onde,

$Y_{av}$ - Valor Médio Aproximado
$N$ - Número de amostras por período
$Y_i$ - Valor instantâneo da amostra

3.2.5.2- Cálculo do valor eficaz

Analogamente ao valor médio, o valor eficaz é definido por uma integração dada pela equação 3.6 .

$$Y_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} y(t)^2 \, dt} \qquad (3.6)$$

onde,

$Y_{rms}$ - Valor eficaz da função
$T$ - Intervalo de tempo definido para a integração
$Y(t)$ - Função periódica do tempo

No cálculo do valor eficaz, pelo programa, a integral de definição foi substituída por um somatório dado pela equação 3.7 .

$$Y_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} Y_i^2} \qquad (3.5)$$

onde,

$Y_{rms}$ - Valor eficaz aproximado

$N$ - Número de amostras por período

$Y_i^2$ - Valor quadrático instantâneo da amostra

3.2.5.3- Cálculo da potência ativa

Para o cálculo da potência ativa foi adotado o mesmo procedimento descrito nos dois itens anteriores, ou seja substitui-se uma integração por um somatório de valores intantâneos e discretizados.

A potência média ativa é dada pela equação 3.8 .

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T e.i.dt \qquad (3.8)$$

onde,

$e$ - Tensão instantânea

$i$ - Corrente instantânea

$T$ - período definido para a integração

Pelo método computacional substituiu-se a integral de definição pelo somatório representado na equação 3.9 .

$$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} e(i).i(i) \qquad (3.9)$$

Onde,

N - Número de amostras por período
e(i) - Valor instantâneo da tensão
i(i) - Valor instantâneo da corrente

3.2.5.4- Cálculo da potência aparente e reativa

A potência aparente é obtida através do produto dos valores eficazes dos dois sinais conforme a equação 3.10 .

$$S = V_{rms} \times I_{rms} \qquad (3.10)$$

Onde,

S - Potência aparente
$V_{rms}$ - Valor eficaz da tensão
$I_{rms}$ - Valor eficaz da corrente

O valor da potência reativa é obtido através do triângulo de potência, ou seja, de acordo com a equação 3.11 .

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \qquad (3.11)$$

Onde,

Q - Potência Reativa
S - Potência Aparente
P - Potência Ativa

### 3.2.6- Análise harmônica

É previsto no programa uma rotina que utiliza o algoritmo da **Transformada Rápida de Fourier** ( "FFT" ) [1, 8] para a determinação dos harmônicos presentes em um período de um sinal.

O resultado é o espectro de amplitudes e ângulo de fases, apresentados graficamente e em forma de tabelas.

O objetivo de se ter uma rotina de "FFT" no programa, além do que foi descrito no item referente à interpolação, é a análise de um sinal obtido por um sistema de aquisição de dados para efeitos didáticos em estudos de harmônicos. A figura 3.5-a ilustra o espectro de amplitudes para uma onda quadrada, enquanto que, a figura 3.5-b apresenta o espectro de amplitudes para uma onda que simula a forma de onda da corrente no lado AC de uma ponte chaveada de 6 pulsos.

A listagem do programa se encontra no anexo A-6.

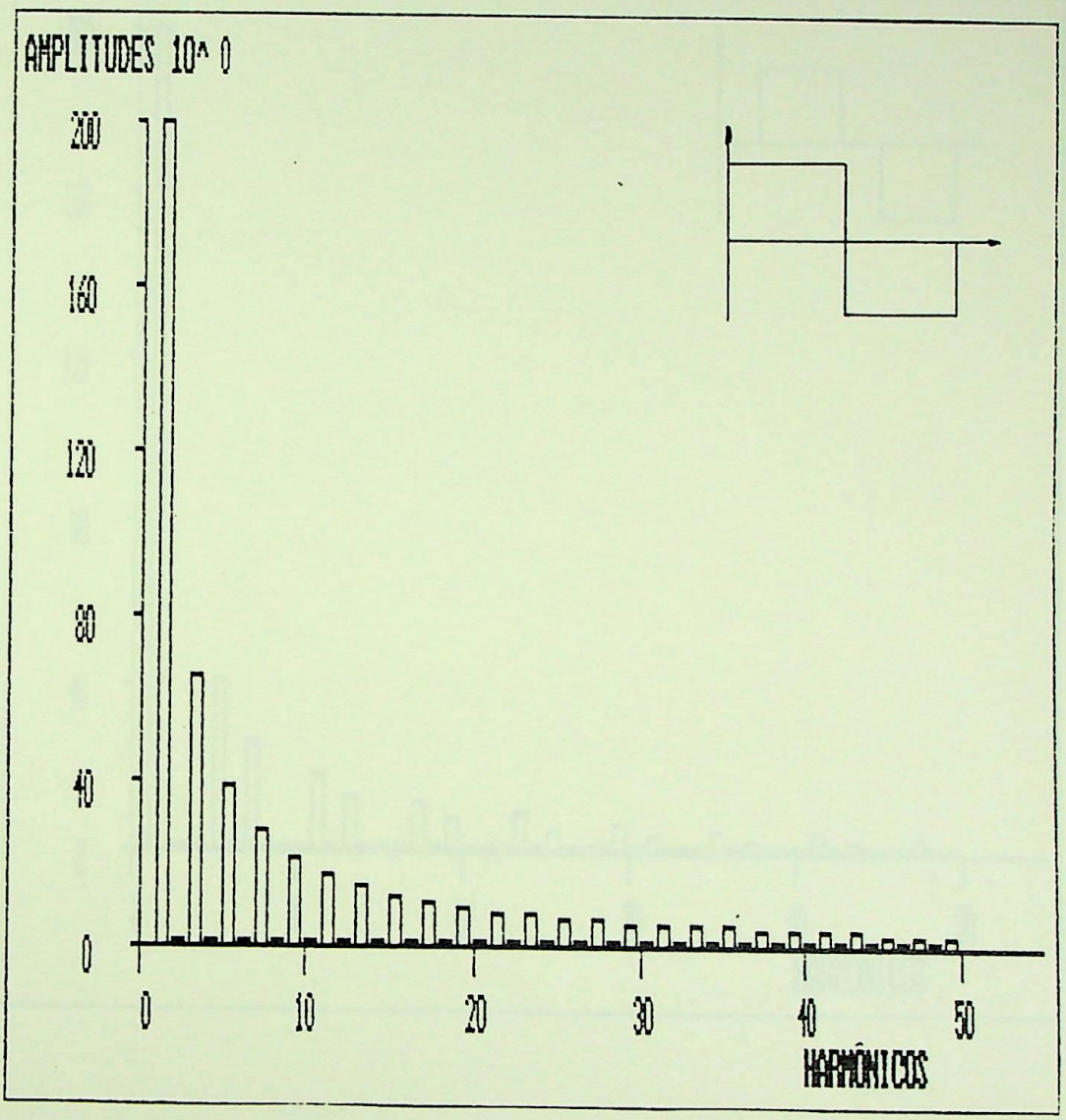



FIG. 3.5 a ESPECTRO DE AMPLITUDES PARA A ONDA QUADRADA

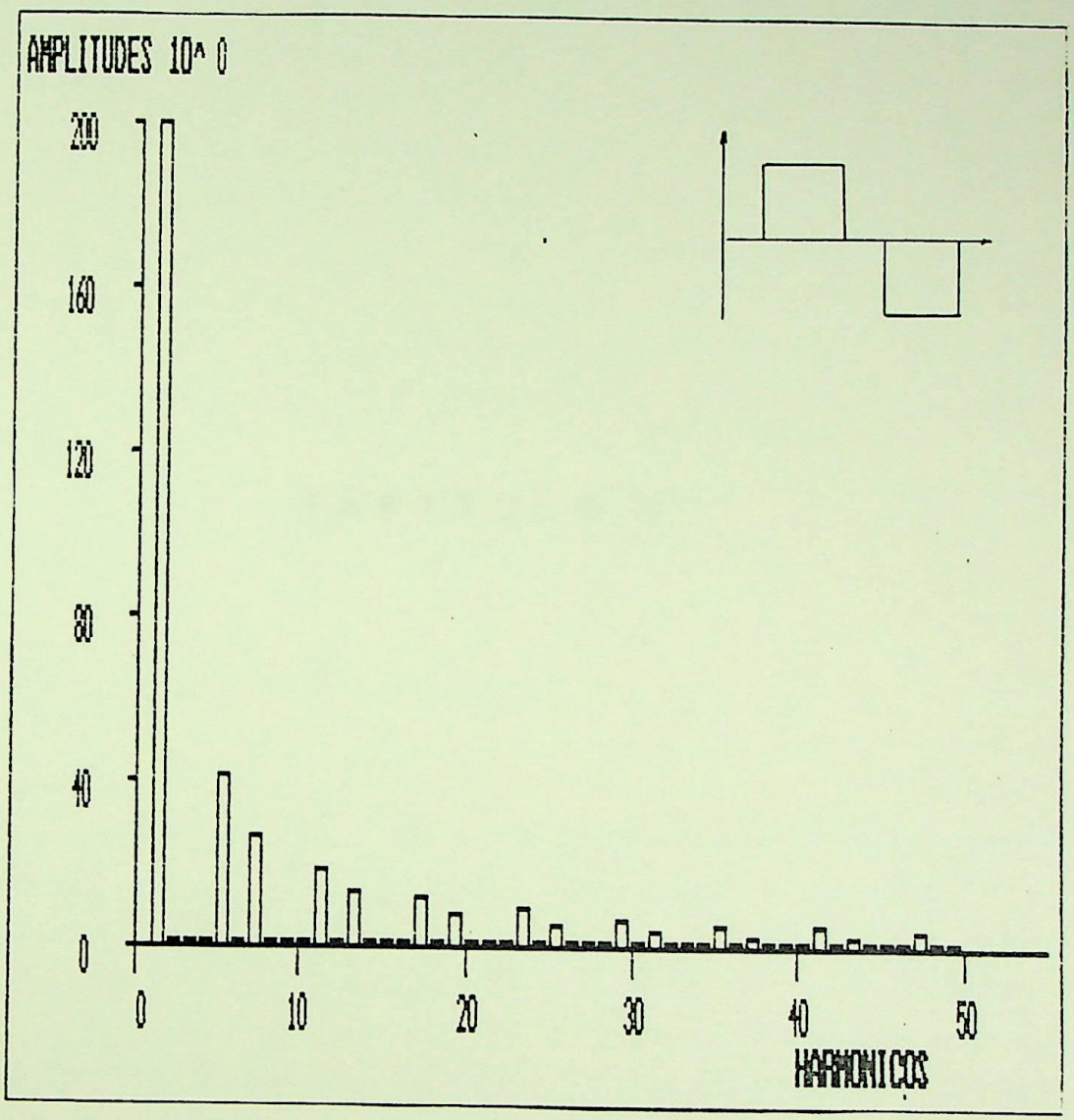



FIG. 3.5 b ESPECTRO DE AMPLITUDES PARA A ONDA QUE SIMULA A FORMA DE ONDA DA CORRENTE NO LADO AC DE PONTES CHAVEADAS DE 6 PULSOS

# CAPÍTULO 4

# CAPÍTULO 4 - AMPLIFICADORES PARA CORRENTE E TENSÃO

## 4.1 - Introdução

Este capítulo trata de assuntos referentes à amplificação de corrente e tensão dos sinais reproduzidos pelo gerador de ondas sintetizadas.

Partindo do princípio da necessidade de amplificar um sinal com a mínima distorção, vários tipos de amplificadores foram analisados, porém alguns proviam factibilidade pobre devido a dificuldade de obtenção de componentes especiais. Certos amplificadores, por exemplo, com transistores "FET" de potência, seriam mais adequados, entretanto, optou-se por aqueles implementados por componentes obteníveis com facilidade no mercado.

Assim, procedeu-se a escolha dos amplificadores utilizados através de testes de desempenho.

## 4.2- O Amplificador Para Corrente

Quanto ao modo de operação, o amplificador convecional que apresentou o melhor desempenho para a corrente é o tipo classe B . Nesse tipo de circuito, o transistor permanece diretamente polarizado somente durante a parte positiva do ciclo do sinal de excitação; durante a parte negativa, o transistor permanece reversamente polarizado (em corte) . A figura 4.1 representa o circuito equivalente de um transistor NPN operando em classe B.

Para um transistor PNP , o diodo emissor permanece reversamente polarizado na parte positiva do ciclo do sinal de excitação e diretamente polarizado na parte negativa, em outras palavras, obtém-se a situação simétrica do caso anterior; a figura 4.2 representa o circuito equivalente de um transistor PNP operando em classe B.

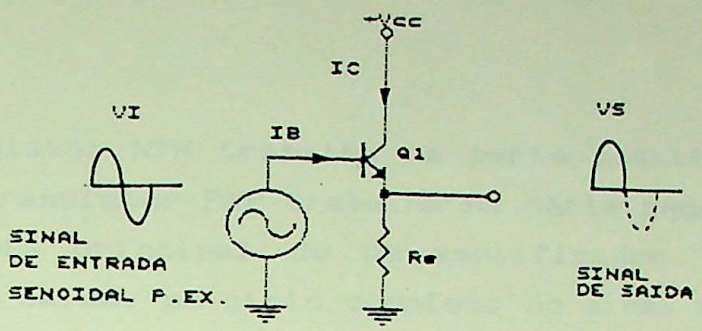



FIG. 4.1 TRANSISTOR NPN - CLASSE B

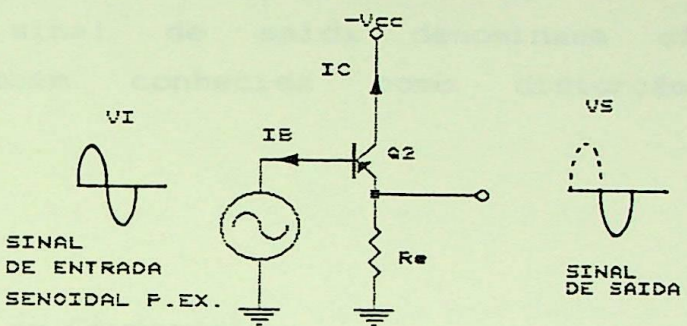



FIG. 4.2 TRANSISTOR PNP - CLASSE B

Combinando-se as duas configurações representadas pela figura 4.1 e figura 4.2 , obtém-se um circuito amplificador "Push-Pull", representado na figura 4.3 .

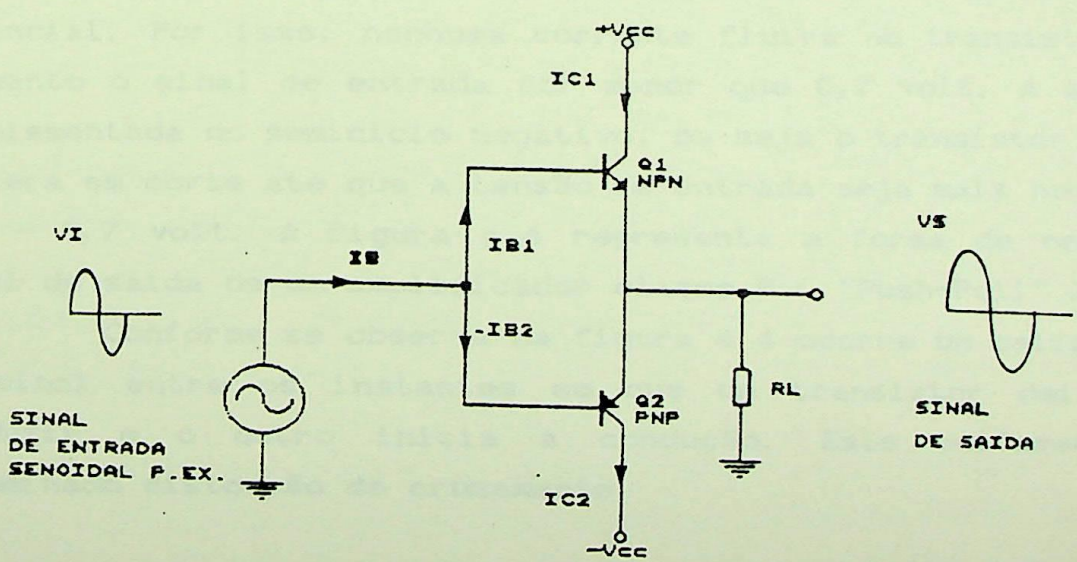



FIG. 4.3 AMPLIFICADOR CLASSE B ( "PUSH-PULL" )

O transistor NPN trabalha na parte positiva do sinal de entrada e o transistor PNP trabalha na parte negativa, o que constitui a idéia principal de um amplificador "Push-Pull", obtendo-se, como saída, um ciclo completo do sinal de excitação amplificado.

Uma característica que torna-se crítica no amplificador classe B, é a alocação do ponto quiescente. No circuito classe B ideal, o ponto quiescente (Q) está alocado no corte, mas em um amplificador classe B prático, o Ponto (Q) está levemente acima do corte, o que provoca um tipo de deformação no sinal de saída denominada **distorção de cruzamento**, também conhecida como distorção crossover [2, 3, 7].

## 4.2.1- Distorção de Cruzamento

Supondo que no circuito classe B ( "Push-Pull" ) representado pela figura 4.3 não seja aplicado nenhuma polarização aos diodos emissores, o sinal alternado de entrada deverá atingir **0,7 volt** para que seja vencida a barreira de potencial. Por isso, nenhuma corrente fluirá no transistor Q1 enquanto o sinal de entrada for menor que **0,7 volt**. A ação é complementada no semiciclo negativo, ou seja o transistor Q2 se manterá em corte até que a tensão de entrada seja mais negativa que **- 0,7 volt**. A figura 4.4 representa a forma de onda do sinal de saída de um amplificador classe B ( "Push-Pull" ) .

Conforme se observa na figura 4.4 ocorre um ceifamento do sinal entre os instantes em que um transistor deixa de conduzir e o outro inicia a condução. Este ceifamento é denominado **distorção de cruzamento**.

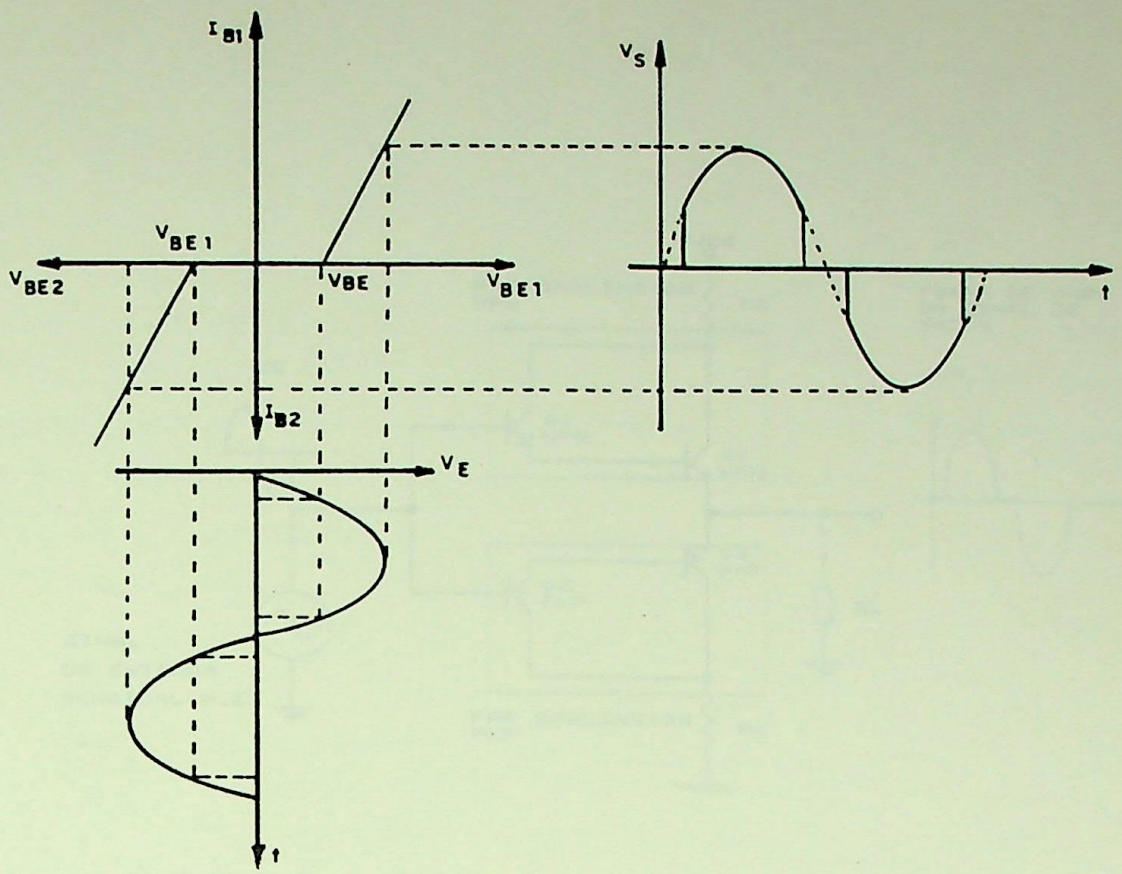



FIG. 4.4 FORMA DE ONDA DE SAÍDA PARA UMA ENTRADA SENOIDAL

Para eliminar a distorção de cruzamento é necessário locar o ponto (Q) levemente acima do corte, em outras palavras, é necessário aplicar uma polarização direta em cada diodo emissor, de forma a deixá-los na iminência de condução.

A maior dificuldade encontrada em um amplificador classe B é o ajuste de um ponto (Q) estável, pois o valor de tensão quiescente Base-Emissor (Vbe) adquire importância, uma vez que em função do ganho de corrente, uma pequena variação de Vbe pode produzir grande diferença na corrente de coletor.

A configuração utilizada na amplificação de corrente, para o gerador de ondas sintetizadas, é, então, um circuito classe B ( "Push-Pull" ) . Em função do baixo nível de corrente na saída do gerador de ondas sintetizadas (2 mA), é requerido, do amplificador, um ganho de corrente elevado, para que se obtenha, em sua saída, um nível de corrente em torno de 5 amperes.

A configuração do amplificador está representada na figura 4.5 , onde cada par de transistor funciona como um único transistor com um ganho elevado e, estes pares são denominados pares "Darlington ".

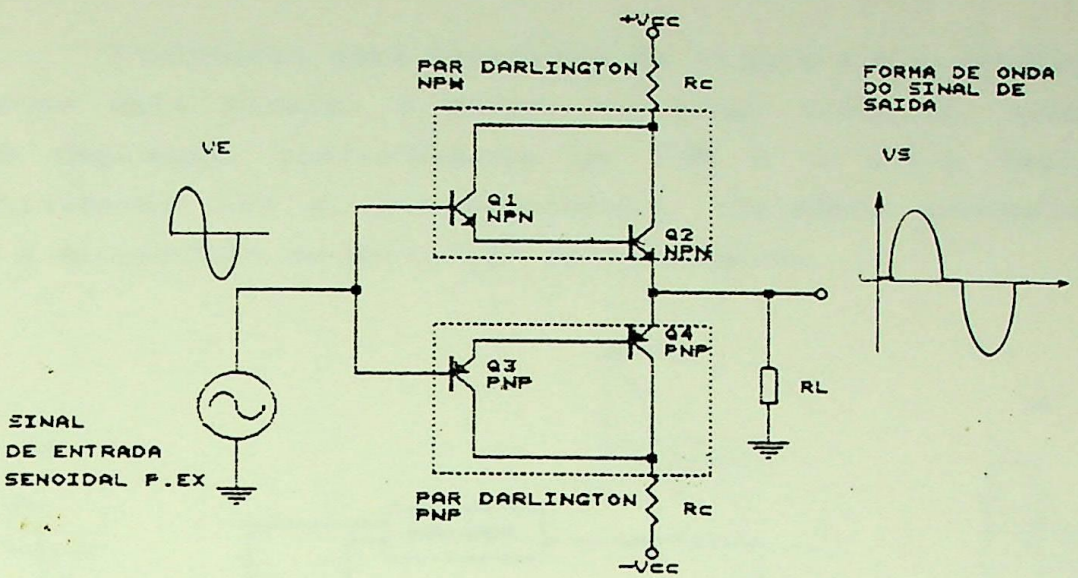



**FIG. 4.5 AMPLIFICADOR DE CORRENTE CLASSE B ("PUSH-PULL") COM PARES "DARLINGTON"**

Note-se, na figura 4.5 , que a forma de onda na saída do amplificador não é uma senóide perfeita, em função da distorção de cruzamento.

4.2.2- Compensação de distorção de cruzamento

A seguir são vistos dois processos para a compensação da distorção de cruzamento: a compensação por pré-polarização e a compensação por realimentação. Ambos foram analisados e testados, porém, o segundo processo mostrou-se mais satisfatório.

a) compensação por pré-polarização

A compensação de distorção de cruzamento consiste basicamente em manter-se o transistor pré-polarizado, de maneira que, o sinal de saída do amplificador esteja com a forma de onda igual ao sinal de entrada ou de excitação.

O processo está ilustrado na figura 4.6 e consiste em obter-se dois sinais, a partir do sinal original, sendo um deles deslocado positivamente de +Vd e o outro deslocado negativamente -Vd e, posteriormente, chaveados adequadamente para a eliminação da distorção de cruzamento.

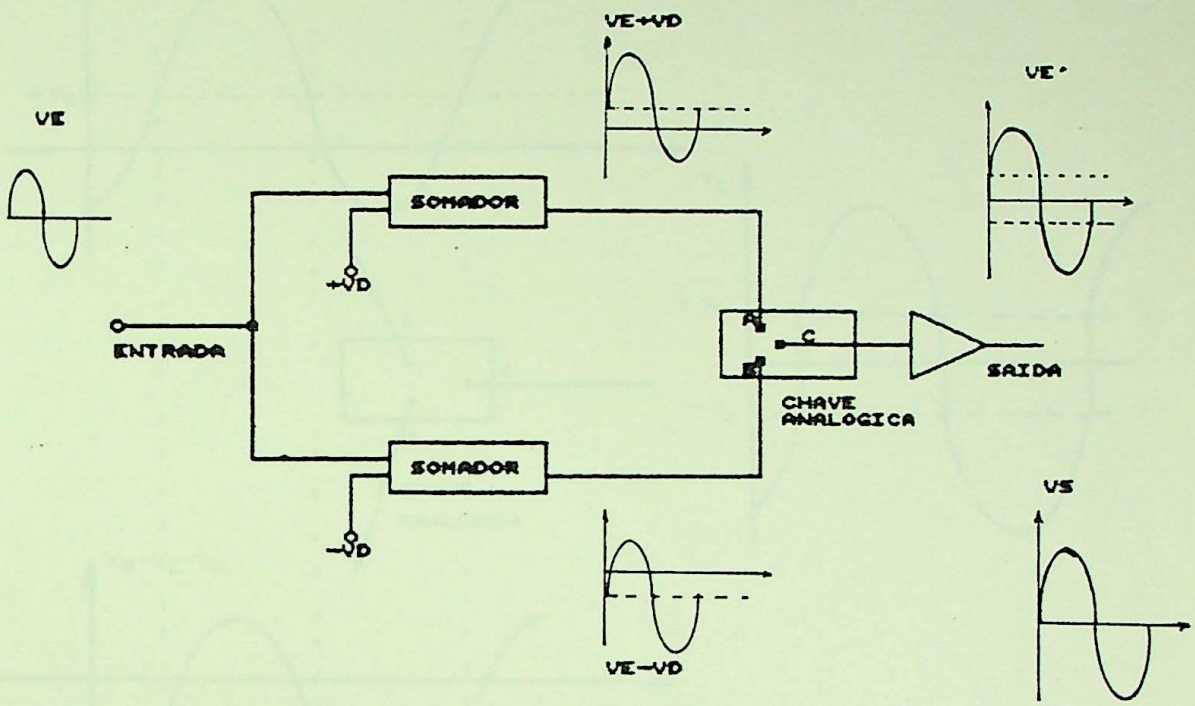
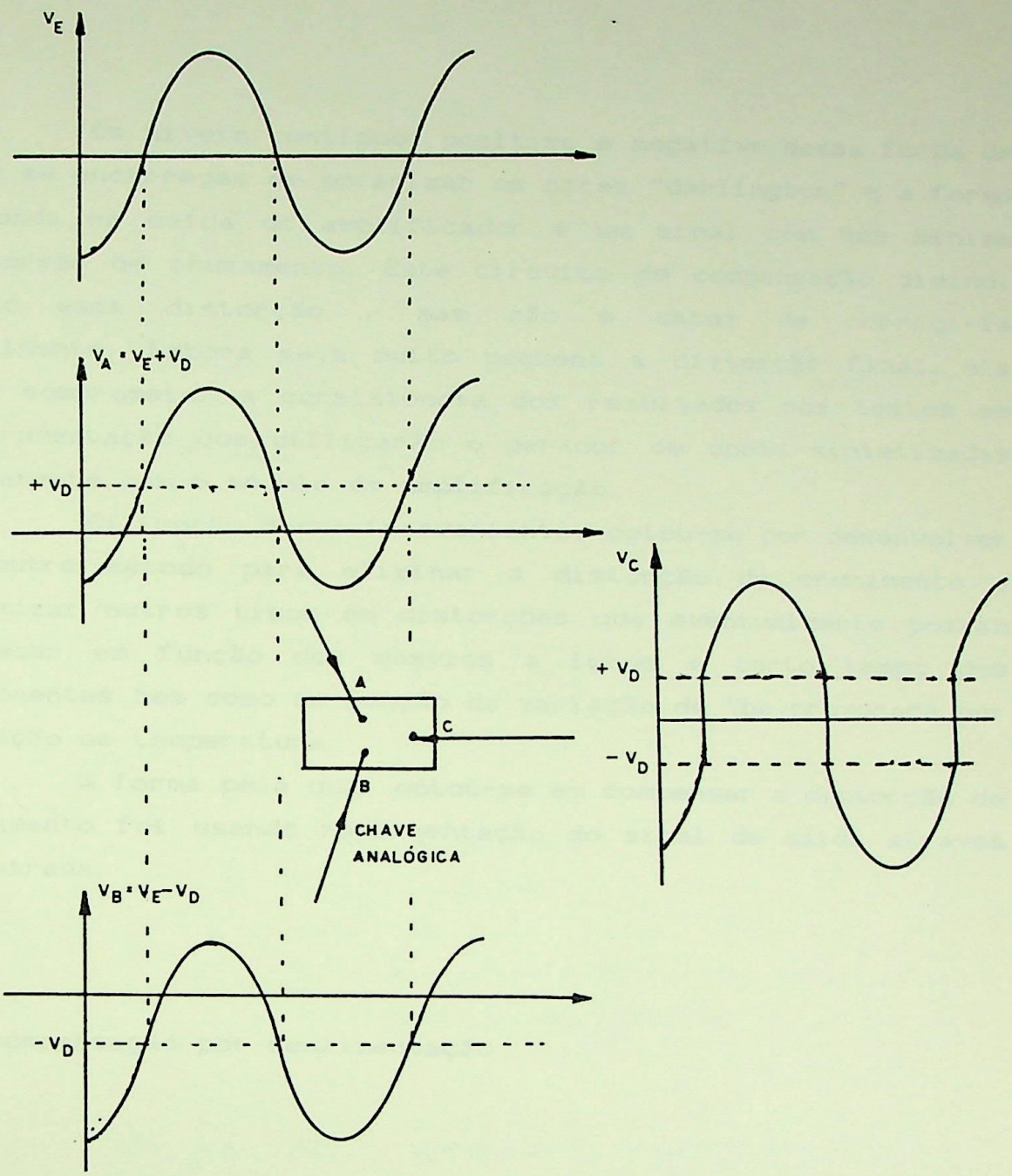



FIG. 4.6 COMPENSAÇÃO DE DISTORÇÃO POR PRÉ-POLARIZAÇÃO

Uma chave analógica se encarrega de comutar os sinais na entrada do amplificador. A chave é comandada por um detetor de zero, de forma que, na parte positiva do sinal de entrada do amplificador, ela é ligada na posição A e na parte negativa, na posição B .

A forma de onda obtida na saída do circuito de compensação de distorção de cruzamento está representada na figura 4.7




Onde,

VD - Componente Contínua Positiva Ajustável e Compensada Termicamente

-VD - Componente Contínua Negativa Ajustável e Compensada Termicamente

FIG 4.7 FORMA DE ONDA OBTIDA PELO PROCESSO DE PRÉ-POLARIZAÇÃO

Os níveis contínuos positivo e negativo dessa forma de onda se encarregam de polarizar os pares "darlington" e a forma de onda na saída do amplificador é um sinal com uma mínima distorção de cruzamento. Este circuito de compensação diminui muito essa distorção , mas não é capaz de corrigi-la totalmente. Embora seja muito pequena a distorção final, ela pode comprometer a consistência dos resultados nos testes em instrumentação que utilizarão o gerador de ondas sintetizadas juntamente com o módulo de amplificação.

Em função desse incoveniente, optou-se por desenvolver um outro método para eliminar a distorção de cruzamento e minimizar outros tipos de distorções que eventualmente possam aparecer em função dos desvios a longo e curto tempo dos componentes bem como em função da variação de Vbe provocada por elevação de temperatura.

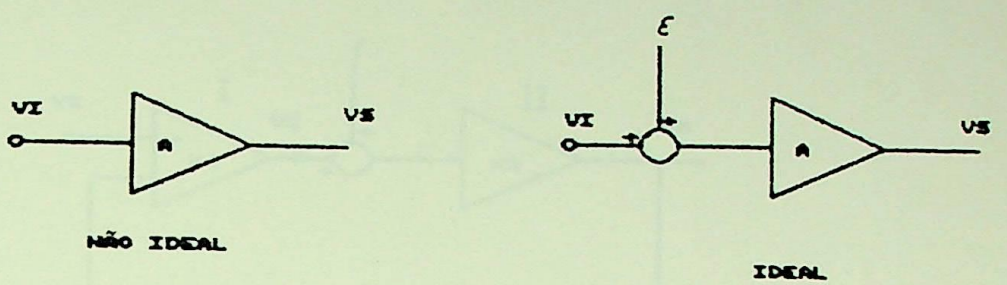
A forma pela qual optou-se em compensar a distorção de cruzamento foi usando realimentação do sinal de saída através da entrada.

b- compensação por realimentação

A realimentação consiste em amostrar o sinal de saída de um amplificador, combiná-lo na entrada com o sinal original externo por meio de um circuito misturador, sendo então, injetado no próprio amplificador.

Considerando que para um amplificador não ideal tem-se em sua entrada um sinal VI, este será somado com um erro e multiplicado pelo ganho do amplificador para formar o sinal VS de saída como indicado na figura 4.8-a .

$VS = ( VI + \varepsilon ).K$ $VS = ( VI + \varepsilon ).K$




(a) (b)

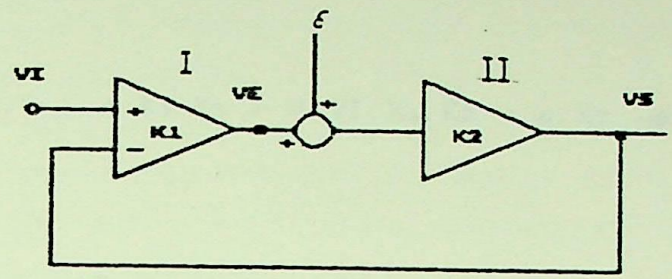
onde,

VI - Sinal de Entrada
VS - Sinal de Saída
K - Ganho do Amplificador
$\varepsilon$ - Erro Referente a Distorções Produzidas Pelo Próprio Amplificador

**FIG. 4.8 MODELOS MATEMÁTICOS DE AMPLIFICADORES**

O modelo da figura 4.8 a pode ser substituído pelo modelo da figura 4.8 b que considera o amplificador como ideal, porém neste caso o erro deve ser somado à entrada externamente de forma a não alterar a equação que representa a resposta ou saída do amplificador.

Para que o efeito do erro sobre a saída do amplificdor possa ser minimizado , adota-se um modelo com realimentação, de forma que, o sinal de saída conserve a forma de onda e fase do sinal de entrada. A figura 4.9 ilustra o modelo adotado.




onde,

VI - Sinal de Entrada

VS - Sinal de Saída

$K_2$ - Ganho do AmplificadorII

$K_1$ - Taxa de Realimentação

$\varepsilon$ - Erro Produzido Pelo Amplificador

**FIG. 4.9 MODELO MATEMÁTICO DE UM AMPLIFICADOR COM SAÍDA REALIMENTADA**

Adotando-se o modelo da Figura 4.9 tem-se :

$$VS = ( VE + \varepsilon ).K_2 \qquad (4.1)$$

$$VE = ( VI - VS ).K_1 \qquad (4.2)$$

Aplicando-se a equação 4.2 na equação 4.1, tem-se:

$$VS = ( ( VI - VS ).K_1 + \varepsilon ).K_2 \quad \Rightarrow$$

$$VS = VI.K_1.k_2 - VS.K_1.K_2 + \varepsilon.K_2 \quad \Rightarrow$$

$$VS + VS.K_1.K_2 = VI.K_1.K_2 + \varepsilon.K_2 \quad \Rightarrow$$

$$VS.(1 + K_1.K_2) = VI.K_1.K_2 + \varepsilon.K_2 \quad \Rightarrow$$

$$VS = \frac{VI.K_1.K_2 + \varepsilon.K_2}{1 + K_1.K_2} \qquad (4.3)$$

Como $K_1.K_2 \gg 1$ ,

$$VS = \frac{VI.K_1.K_2}{K_1.K_2} + \frac{\varepsilon.K_2}{K_1.K_2} \quad \text{então,}$$

$$VS = VI + \frac{\varepsilon}{K_1} \qquad (4.4)$$

Como $K_1 \gg 1$, $\qquad VS \cong VI$

Sendo assim, os erros de distorção da forma de onda, fase e regulação são substancialmente reduzidos, mas é importante notar que, de qualquer forma existe um diminuto erro na saída VS que, para efeitos práticos, torna-se desprezível.

A impedância de saída do amplificador número II é baixa permitindo uma alta corrente ( 5 amperes eficazes ).

Embora o objetivo dessa realimentação seja compensar a distorção de cruzamento provocada pela polarização dos pares de transistores, a realimentação oferece algumas vantagens frente

aos outros processos de compensação de tal distorção. Com o uso de realimentação, o ganho do amplificador pode ser estabilizado contra variações dos parâmetros dos transistores ou dos parâmetros de outros dispositivos utilizados no amplificador, inclusive variações de Vbe em função da variação de temperatura. Outra vantagem do uso de realimentação é a melhora significativa na resposta em freqüência e na linearidade da operação do amplificador e ainda, a correção obtida do erro de fase comparados com um amplificador sem a realimentação [2, 3, 7] . O quadro 4.1 mostra as características técnicas do amplificador de corrente .

| | | |
|---|---|---|
| Potência máxima | | 21 W RMS |
| Carga : 0,85 OHM | | |
| Ordem da impedância de entrada: | | MOHMs |
| Ordem da impedância de Saída: | | mOHMs |
| Resposta em frequência (0,5 dB a 20 W RMS): | | |
| 20 Hz a 20 KHz | | |
| Consumo: | ramo + 12 V : | 2,5 amperes |
| | ramo - 12 V : | 2,5 amperes |

**QUADRO 4.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS**

O diagrama final do aplificador é mostrado na figura 4.10 , onde, os dois primeiros transistores (Q1) e (Q2) trabalham como um "driver" de corrente, elevando a impedância de entrada do amplificador; os transistores (Q3) e (Q4) elevam o nível de corrente para excitar (Q5//Q7) e (Q6//Q8), respectivamente, agindo como um pré-amplificador.

A placa de circuito impresso se encontra no anexo A-7 e lista de componentes empregados se encontra no anexo A-8 .

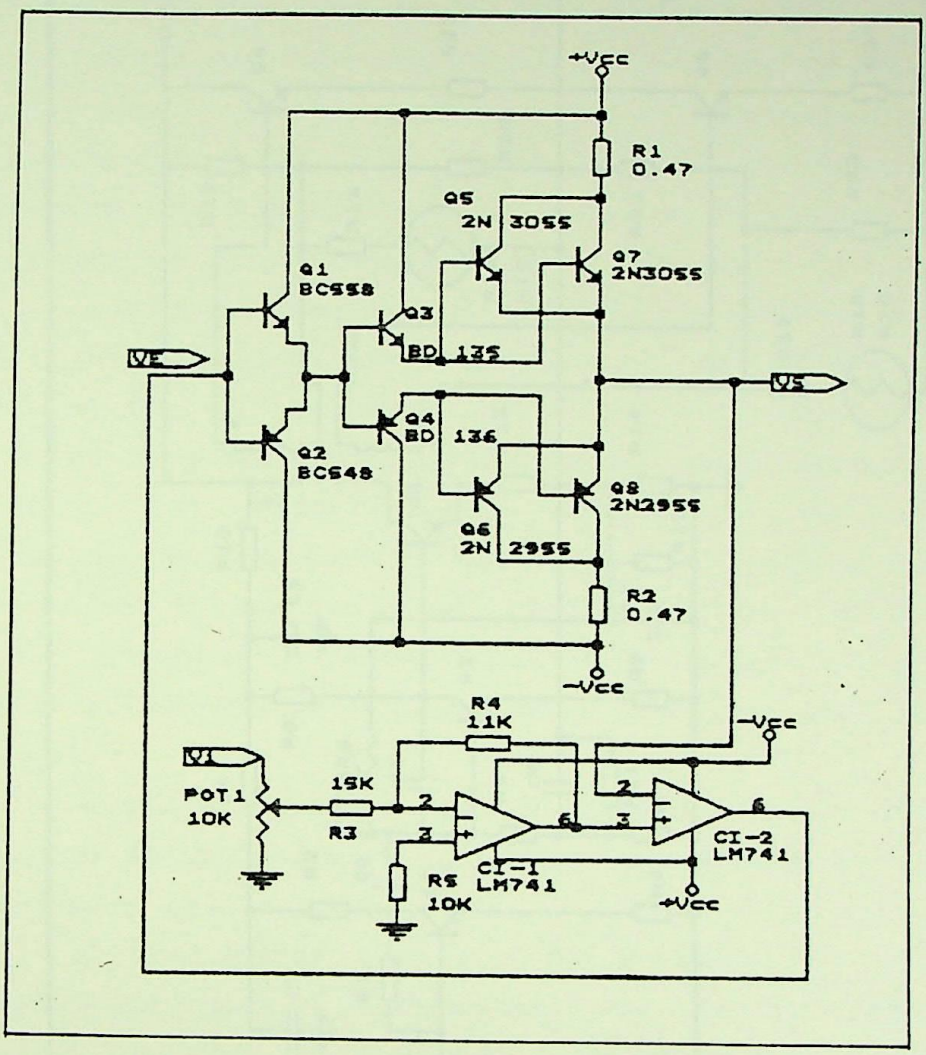



**FIG. 4.10 DIAGRAMA FINAL DO AMPLIFICADOR DE CORRENTE**

## 4.3- Amplificador Para Tensão

Para proceder a amplificação dos sinais de tensão decidiu-se utilizar uma configuração de amplificador de áudio conhecida como "Simetria Quase-Complementar [2].O diagrama esquemático encontra-se representado na figura 4.11 .

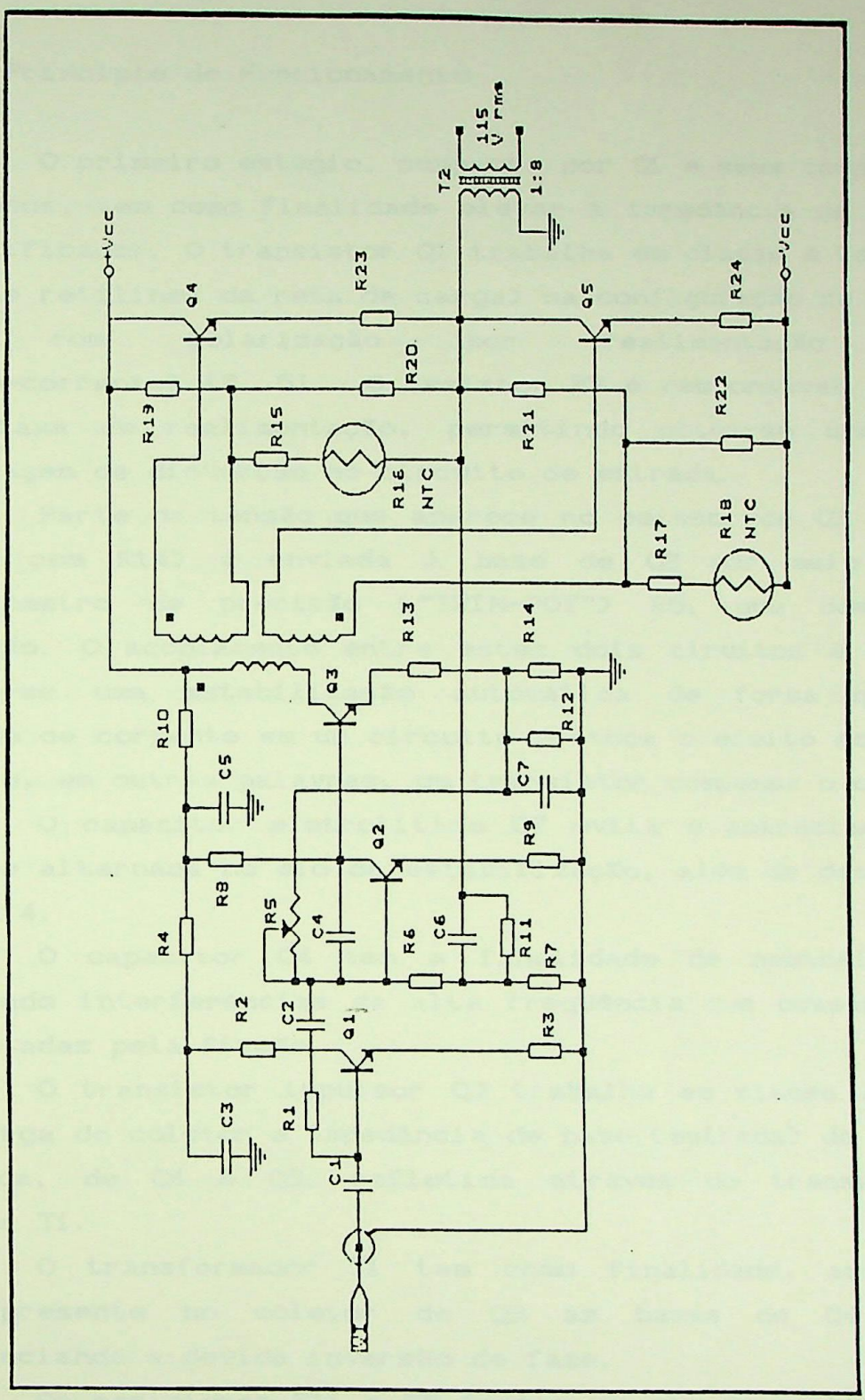



FIG. 4.11 DIAGRAMA BÁSICO DO AMPLIFICADOR DE TENSÃO

4.3.1- Princípio de Funcionamento

O primeiro estágio, composto por Q1 e seus componentes associados, tem como finalidade elevar a impedância de entrada do amplificador. O transistor Q1 trabalha em classe A (operando na parte retilínea da reta de carga) na configuração de emissor comum com polarização por realimentação mista (tensão-corrente) [2, 5] . O resistor R3 é responsável por uma forte taxa de realimentação, permitindo obter-se uma baixa percentagem de distorção no circuito de entrada.

Parte da tensão que aparece no emissor de Q3 (junção de R13 com R14) é enviada à base de Q2 por meio de um potenciômetro de precisão ("TRIM-POT") R5, que dosa esta aplicação. O acoplamento entre estes dois ciruitos é direto, obtendo-se uma estabilização automática de forma que uma variação de corrente em um circuito provoca o efeito contrário no outro, em outras palavras, um transistor compensa o outro.

O capacitor eletrolítico C7 evita o aparecimento de corrente alternada no elo de estabilização, além de desacoplar R12 e R14.

O capacitor C4 tem a finalidade de neutralização, suprimindo interferências de alta freqüência que possam vir a ser captadas pela fiação.

O transistor impulsor Q3 trabalha em classe A e tem como carga de coletor a impedância de base (entrada) do estágio de saída, de Q4 e Q5, refletida através do transformador inversor T1.

O transformador T1 tem como finalidade, acoplar o sinal presente no coletor de Q3 às bases de Q4 e Q5, providenciando a devida inversão de fase.

Os resistores R11 e R6 formam um elo de realimentação negativa com uma taxa de aproximadamente 40 dB [5] .

O estágio de saída, composto por Q4 e Q5, utiliza a configuração conhecida como **Simetria Quase-Complementar** [2] . Nesta configuração são usados dois transistores de mesmo tipo, cada um operando com um semiciclo do sinal.

Os termistores R16 e R18, acoplados mecanicamente aos dissipadores, são do tipo "NTC" ("negative thermal coefficient") e controlam o nível de polarização dos transistores de saída para eventuais variações de temperatura.

A carga é ligada entre a junção do coletor de Q5 com o emissor de Q4 e a massa, através de um transformador cuja função é elevar o nível da tensão de saída do amplificador para 115 volts eficazes, providenciando o casamento de impedância adequado, de forma a se ter refletido, no lado de baixa tensão, uma impedância mínima de 8 Ohms.

O quadro 4.2 mostra as principais características técnicas do amplificador [5] .

| | |
|---|---|
| Potência máxima | 50 W RMS |
| Carga : 8 OHMs | |
| Impedância de entrada: | 150 KOHMs |
| Resposta em frequência (0,5 dB a 50 W RMS): | |
| 20 Hz a 20 KHz | |
| Consumo: ramo + 45 V : | 1,25 amperes |
| ramo - 45 V : | 1,25 amperes |

**QUADRO 4.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS**

4.3.2- Elevação da Tensão de Saída

É utilizado um transformador para instrumentação para prover a elevação da tensão de saída do amplificador. Considerando que o nível máximo da tensão de saída deverá atingir 20 volts eficazes, um transformador de relação 1:6 é suficiente para que obtenha-se 115 volts de saída .

A carga é conectada no lado de alta tensão do transformador, onde, é utilizado um transformador de relação 1:8 e a impedância de carga deve ser tal que garanta que a impedância refletida no lado de baixa tensão do transformador (saída do amplificador ) não seja inferior a 8 OHMs. Assim, tem-se :

$$V_c = T \times V_o \qquad (4.5)$$

$$Z_c = T^2 \times Z_o \qquad (4.6)$$

onde,

- $V_o$ - Tensão de saída do amplificador
- $Z_o$ - Impedância de saída do amplificador
- $T$ - Relação de Transformação do Transformador
- $Z_c$ - Impedância mínima de carga do canal de tensão
- $V_c$ - Tensão aplicada à carga

Para

$T = 8$

$Z_o \geq 8\ \Omega$ $\qquad$ $Z_c \geq 8 \times 8^2$, ou seja ,

$$Z_c \geq 512\ \Omega$$

$V_o \leq 20$ v $\qquad$ $V_c \leq 160$ v

O diagrama da figura 4.12 representa o conjunto composto por amplificador de áudio e transformador que compõem o módulo de amplificação do canal de tensão. A variação do nível de tensão é feita controlando-se a tensão de excitação do amplificador.

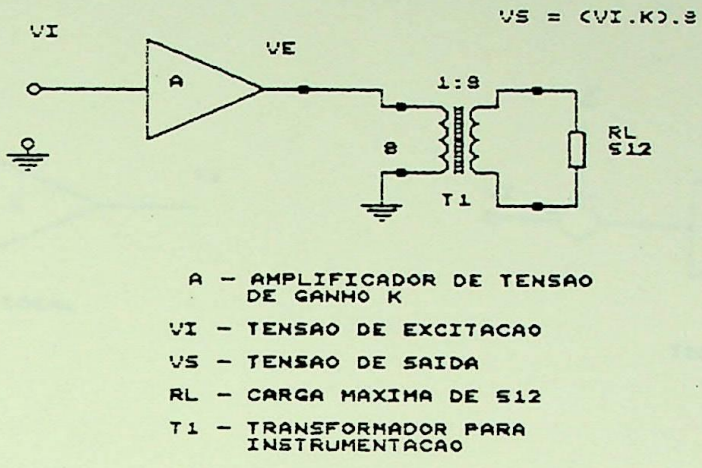


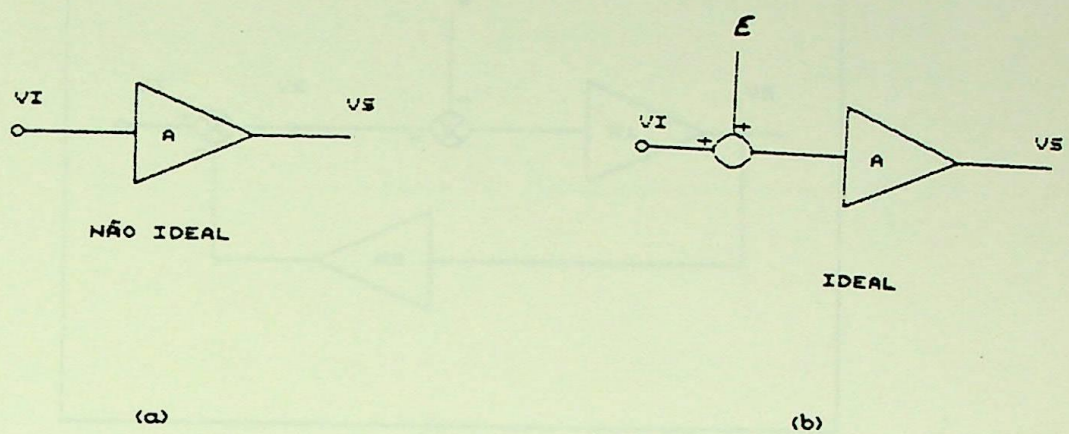

**FIG. 4.12 CONJUNTO AMPLIFICADOR-TRANSFORMADOR**

## 4.3.3- Redução de Distorções

A amplificação dos sinais de tensão incorre em distorções de fase e harmônicas de modo a denegrir o sinal de saída . Também é conhecido que há variação dos parâmetros do transistor com a variação de temperatura. Tais incovenientes são eliminados ou, pelo menos, minimizados quando adota-se um tipo de compensação adequada [2] .

A figura 4.13 a representa um amplificador não ideal que ao injetar-se um sinal VI, este, é somado com um erro $\varepsilon$ produzido pelo amplificador, amplificado. Se o amplificador da figura 4.13 a for substituído por um amplificador ideal, o erro será somado à entrada externamente de forma a manter a mesma equação que representa a saída ( VS ).

$VS = ( VI + \varepsilon ).K$ $VS = ( VI + \varepsilon ).K$

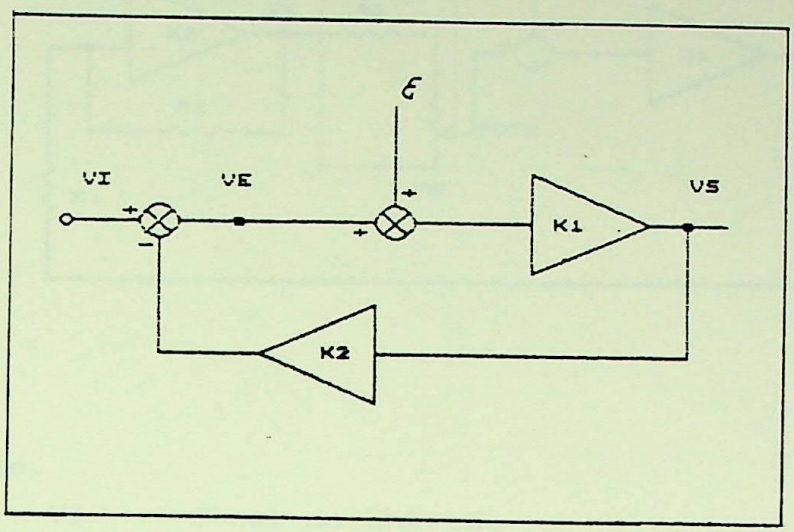



onde,

VI - Sinal de Entrada
VS - Sinal de Saída
K - Ganho do Amplificador
$\varepsilon$ - Erro Referente a Distorções Produzidas Pelo Próprio Amplificador

**FIG. 4.13 MODELOS MATEMÁTICOS DE AMPLIFICADORES**

Basicamete decidiu-se adotar para o amplificador de tensão, o mesmo processo utilizado na correção das distorções do amplificador de corrente, em vista dos resultados satisfatórios obtidos. O processo utilizado baseia-se no conceito de realimentação, que está representado no diagrama da figura 4.14 onde adota-se um modelo matemático utilizando realimentação negativa. Note-se que, o sinal de entrada é introduzido juntamente com uma parcela do sinal de saída somados negativamente.

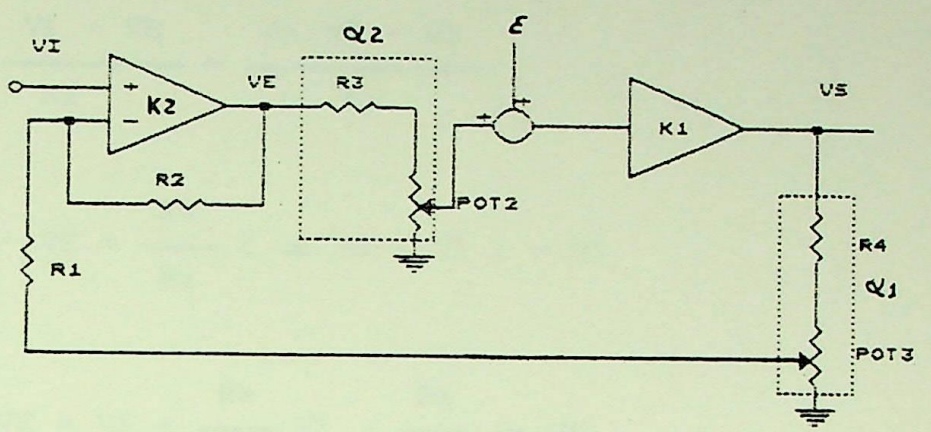



onde,

VI - Sinal de Entrada
VS - Sinal de Saída
$K_1$ - Ganho do Amplificador
$K_2$ - Taxa de Realimentação

**FIG. 4.14 MODELO ILUSTRATIVO DA REALIMENTAÇÃO NEGATIVA DO SINAL DE TENSÃO**

Para o amplificador de tensão, foi utilizado o modelo matemático da figura 4.15 que representa o processo de realimentação encarregado de minimizar as distorções produzidas por esse amplificador. Note-se que o amplificador operacional é utilizado como um bloco somador cujo ganho é controlado pelo potenciômetro $POT_1$ que juntamente com $\alpha_1$ determina a taxa de realimentação. $\alpha_2$ controla a excitação do amplificador de tensão.




Onde,

VI - Sinal de Entrada

VS - Sinal de Saída

VE - Sinal de Excitação do Amplificador de Tensão

$\varepsilon$ - Distorções Produzidas Pelo Amplificador

$\alpha_1$ - Ganho Controlado por $Pot_3$

$\alpha_2$ - Ganho Controlado por $Pot_2$

$K_2$ - Ganho do Amplificador Operacional

$K_1$ - Ganho do Amplificador de Tensão

FIG. 4.15 MODELO FINAL UTILIZADO PARA MINIMIZAR DISTORÇÕES

Na figura 4.15 ,

$$VS = ( \alpha_2 . VE + \varepsilon ) . K_1 \qquad (4.7)$$

Considerando que na entrada do Amplificador Operacional existe um curto virtual [13, 15], tem-se:

$$\frac{VI - VE}{R_2} = \frac{\alpha_1 . VS - VI}{R_1}$$

$$- VE = \frac{R_2}{R_1} ( \alpha_1 . VS - VI ) - VI$$

$$VE = VI + \frac{R_2}{R_1} VI - \frac{R_2}{R_1} \alpha_1 . VS \qquad (4.8)$$

Aplicando a equação 4.8 na equação 4.7 , tem-se:

$$VS = \alpha_2 . K_1 . ( VI + \frac{R_2}{R_1} VI - \frac{R_2}{R_1} \alpha_1 . VS ) + K_1 . \varepsilon$$

Fazendo $\frac{R_2}{R_1} = K_2$ , tem-se:

$$VS = \alpha_2 . K_1 . VI + K_2 . \alpha_2 . K_1 . VI - K_2 . \alpha_1 . \alpha_2 . K_1 . VS + K_1 . \varepsilon \Rightarrow$$

$$VS + K_2 . \alpha_1 . \alpha_2 . K_1 . VS = ( \alpha_2 . K_1 + K_2 . \alpha_2 . K_1 ) . VI + K_1 . \varepsilon \Rightarrow$$

$$VS = \frac{( \alpha_2 . K1 + K_2 . \alpha_2 . K_1 ) . VI + K_1 . \varepsilon}{1 + \alpha_1 . \alpha_2 . K_1 . K_2} \qquad ( 4.9 )$$

Para $K_2 \gg K_1$ , por exemplo $K_2 = 1000$ e $K_1 = 1$ ,
a equação 4.9 torna-se:

$$VS = \frac{( \alpha_2 + 1000.\alpha_2 ).VI + \varepsilon}{1 + 1000.\alpha_1.\alpha_2} \Rightarrow$$

$$VS = \frac{1000.\alpha_2.VI + \varepsilon}{1000.\alpha_1.\alpha_2} \quad , \text{ Para } \alpha_1 = 0{,}1 \text{ e } \alpha_2 = 1 \ ,$$

tem-se: $VS = 10.VI + 0{,}01.\varepsilon$ ( 4.10 )

Para $K_2 \ll K_1$ , por exemplo $K_2 = 1$ e $K_1 = 1000$ ,

a equação 4.9 torna-se:

$$VS = \frac{( \alpha_2 + 1000.\alpha_2 ).VI + 1000.\varepsilon}{1 + 1000.\alpha_1.\alpha_2} \Rightarrow$$

$$VS = \frac{1000.\alpha_2.VI + 1000.\varepsilon}{1000.\alpha_1.\alpha_2} \quad , \text{ Para } \alpha_1 = 0{,}1 \text{ e } \alpha_2 = 1 \ ,$$

tem-se: $VS = 10.VI + 10.\varepsilon$ ( 4.11 )

A equação 4.10 demonstra que se houver um ajuste adequado dos ganhos $K_2$, $\alpha_1$ e $\alpha_2$, as distorções da forma de onda, bem como regulação serão substancialmente reduzidas.

É importante notar que, de qualquer forma existe um erro na saída do amplificador ( saída VS ) que, controlado adequadamente, pode tornar-se desprezível para efeitos práticos.

A impedância de saída do amplificador de tensão é alta, permitindo um nível alto de tensão de saída ( 20 volts eficazes ).

O diagrama esquemático final está representado na figura 4.16.

A placa de circuito impresso do amplificador de tensão se encontra no anexo A-9 e, no anexo A-10, se encontra a lista de componentes empregados .

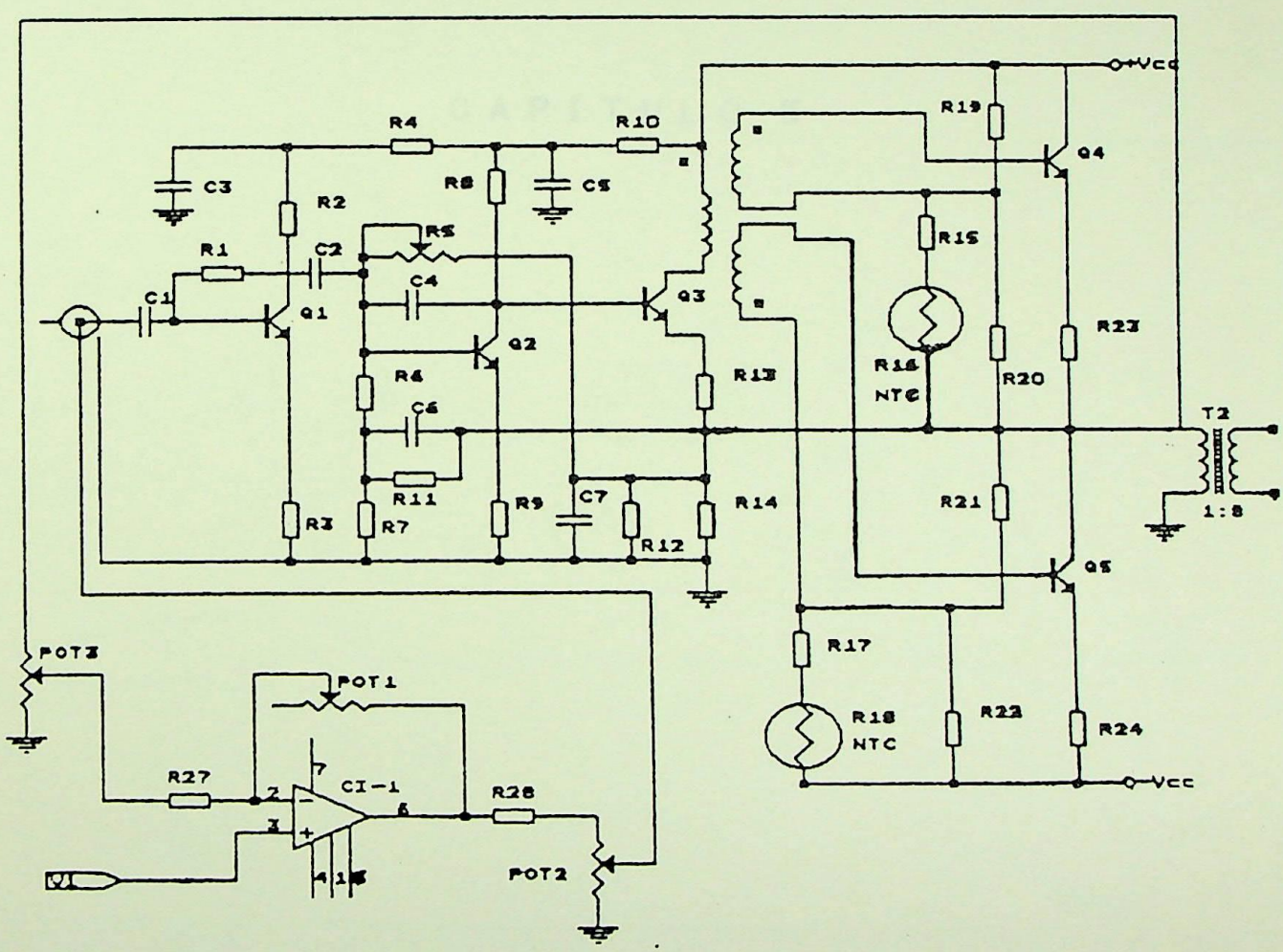



FIG. 4.16 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO AMPLIFICADOR DE TENSÃO

# CAPÍTULO 5

# CAPÍTULO 5 - OPERAÇÃO DO GERADOR DE ONDAS SINTETIZADAS

## 5.1- Introdução

O gerador de ondas sintetizadas foi projetado para 6 módulos que, interligados, possibilitam a reprodução de sistemas trifásicos equilibrados e ou desequilibrados harmônicos ou não.

Uma vez que os módulos escravos são idênticos e que a operação do equipamento com dois módulos é similar à operação do mesmo contendo seis módulos, este capítulo foi escrito para orientação da operação da versão básica ( dois módulos ) do gerador de ondas sintetizadas. A figura 5.1 ilustra o gerador de ondas sintetizadas versão básica.

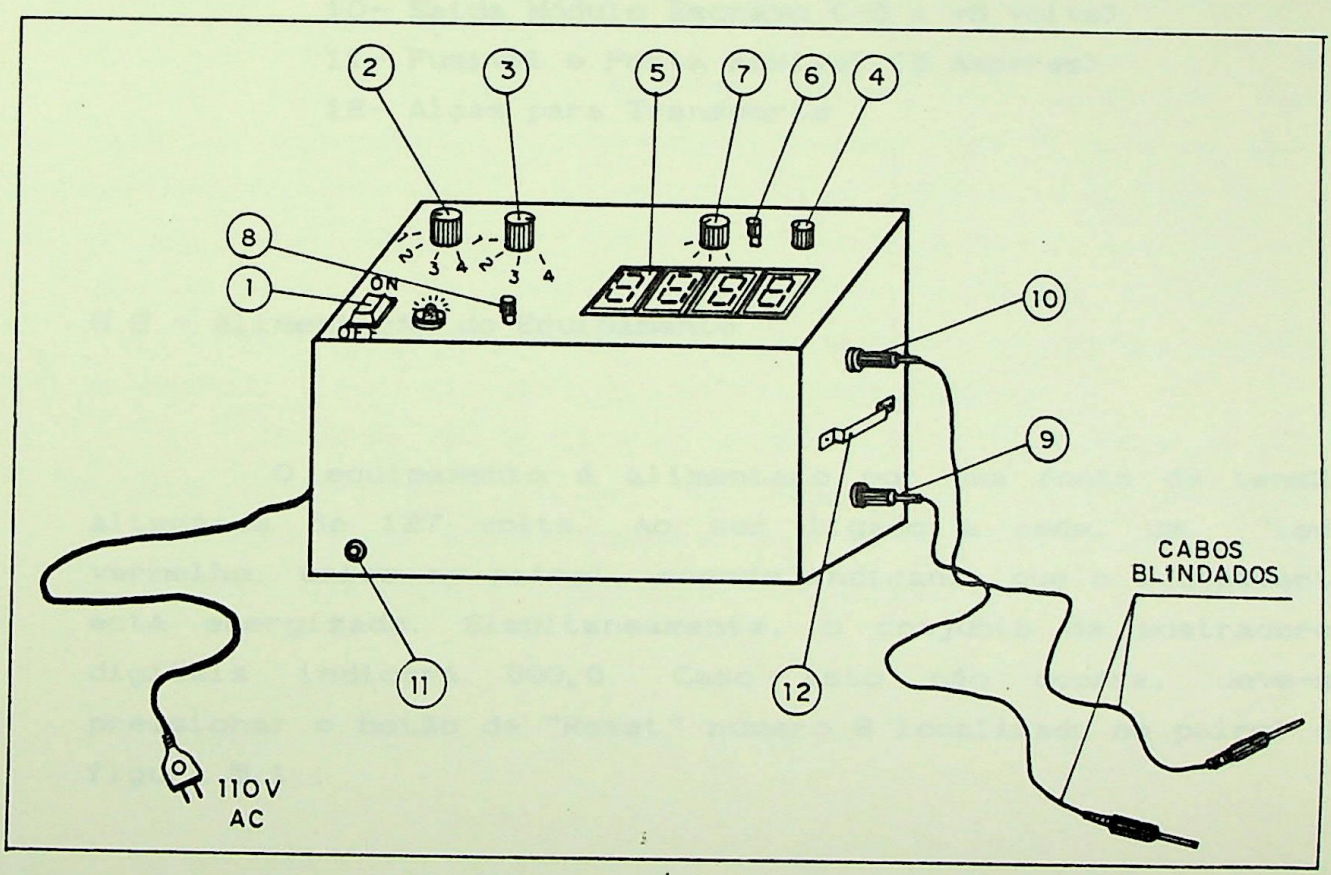



FIG. 5.1 O GERADOR DE ONDAS SINTETIZADAS

Onde,

1- Chave Liga/Desliga
2- Seleção de Onda Mestre
3- Seleção de Onda Escrava
4- Ajuste Fino de Freqüência dos Sinais
5- Indicadores de Defasagem
6- Variação de Defasagem
7- Ajuste de Freqüência de Variação de Defasagem
8- Zeramento de Defasagem
9- Saída Módulo Mestre (-5 a +5 volts)
10- Saída Módulo Escravo (-5 a +5 volts)
11- Fusível e Porta Fusível (5 Amperes)
12- Alças para Transporte

## 5.2 - Alimentação do Equipamento

O equipamento é alimentado por uma fonte de tensão alternada de 127 volts. Ao ser ligado à rede, um "led" vermelho, único no painel, acende indicando que o equipamento está energizado. Simultaneamente, o conjunto de mostradores digitais indicará 000,0. Caso isto não ocorra, deve-se pressionar o botão de "Reset" número 8 localizado no painel da figura 5.1 .

## 5.3 - Reprodução de Sinais

O segundo passo é ligar a chave "ON/OFF". Uma onda de

tensão aparecerá na saída 9 e outra na saída 10 , que deverão ser observadas em um osciloscópio de dois canais. O potenciômetro número 7 é utilizado para o ajuste fino da freqüência dos sinais.

## 5.4- Seleção das Formas de Onda

As chaves rotativas 2 e 3 fazem a seleção das formas de ondas reproduzidas pelos módulos mestre e escravo através da mudança de página das memórias.

## 5.5 - Variação de Defasagem

A chave número 6 ("Push-Button") é utilizada para permitir a variação de defasagem angular que é indicada pelo mostrador digital. A chave rotativa número 4 seleciona a freqüência desse "clock" que pode ser 0,5 Hz ou 1,0 Hz para ajuste fino e 10 Hz , ou 100 Hz para avanço rápido. Atingindo o número correspondente a defasagem angular desejada, deve-se pressionar novamente o botão preto, para fixá-la.

Nota-se no osciloscópio que o sinal reproduzido pelo módulo escravo se desloca no tempo em relação ao sinal reproduzido pelo módulo mestre numa taxa de variação de 0,5 grau antes que haja a fixação da defasagem.

## 5.6- Amplificação de Corrente e Tensão

Alguns cuidados devem ser tomados nos ensaios que utilizarão o gerador de ondas sintetizadas juntamente com o módulo de amplificação, visando a proteção do equipamento.

O primeiro, e principal, refere-se às impedâncias de carga que deverão ser conectadas às saídas dos amplificadores; o amplificador de corrente foi projetado para uma carga máxima de 0,85 Ω e o amplificador de tensão foi projetado para uma carga máxima de 512 Ω, conectada nos terminais do secundário do transformador de saída, conforme indicado nas tabelas de dados técnicos dos amplificadores.

O segundo cuidado refere-se a interferências que possivelmente possam vir a ser captadas pela fiação. A fim de evitar isto, deve-se usar cabos blindados para conectar o gerador de ondas sintetizadas aos amplificadores.

O controle de excitação do amplificador de corrente é feito através do potenciômetro **Pot1**; e no amplificador de tensão, controla-se a excitação e taxa de realimentação através dos potenciômetros **Pot1**, **Pot2** e **Pot3**, conforme indicado nas figuras ( 4.10 e 4.17).

# CAPÍTULO 6

# CAPITULO 6 - CONCLUSÕES FINAIS

## 6.1- Introdução

O **Sistema Gerador de Sinais**, utilizando tecnologia digital, proporciona um alto grau de aplicabilidade em ensaios de instrumentação elétrica.

O aplicativo computacional que acompanha o sistema possibilita uma versatilidade considerável, no que se refere a sua operação simples e à obtenção de formas de onda diversas, seja para aplicações em ensaios elétricos, seja para aplicações em estudos teóricos e práticos de harmônicos.

A circuitagem que completa o sistema possibilita uma gama elevada de aplicações em laboratórios ou mesmo em ensaios elétricos em campo.

Constitui-se de um equipamento de simples operação, factível, versátil, portátil , e de grande utilidade em laboratórios de instrumentação.

## 6.2- Ensaios Realizados Utilizando o Sistema Gerador de Sinais

### 6.2.1- Introdução

Para fins de testes do equipamento, foi utilizado o gerador de ondas sintetizadas juntamente com o módulo de amplificação para análise de desempenho de alguns instrumentos de medição elétrica sob a influência de sinais elétricos deformados. As formas de onda foram obtidas através do programa e gravadas em memórias "EPROM".

6.2.2- Desenvolvimento

Os equipamentos de medição elétrica analisados foram:

- Amperímetro analógico tipo **bobina móvel** de fabricação **Hartmann & Braun do brasil**, classe de exatidão **1%** ;
- Amperímetro digital de fabricação ICEL MODELO 5660 C , classe de exatidão 1% + 3d;
- Voltímetro analógico tipo **bobina móvel** de fabricação **Hartmann & Braun do brasil**, classe de exatidão **1%** ;
- Voltímetro digital de fabricação ICEL MODELO 5660 C , classe de exatidão 1% + 3d ;
- Wattímetro analógico de fabricação **Hartmann & Braun do brasil**, classe de exatidão **1%** .

As medidas de tensão e corrente efetuadas por esses equipamentos foram comparadas com as medidas efetuadas por um equipamento tipo **Beckmam 3030**, o qual mede valor eficaz verdadeiro de corrente ou tensão para qualquer forma de onda aplicada, motivo pelo qual sua medida foi tomada como parâmetro de comparação .

Os ensaios foram realizados visando analisar as medidas de tensão, corrente e potência, totalizando seis ensaios.

a) - Medida de Tensão

A figura 6.1 ilustra o diagrama de ligação do gerador de ondas sintetizadas para efetuar medidas de tensão.

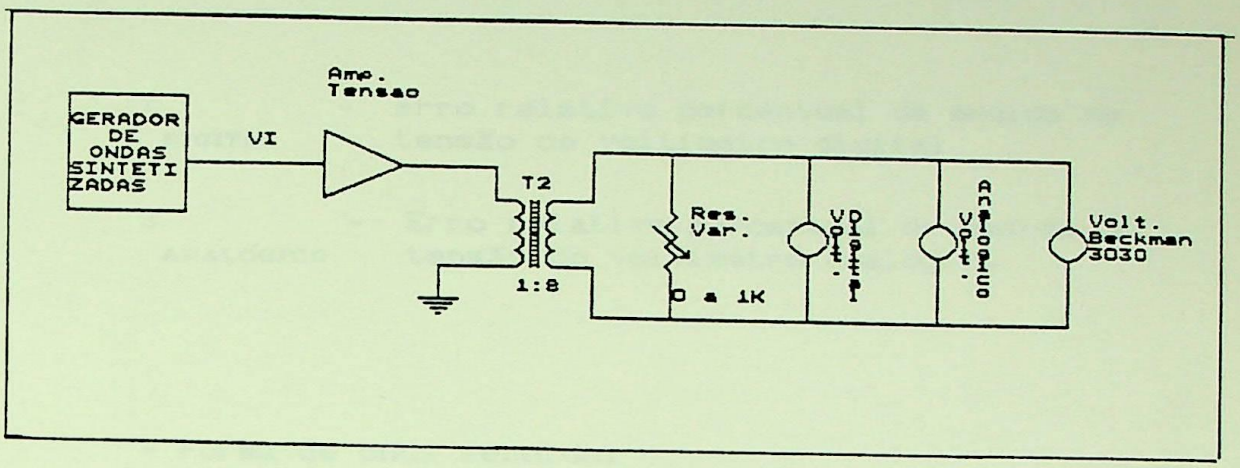



FIG. 6.1 DIAGRAMA DE LIGAÇÃO PARA MEDIDA DE TENSÃO

SINAL COM A FORMA DE ONDA SENOIDAL

| | | |
|---|---|---|
| Voltímetro beckman 3030 | 100,0 | ( V RMS VERDADEIRO ) |
| Voltímetro digital | 100,5 | ( V RMS FALSO ) |
| Voltímetro analógico | 99,0 | ( V RMS FALSO ) |

SINAL COM A FORMA DE ONDA QUADRADA

| | | |
|---|---|---|
| Voltímetro beckman 3030 | 141,3 | ( V RMS VERDADEIRO ) |
| Voltímetro digital | 155,5 | ( V RMS FALSO ) |
| Voltímetro analógico | 135,0 | ( V RMS FALSO ) |

a-1 ) Cálculos de erros relativos

Tomando-se a medida do voltímetro **beckman 3030** como referência, tem-se para os demais voltímetros analisados os respectivos erros, onde,

$\varepsilon_{DIGITAL}$ - Erro relativo percentual de medida de tensão do voltímetro digital

$\varepsilon_{ANALÓGICO}$ - Erro relativo percentual de medida de tensão do voltímetro analógico

- Forma de onda senoidal

$$\varepsilon_{DIGITAL} = \frac{100,5 - 100,0}{100,0} \times 100 = + 0,50\ \%$$

$$\varepsilon_{ANALÓGICO} = \frac{99,0 - 100,0}{100,0} \times 100 = - 1,00\ \%$$

- Forma de onda quadrada

$$\varepsilon_{DIGITAL} = \frac{155,5 - 141,3}{141,3} \times 100 = + 10,05\ \%$$

$$\varepsilon_{ANALÓGICO} = \frac{135,0 - 141,3}{141,3} \times 100 = - 4,46\ \%$$

b) - Medida de Corrente

A figura 6.2 ilustra o diagrama de ligação do gerador de ondas sintetizadas para efetuar medidas de corrente.

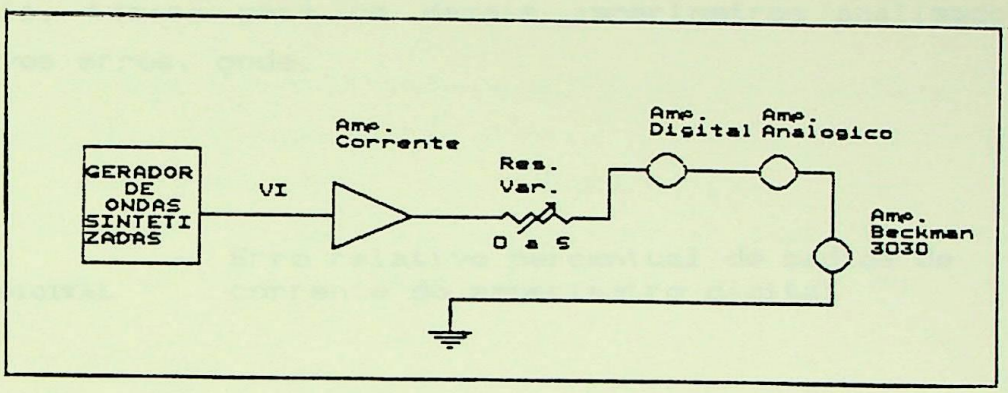



FIG. 6.2 DIAGRAMA DE LIGAÇÃO PARA MEDIDA DE CORRENTE

SINAL COM A FORMA DE ONDA SENOIDAL

| | | |
|---|---|---|
| Amperímetro beckman 3030 | 3,02 | ( A RMS VERDADEIRO ) |
| Amperímetro digital | 2,99 | ( A RMS FALSO ) |
| Amperímetro analógico | 3,0 | ( A RMS FALSO ) |

SINAL COM A FORMA DE ONDA QUADRADA

| | | |
|---|---|---|
| Amperímetro **beckman 3030** | 4,19 | ( A RMS VERDADEIRO ) |
| Amperímetro **digital** | 4,55 | ( A RMS FALSO ) |
| Amperímetro **analogico** | 4,1 | ( A RMS FALSO ) |

b-1 ) Cálculos de erros relativos

Tomando-se a medida do amperímetro **beckman 3030** como referência, tem-se para os demais amperímetros analisados os respectivos erros, onde,

$\varepsilon_{DIGITAL}$ - Erro relativo percentual de medida de corrente do amperímetro digital

$\varepsilon_{ANALOGICO}$ - Erro relativo percentual de medida de corrente do amperímetro analógico

- Forma de onda senoidal

$$\varepsilon_{DIGITAL} = \frac{2,99 - 3,02}{3,02} \times 100 = - 0,99\ \%$$

$$\varepsilon_{ANALOGICO} = \frac{3,0 - 3,02}{3,02} \times 100 = - 0,66\ \%$$

- Forma de onda quadrada

$$\varepsilon_{DIGITAL} = \frac{4,55 - 4,19}{4,19} \times 100 = + 8,59\ \%$$

$$\varepsilon_{ANALÓGICO} = \frac{4,1 - 4,19}{4,19} \times 100 = - 2,15\ \%$$

c) - Medida de potência

A figura 6.3 ilustra o diagrama de ligação do gerador de ondas sintetizadas para efetuar medidas de potência. Os valores de potência de referência foram calculos matematicamente por definição, tomando-se como verdadeiros os valores de corrente e tensão medidos pelos medidores beckman 3030.

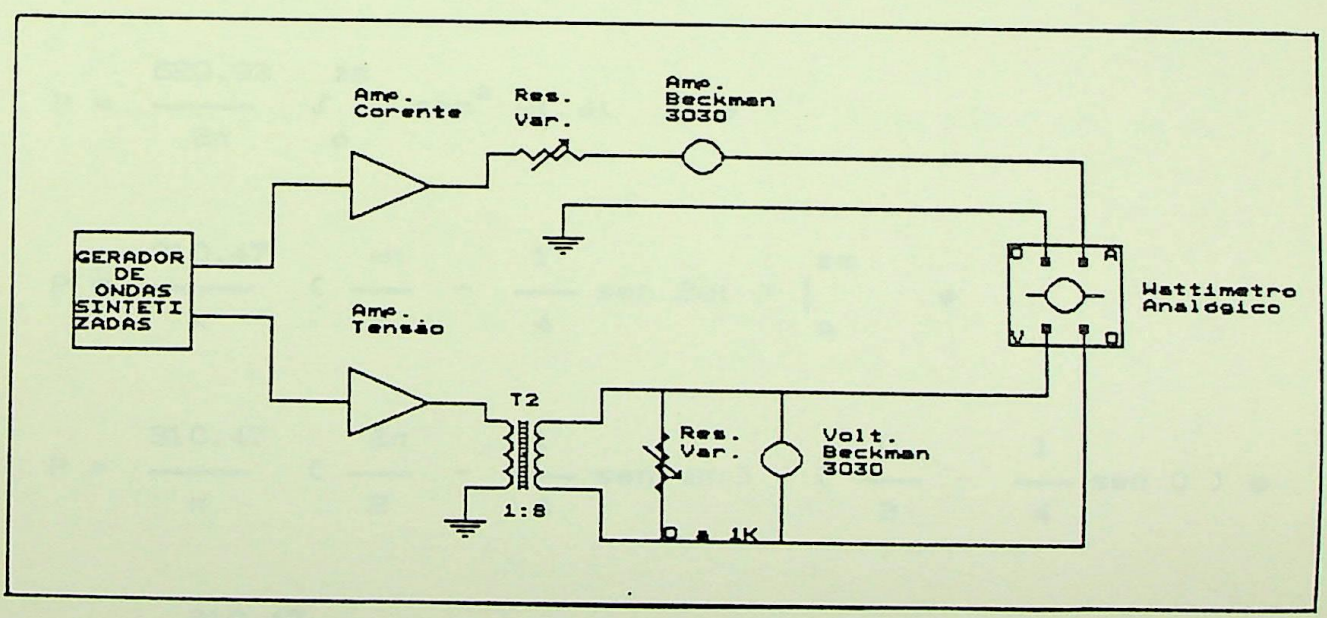



FIG. 6.3 DIAGRAMA DE LIGAÇÃO PARA MEDIDA DE POTÊNCIA

# TENSÃO E CORRENTE COM FORMAS DE ONDA SENOIDAIS

| | | |
|---|---|---|
| Voltímetro beckman 3030 | 98,0 | ( V RMS VERDADEIRO ) |
| Amperímetro beckman 3030 | 3,17 | ( V RMS VERDADEIRO ) |
| Wattímetro analogico | 311,0 | ( W RMS FALSO ) |

Tensão de pico de referência $= \sqrt{2}$ ( V RMS VERDADEIRO ) =

$\sqrt{2} \cdot 98 = 138,59$ [V]

Corrente de pico de referência $= \sqrt{2}$ ( A RMS VERDADEIRO ) =

$\sqrt{2} \cdot 3,17 = 4,48$ [A]

$P = \frac{1}{T} \int_0^t v.i.dt$ , então para o caso, tem-se:

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} ( 4,48.\operatorname{sen} \omega t \cdot 138,6 \operatorname{sen} \omega t ) \, dt \Rightarrow$$

$$P = \frac{620,93}{2\pi} \int_0^{2\pi} \operatorname{sen}^2 \omega t . dt \Rightarrow$$

$$P = \frac{310,47}{\pi} \left( \frac{\omega t}{2} - \frac{1}{4} \operatorname{sen} 2\omega t \right) \Big|_0^{2\pi} \Rightarrow$$

$$P = \frac{310,47}{\pi} \left( \frac{2\pi}{2} - \frac{1}{4} \operatorname{sen} 4\pi \right) - \left( \frac{0}{2} - \frac{1}{4} \operatorname{sen} 0 \right) \Rightarrow$$

$$P = \frac{310,47}{\pi} ( \pi ) \Rightarrow$$

**P = 310,47 ( W RMS VERDADEIRO )**

TENSÃO COM A FORMA DE ONDA SENOIDAL E
CORRENTE COM A FORMA DE ONDA QUADRADA

| | | |
|---|---|---|
| Voltímetro beckman 3030 | 98,0 | ( V RMS VERDADEIRO ) |
| Amperímetro beckman 3030 | 4,29 | ( V RMS VERDADEIRO ) |
| Wattímetro analogico | 390,0 | ( W RMS FALSO ) |

Tensão de pico de referência $= \sqrt{2}$ ( V RMS VERDADEIRO ) =
$\sqrt{2}$ . 98 = 138,59 [V]

Corrente de pico de referência = 1 . ( A RMS VERDADEIRO ) =
1 . 4,29 = 4,29 [A]

$$P = \frac{1}{T} \int_{o}^{t} v.i.dt \text{ , então, para o caso, tem-se:}$$

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_{o}^{\pi} 4,29.138,6.\text{sen } \omega t \; dt + \frac{1}{2\pi} \int_{\pi}^{2\pi} -4,29.138,6.\text{sen } \omega t \; dt$$

$$P = \frac{594,6}{2\pi} \left( -\cos \omega t \right) \Big|_{o}^{\pi} - \frac{594,6}{2\pi} \left( -\cos \omega t \right) \Big|_{\pi}^{2\pi} \Rightarrow$$

$$P = -94,6 \left[ \left( -1 \; -1 \right) - \left( 1 \; +1 \right) \right] = -94,6 \; . \; (-4) \Rightarrow$$

$$P = 378,4 \text{ ( W RMS VERDADEIRO )}$$

c-1 ) Cálculos de erros relativos

- Tensão e corrente com formas de onda senoidais

$$\varepsilon_{\text{ANALÓGICO}} = \frac{311,0 - 310,47}{310,47} \times 100 = + 0,17\ \%$$

- Tensão com forma de onda senoidal e corrente quadrada

$$\varepsilon_{\text{ANALÓGICO}} = \frac{390,0 - 378,4}{378,4} \times 100 = + 3,07\ \%$$

onde,

$\varepsilon_{\text{ANALÓGICO}}$ - Erro relativo percentual de medida de potência

d) - Análise dos resultados

Como pode ser observado, pode-se considerar a classe de exatidão dos equipamentos de medição apenas quando tratar de medidas com sinais senoidais puros. Note-se que o erro relativo para as medidas de corrente, tensão e potência para formas de onda senoidais, permanece dentro da classe de exatidão dos equipamentos, por outro lado , quando se trata de medições destas grandezas com formas de onda deformadas, por exemplo a onda quadrada, o erro aumenta sensivelmente, chegando a atingir a casa dos 10 % em alguns casos.

Sendo assim, não se pode garantir a classe de exatidão dos equipamentos de medição quando se tratar de ondas harmônicas, em outras palavras, em caso de medição de sinais com deformações, não se deve utilizar os equipamentos de medidas elétricas convencionais.

## 6.3- Limitações

As limitações básicas do equipamento são:

- A potência simulada envolvendo um canal de tensão e um canal de corrente é de **650 W** no máximo o que é suficiente para a maioria das aplicações.
- Freqüência fundamental de saída de **60 Hz** com reprodução de até a $64^{a}$ harmônica com possibilidade de mudar a freqüência fundamental para cima ou para baixo conforme seja necessario, por exemplo: **50 Hz, 400 Hz, etc.** No entanto, a maior freqüência contida no sinal ficará limitada à banda passante dos amplificadores.

## 6.4- Aplicações

Algumas aplicações do equipamento podem ser enumeradas sem que haja qualquer alteração do projeto original, são elas:

- Produção de sinais deformados na freqüência industrial para estudos de influência de harmônicos na instrumentação de medição e proteção elétrica;
- Aferição de instrumentação de medição e proteção;
- Ensaios em filtros digitais;
- Estudos de desequilíbrio de fase na proteção;
- Ensaios dinâmicos de proteção;
- Aferição de sistemas de aquisição de dados;

- Estudos de componentes simétricas;
- Simulação de cargas indutivas e capacitivas;
- Simulação de sistemas polifásicos de corrente e tensão;
- Simulação de inversão de potência;
- Outros.

## 6.5- Futuros Trabalhos

Esse trabalho, por si, não é estanque e abre perspectivas a outros que visam continuá-lo.

Existem aspectos a serem considerados em termos de projeto do equipamento, que viriam melhorar a sua eficiência, expandindo sua aplicação, e ainda, melhorar seu desempenho.

Sendo assim, algumas alterações podem ser feitas visando extender a utilização do sistema a outras aplicações, são elas:

- Aprimoramento do módulo de amplificação utilizando transistores "FET" de potência para a elevação dos níveis de corrente e tensão e, consequentemente, elevação da potência simulada pelo equipamento;
- Substituição da base de tempo de 43200 Hz por uma a cristal para melhorar a estabilidade em freqüência.
- Dispor outras freqüências que não a de 43200 Hz para ensaios específicos tais como análise de resposta em freqüência de TC's e TP's, ensaio de freqüência insdustrial em 120 Hz, sobretensões de origem harmônica, outros.
- Bloqueio do circuito de zeramento e reinício de contagem para produzir um pulso singelo e previamente modelado pelo aplicativo computacional para análise dinâmica em instrumentação elétrica.
- Substituição do circuito de zeramento e reinício de contagem por um circuito de sincronismo ligado a uma rede elétrica qualquer. Esse procedimento permitirá que o gerador de ondas

sintetizadas fique em sincronismo com um sistema elétrico externo a ele.

- Utilização "stand-alone" do decodificador binário pleno (10 "bits") x "BCD" (4 dígitos) que mostrou-se eficiente, de grande utilidade, baixo custo e simples implementação, como "display" não convencional.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


[1] - BOGNER, R. E. - "Introduction to Digital Filtering" - Ed. John Wiley e Sons, Ltd. - 1977

[2] - CAMERON, D - "Handbook of Audio Circuit Design" - Reston Publishing Company, Inc., 1978

[3] - CIPELLI, A. M. V. - Teoria e Desenvolvimento de Projetos Eletrônicos (14ª edição) - Ed. Érica, 1982

[4] - GRILLO, M. C. A. - Turbo Pascal 4.0 ( 2ª edição ) - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 1987

[5] - IBRAPE - Transistores, Diodos, Curvas e Projetos
- INTEL - "Advance Information"
- NATIONAL - "Semiconductor, Linear Databook"
- NATIONAL - "Linear Applications Handbook"
- TEXAS INSTRUMENTS - "The TTL Databook"

[6] - ISHIDA T. - Turbo Pascal 5 - ED. Atlas , 1989

[7] - MILMAN, H - "Integrated Eletronics" , Vol 1 e 2 - Ed. McGraw-Hill, 1981

[8] - MORGAN C. P. - "The Byte Book of Computer Music" - Ed. Byte, 1979

[9] - Library of Congress Catalog Card Number 75.60034 National Bureau of Standards Technical Note 870

[10] - SENBAKKEN, G. N - "Sampling Wattmeter" - IEEE Transaction on Power Apparatus And System, Vol. Pas-103, nº 10, october 1984

[11] - SOLON, M. F. - Fundamentos de Medidas de Energia Elétrica (2ª edição) - Ed. Guanabara Dois, 1981

[12] - SOLON, M. F. - Fundamentos de Medidas Elétricas - Ed. Guanabara Dois, 1981

[13] - TOBEY, GRAEME, HUELSMAN - "Operational Amplifiers" - Ed. McGraw-Hill, 1971

[14] - TURGEL, R. S. - "Digital Wattmeter Using Sampling Method" - IEEE Transactions on Instrumentation And Measurement Vol. IM-23, nº 4 December 1974, pp. 337-341

[15] - WAIT, J. N. - "Introduction to Operational Amplifier"- "Theory And Applications" - Ed. McGraw-Hill, 1977

# A N E X O  A-1
# PROGRAMA GERAROM

```
PROGRAM GeraRom;

Type RomBuffer = Array[0..1023] of byte;

Var

     Rom0,Rom1,Rom2          : RomBuffer;
     Rom1file,Rom2file       : File of RomBuffer;
     I,Resto,Grau,Centena,
     Dezena,Unidade          : Integer;


BEGIN

     For i:=0 to 719 do

          Begin
            Resto:= i Mod 2;
            Grau := i Div 2;
            Centena := Grau Div 100;
            Grau := Grau - 100 * Centena;
            Dezena := Grau Div 10;
            Unidade := Grau - 10 * Dezena;
            Resto := 5 * Resto;
            Rom1[i] := 16 * Centena + Dezena;
            Rom2[i] := 16 * Unidade + Resto;
          End;

    For i:= 720 to 1023 do

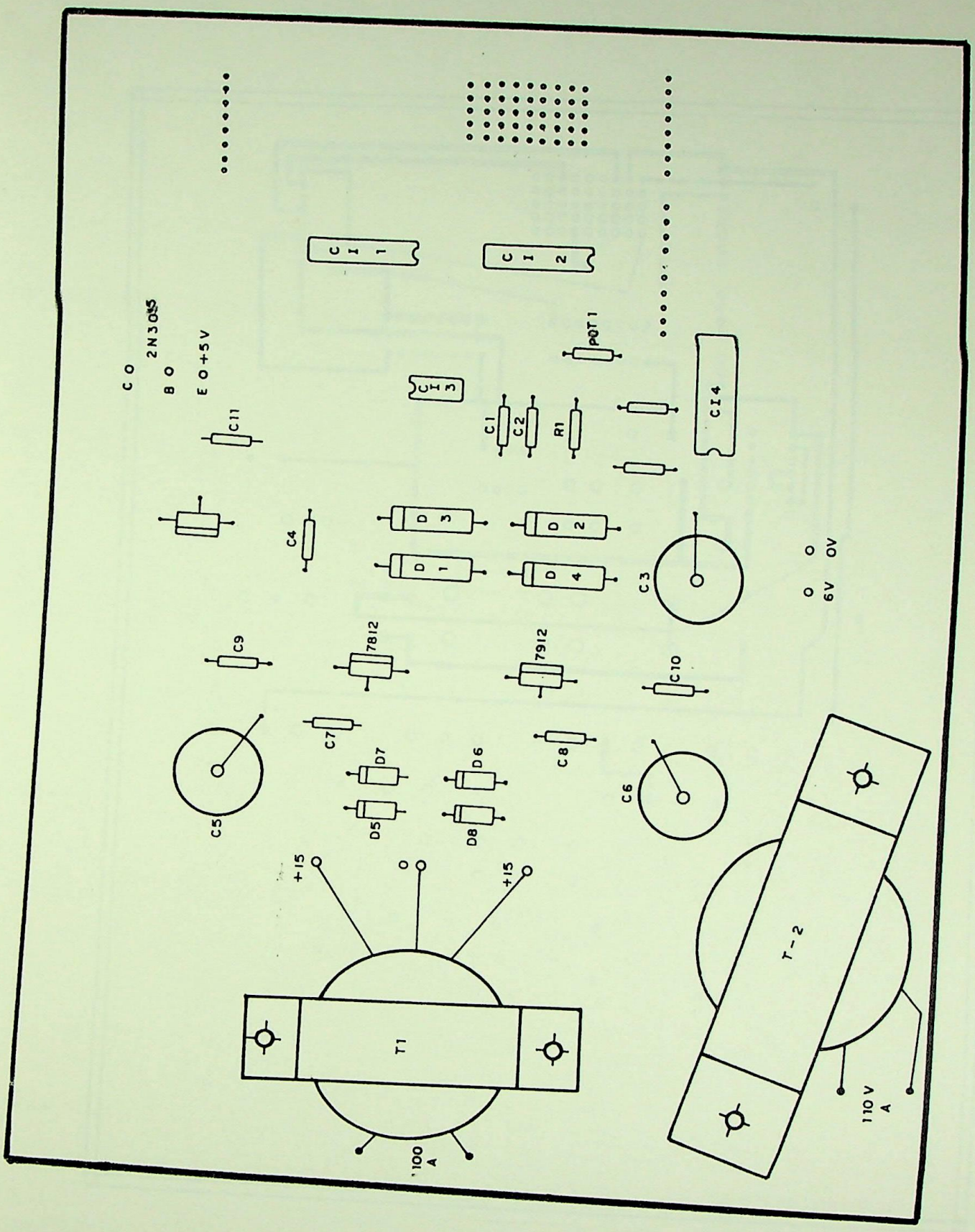
          Begin
            Rom0[i] := 255;
            Rom1[i] := 255;
          End;

     Assign(rom1file , 'Rom1.DAT');
     Rewrite(rom1file);
     Write(rom1file,rom1);
     Close(rom1file);
     Assign(rom2file, 'Rom2.DAT');
     Rewrite(rom2file);
     write(rom2file,rom2);
     Close(rom2file);

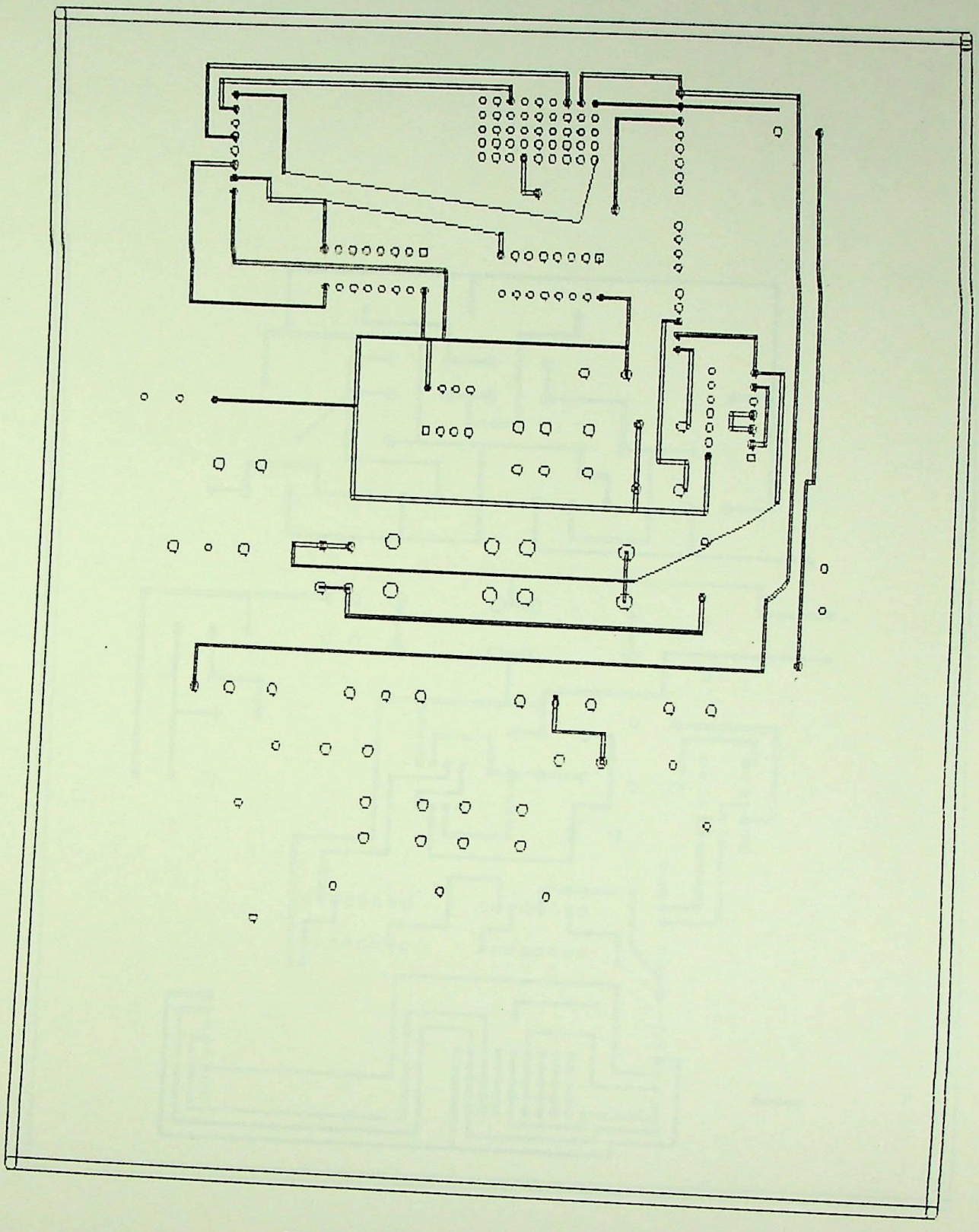
END.
```

# A N E X O  A-2

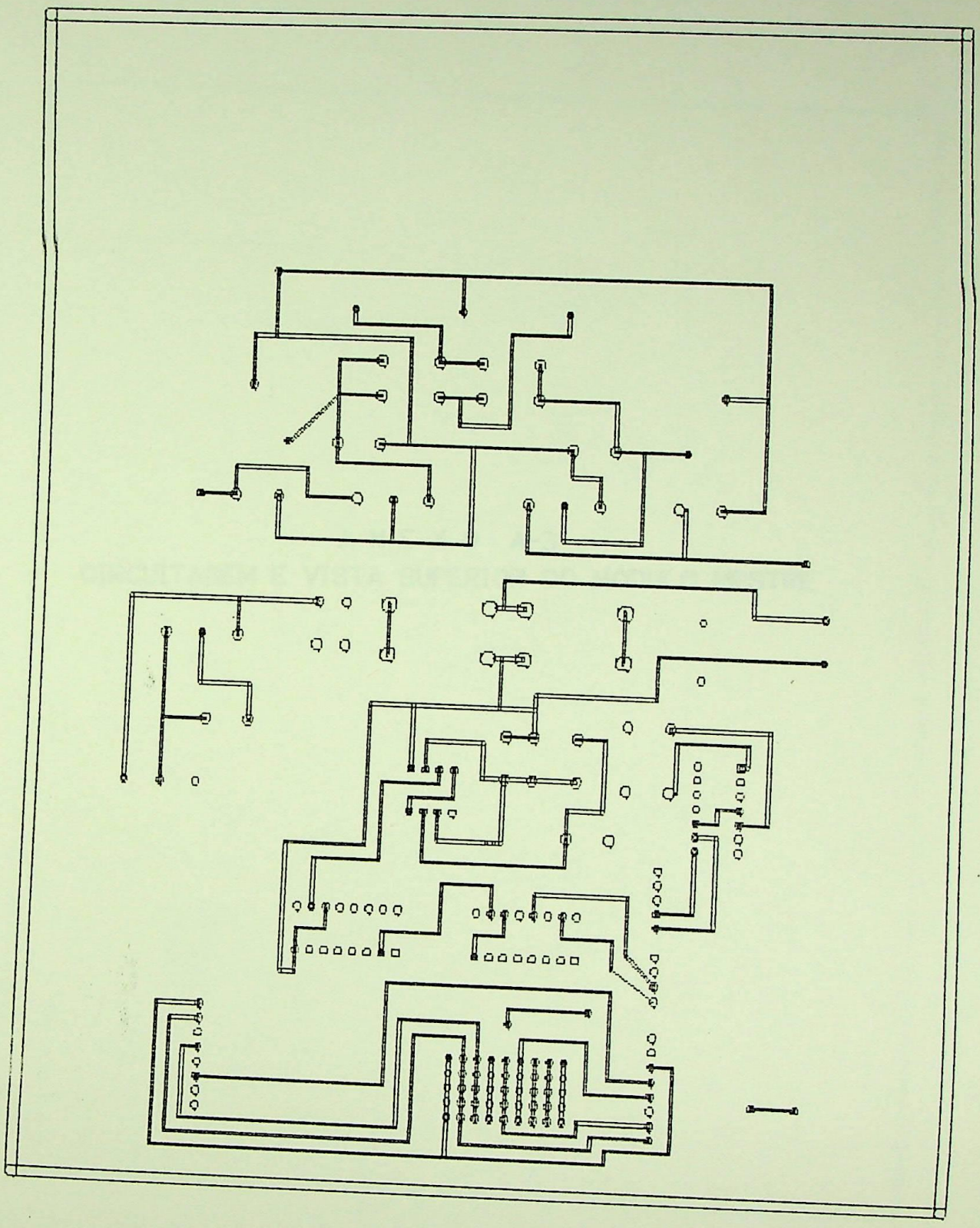
## CIRCUITAGEM DO MÓDULO PRINCIPAL




VISTA SUPERIOR DO MODULO PRINCIPAL



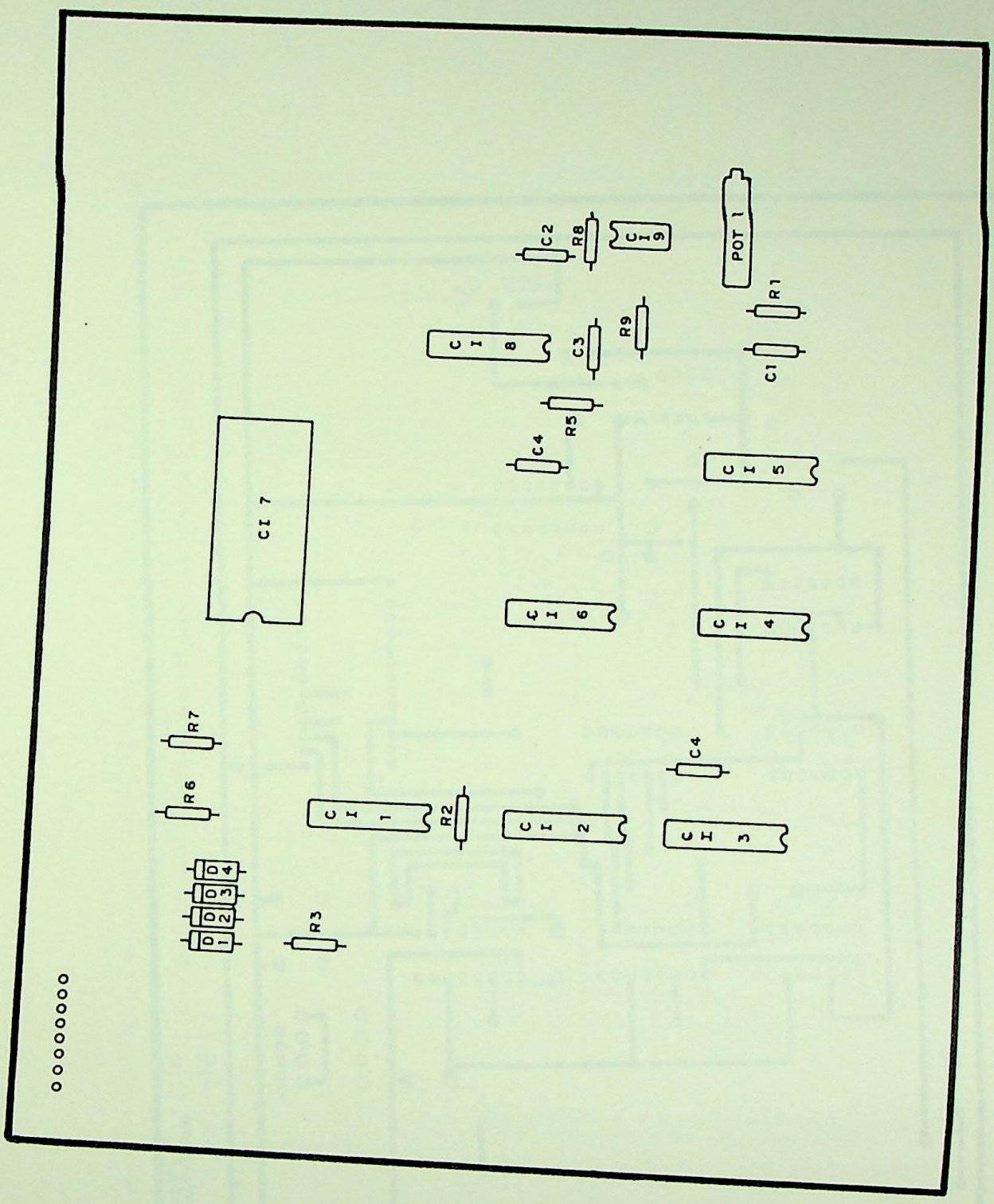
CIRCUITAGEM DO MODULO PRINCIPAL
LADO DO COMPONENTE



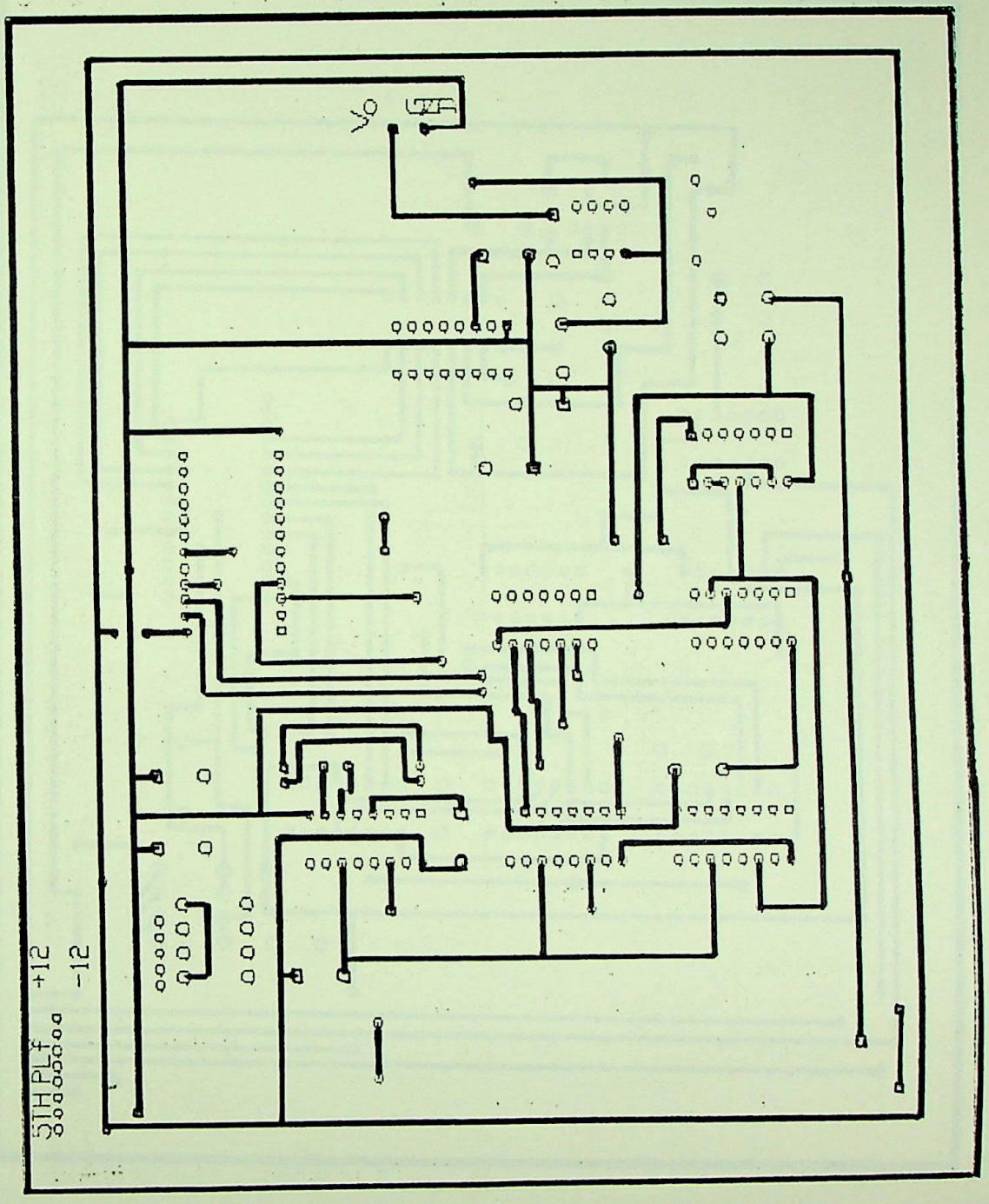
CIRCUITAGEM DO MODULO PRINCIPAL
LADO DO COBRE

# A N E X O  A-3

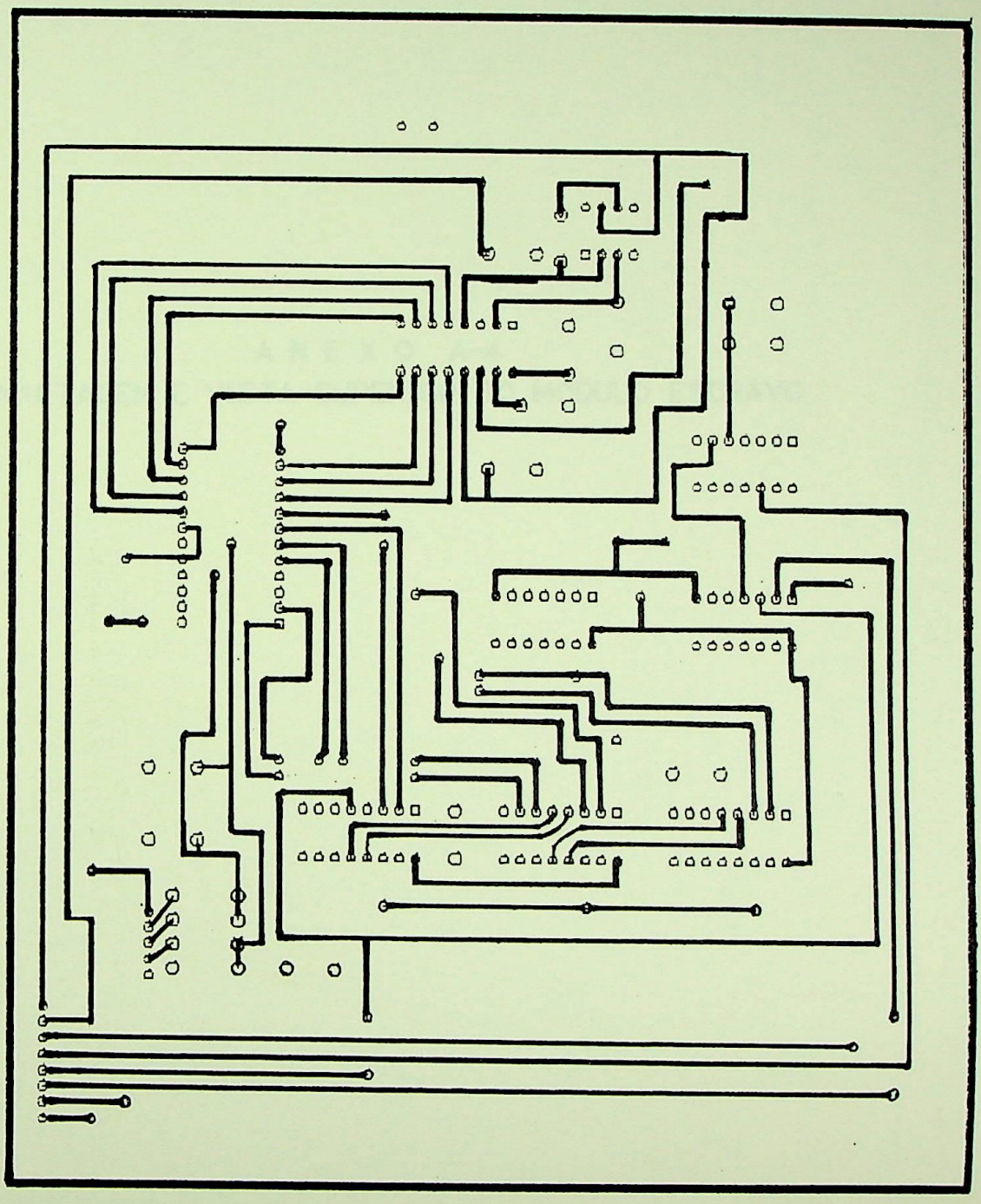
## CIRCUITAGEM E VISTA SUPERIOR DO MÓDULO MESTRE




VISTA SUPERIOR DO MODULO MESTRE




CIRCUITAGEM DO MODULO MESTRE
LADO DO COMPONENTE

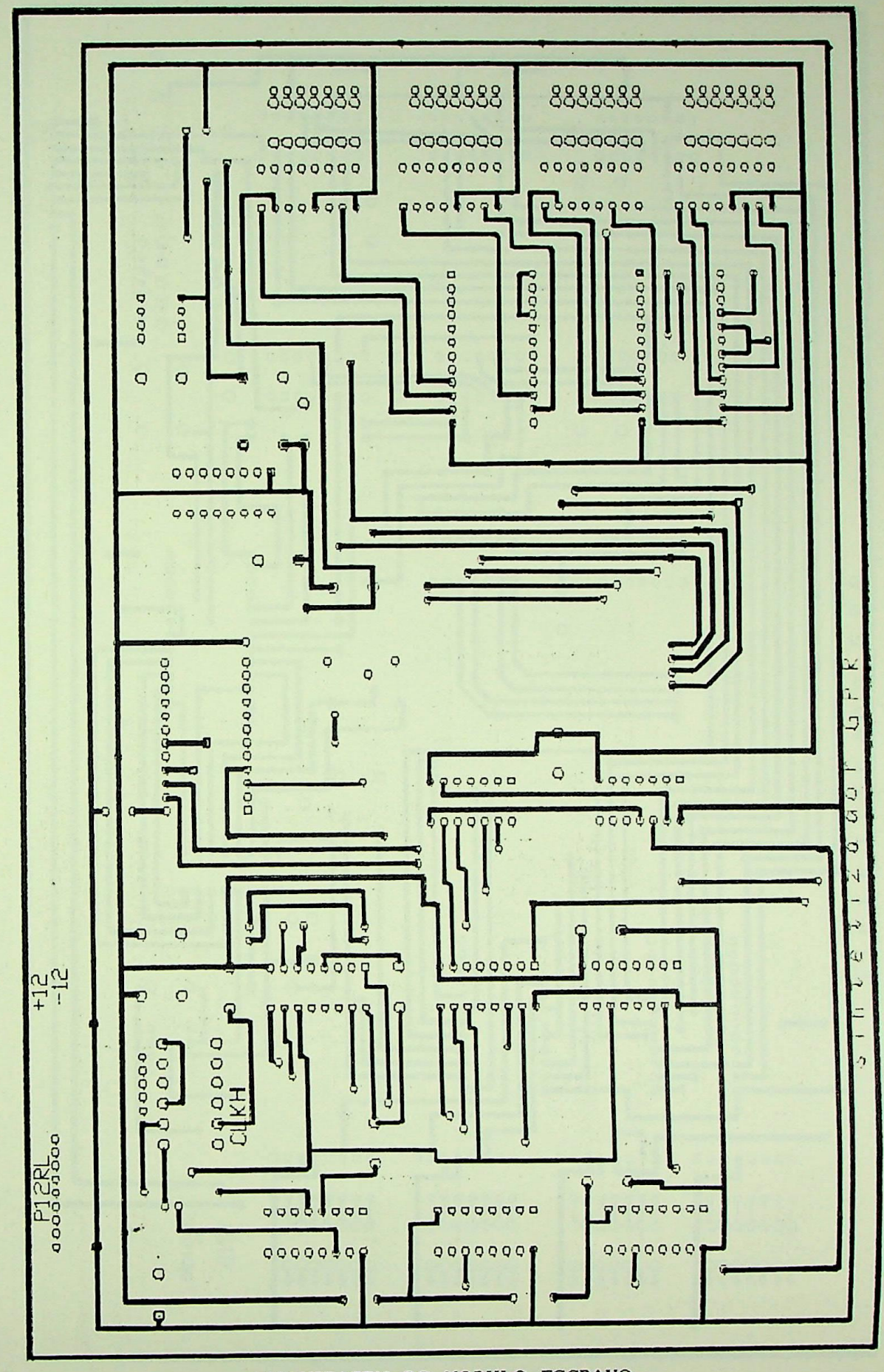


CIRCUITAGEM DO MÓDULO MESTRE
LADO DO COBRE

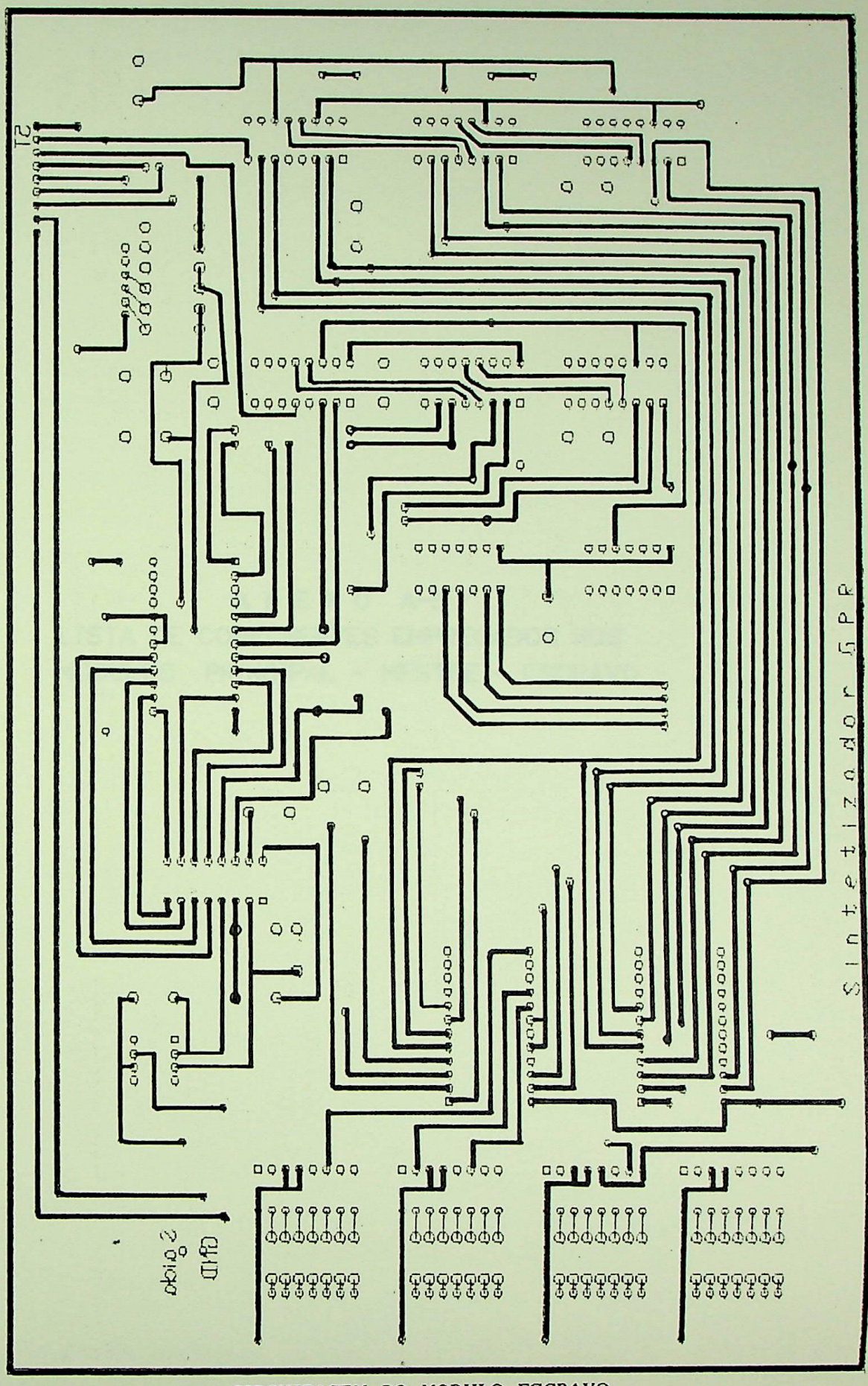
# A N E X O  A-4

## CIRCUITAGEM E VISTA SUPERIOR DO MÓDULO ESCRAVO

VISTA SUPERIOR DO MODULO ESCRAVO




CIRCUITAGEM DO MODULO ESCRAVO
LADO DO COMPONENTE




CIRCUITAGEM DO MODULO ESCRAVO
LADO DO COBRE

# A N E X O  A-5

## LISTA DE COMPONENTES EMPREGADOS NOS MÓDULOS PRINCIPAL - MESTRE - ESCRAVO

ANEXO A-5 LISTA DE COMPONENTES EMPREGADOS NOS MÓDULOS PRINCIPAL - MESTRE - ESCRAVO

## Modulo Principal

R1.....4K7
C1, C2.....1 nF
C3, C4.....2200 µF
C5, C6.....470 µF
C7, C8.....100 µF
C9, C10.....10 µF
CI-1, CI-2.....74193
CI-3.....LM 555
CI-4-A, CI-4-B, CI-4-C.....7409
CI-5.....REGULADOR DE TENSÃO 7812
CI-6.....REGULADOR DE TENSÃO 7912
CI-7.....REGULADOR DE TENSÃO 7805
D1,D2,D3,D4.....1N5403
D5, D6, D7, D8.....1N4002
POT1.....POTENCIÔMETRO DE 10 KΩ
Q1.....TRANSISTOR NPN 2N3055
SW-1/2.....CHAVE DE 1 PÓLO 2 POSIÇÕES
SW-1/4.....CHAVE DE 1 PÓLO 4 POSIÇÕES
T-1 .....TRANSFORMADOR 110/15+15 V 700 µA
T-2.....TRANSFORMADOR 110/6V 5 A

## Modulo Mestre

R1, R2, R3, R4,.....1K
R6, R7.....10K
R5, R8, R9.....4K7
C1, C2, C4.....0,1 µF
C3.....0,01 µF
CI-1, CI-2, CI-3.....74193

CI-4-A, CI-4-B.....7400
CI-5-A, CI-5-B
CI-5-C, CI-5-D.....7404
CI-6.....7420
CI-7......"EPROM".2732-A
CI-8.....DAC-0800
CI-9.....LM 741
D1,D2,D3,D4.....1N4002
POT1.....POTENCIÔMETRO DE PRECISÃO DE 10 KΩ
SW-1/2.....CHAVE DE 1 PÓLO 2 POSIÇÕES
SW-1/4.....CHAVE DE 1 PÓLO 4 POSIÇÕES

## Modulo Escravo

R1, R2, R3, R4, R5.....1K
R6, R7.....10K
R8, R9, R10.....4K7
R12 a R39 .....560 Ω
C1, C2, C4.....0,1 μF
C3..... 0,01 μF
CI-1, CI-2, CI-3,
CI-4, CI-5, CI-6.....74193
CI-7.....LM 741
CI-8-A, CI-8-B.....7421
CI-9 ....."EPROM" 2716
CI-10....."EPROM" 2716
CI-11....."EPROM" 2732-A
CI-12.....DAC-0800
CI-13, CI-14,
CI-15, CI-16.....7446 A
D1,D2,D3,D4.....1N4002
POT1.....POTENCIÔMETRO DE PRECISÃO DE 10 KΩ
SW-1/2.....CHAVE DE 1 PÓLO 2 POSIÇÕES
SW-1/4.....CHAVE DE 1 PÓLO 4 POSIÇÕES
"DIPLAY's"..... 4 x FND 500

# A N E X O  A-6

## LISTAGEM DO PROGRAMA GERADOR DE FUNÇÕES

```
program Plota3;

{$I TypeDef.pas}
{$I Graphix.pas}
{$I Kernel.pas }
{$I Windows.pas}

Const Tabsin : Array[0..180] Of Real =
(0.00000,0.00873,0.01745,0.02618,0.03490,0.04362,
 0.05234,0.06105,0.06976,0.07846,0.08716,0.09585,
 0.10453,0.11320,0.12187,0.13053,0.13917,0.14781,
 0.15643,0.16505,0.17365,0.18224,0.19081,0.19937,
 0.20791,0.21644,0.22495,0.23345,0.24192,0.25038,
 0.25882,0.26724,0.27564,0.28402,0.29237,0.30071,
 0.30902,0.31730,0.32557,0.33381,0.34202,0.35021,
 0.35837,0.36650,0.37461,0.38268,0.39073,0.39875,
 0.40674,0.41469,0.42262,0.43051,0.43837,0.44620,
 0.45399,0.46175,0.46947,0.47716,0.48481,0.49242,
 0.50000,0.50754,0.51504,0.52250,0.52992,0.53730,
 0.54464,0.55194,0.55919,0.56641,0.57358,0.58070,
 0.58779,0.59482,0.60182,0.60876,0.61566,0.62251,
 0.62932,0.63608,0.64279,0.64945,0.65606,0.66262,
 0.66913,0.67559,0.68200,0.68835,0.69466,0.70091,
 0.70711,0.71325,0.71934,0.72537,0.73135,0.73728,
 0.74314,0.74896,0.75471,0.76041,0.76604,0.77162,
 0.77715,0.78261,0.78801,0.79335,0.79864,0.80386,
 0.80902,0.81412,0.81915,0.82413,0.82904,0.83389,
 0.83867,0.84339,0.84805,0.85264,0.85717,0.86163,
 0.86603,0.87036,0.87462,0.87882,0.88295,0.88701,
 0.89101,0.89493,0.89879,0.90259,0.90631,0.90996,
 0.91355,0.91706,0.92050,0.92388,0.92718,0.93042,
 0.93358,0.93667,0.93969,0.94264,0.94552,0.94832,
 0.95106,0.95372,0.95630,0.95882,0.96126,0.96363,
 0.96593,0.96815,0.97030,0.97237,0.97437,0.97630,
 0.97815,0.97992,0.98163,0.98325,0.98481,0.98629,
 0.98769,0.98902,0.99027,0.99144,0.99255,0.99357,
 0.99452,0.99540,0.99619,0.99692,0.99756,0.99813,
 0.99863,0.99905,0.99939,0.99966,0.99985,0.99996,
 1.00000);

type vetor      = array[0..200] of real;
     arquivo    = string[14];
     termos     = array[0..050] of real;
     Pont       = ^Registro;
     Registro   = Array[1..4100] Of Char;
     ponti      = ^Registro1;
     Registro1  = Array[1..4100] of real;


var harm           : integer;   { numero de harmonicas escolhido }
    a,b            : termos;    { guarda os termos de fourier    }
    T,ampl         : real;      { periodo e amplitude dos eixos  }
    condicao       : boolean;   { variavel de controle           }
    opcao,opp      : char;      { auxiliar para perguntas        }
    ativa          : boolean;   { condicao da demarcacao         }
    nome           : arquivo;   { arquivo de entrada/saida       }
    ym,yn          : real;
```

```
var escolha        : boolean;     { escolha do tipo de entrada }
    tecla,cont,
    tec            : char;        { auxiliar para continuar    }
    continua       : boolean;     { auxiliar para continuar    }

Var Amax,y,
    Alf,Alfr       : Array[1..99] Of Real;
    arq            : text;
    Yg,Tempo       : Ponti;
    MSB,LSB        : Pont;
    Nh,J,Npont,
    N,I,P,Lin,
    A1,A2,A3,
    Y2,Y3          : Integer;
    C,Cn,f,
    W,Dx,Seno      : Real;
    Dt,Yt,Ymin, Ymin1, Ymax1,
    Ang,Ymax,
    P_amost ,r     : Real;
    Key            : Char;
    FuncKey,
    Ctrl           : Boolean;
    Traco          : string[33];
    Xmin, Xmax     : Integer;

Var Ar             : Array[1..2000] of Real;
    Ai             : array[1..2000] of Real;
    M              : Integer;

Var Grau,Tens,
    Tensao,Frac    : Real;
    Inteiro        : integer;

Var
    Vem,Vef,Pat,Pap : Real;

procedure salva;

  Begin
    clrscr;
    gotoxy(50,11); write('Nome do arquivo:');
    read(nome); nome:=nome+'.gfr';
    assign(arq,nome);
    rewrite(arq);
    writeln(arq);          { guarda valores da funcao }
    for n:=1 to 720 do
    write(arq,yg^[n]);     { no arquivo               }
    close(arq);
  end;
```

```
procedure salvaepr;

    Begin
      clrscr;
      gotoxy(50,11);  write('Nome do arquivo:');
      read(nome); nome:=Nome+' .epr';
      assign(arq,nome);
      rewrite(arq);
      for n:=1 to Npont do write(arq,MSB^[n]);  { no arquivo }
      close(arq);
    end;

Procedure learq;

    Begin
      clrscr;
      gotoxy(10,16);
      write('- Nome do arquivo:');
      read(nome); nome:=nome+'.gfr';
      clrscr;
      assign(arq,nome); reset(arq);
      readln(arq);
      for n:=1 to 720 do
      begin
        read(arq,r); yg^[n]:=r;     { le os pontos da funcao }
      end;
      close(arq);
  end;

{$I KeyBoard.Pas }
{$I Grafico.Pas  }
{$I Printer.Pas  }


Procedure FFT;
begin
end;

Begin
  Repeat
    repeat
      clrscr;
      write(''':16,'ANALISE FOURIER PARA ONDAS - METODO GRAFICO');
      for i:=1 to 6 do writeln;
      writeln(''':10,'Parametros do Sistema:'); writeln;
      writeln(''':10,'- Tipo de entrada      :');
      writeln;
      writeln(''':20,'[1] Sintetizacao de Harmonicos');
      writeln(''':20,'[2] Composicao de Sinais');
      writeln(''':20,'[3] Leitura de Arquivo  ');
      writeln(''':20,'[4] Decomposicao em S. Fourier');
      writeln(''':20,'[5] Gravacao de EPROM');
      writeln(''':20,'[6] Calculo de Parametros');
      writeln(''':20,'[7] Fim');
      gotoxy(40,09); read(kbd,tecla); write(tecla);
      gotoxy(10,24); write('Para alterar tecle '); lowvideo;
```

```
   write('ESC'); normvideo;
   gotoxy(10,25); write('Outra tecla para continuar...');
   read(kbd,cont); if cont<>#27 then continua:=true
                                else continua:=false;

until continua;
case tecla of

'1':
Begin
  New(yg);
  New(tempo);
  New(MSB);
  New(LSB);
  Traco:=('================================');
  For i:= 1 To 1000 Do Begin Tempo^[I]:=0; Yg^[I]:=0; End;
  ClrScr;
  Gotoxy(8,5);
  write (traco + traco)
  Gotoxy(18,6); Write('** SINTETIZACAO DE HARMONICOS **');
  Gotoxy(8,7);
  write (traco + traco)
  Gotoxy(8,16);
  write (traco + traco)
  Lin:=10;
  Repeat
    f:=60;
    For I:= 1 To 4 Do
    Begin
      Gotoxy(45,Lin); Write(' ':10);
      Lin:=(Lin+1);
    End;
    Repeat
      Gotoxy(20,10);
      Write('No do Ultimo Harmonico .. ');
      Readln(nh);
    Until (nh<>0);
    Repeat
      Gotoxy(20,11);
      Write('No de Ciclos ..... ');
      Readln(Cn);
    Until (cn<>0);
    Gotoxy(20,12);
    Write('Frequencia ..... ');
    Writeln(f:2:0);
    Repeat
      Gotoxy(20,13);
      Write('Numero de Pontos ..... ');
      Readln(Npont);
    Until (Npont<>0);
    Gotoxy(8,16);
    Gotoxy(40,24); Write('CONFIRMA [ S : N ] ? OPCAO _  ');
    Read(KBD,Opcao);
    W:=(2*Pi*Cn);
    Lin:=10;

 Until Opcao in['S','s'];
```

```
ClrScr;
Gotoxy(20,8); Writeln('================================');
Gotoxy(20,9); Writeln('¦¦ HARM ¦  Amplitude ¦  Fase  ¦¦');
Gotoxy(20,11); Writeln('================================');
Lin:=10;
For J:=1 To Nh Do
Begin
  Gotoxy(20,Lin); Write('¦¦   ',J,'    ¦');
  GOTOXY(50,Lin); Write('¦¦');
  Gotoxy(32,Lin); Write('':16);
  Gotoxy(41,Lin); Write('¦');
  Gotoxy(32,Lin);  Read(Amax[J]);
  Gotoxy(44,Lin);  Read(Alf[J]);
End;
Repeat
  Clrscr;
  If Nh>1 Then
            P:=(Nh div 2)
          Else
            P:=1;
  Gotoxy(2,3); Write('HARM    AMPLITUDE   FASE  ');
  Lin:=4;
  For j:=1 To P Do
  Begin
    Gotoxy(3,Lin);
    Write(J:2,'     ',Amax[j]:5:2,'       ',Alf[j]:5:2);
    Lin:=(Lin+1);
  End;
  Gotoxy(46,3); Write('HARM    AMPLITUDE   FASE  ');
  Lin:=4;
  For j:=(P+1) To nh Do
  Begin
    Gotoxy(47,Lin);
    Write(J:2,'     ',Amax[J]:5:2,'       ',Alf[J]:5:2);
    Lin:=Lin+1;
  End;
  Opcao:= (' ');
  Gotoxy(40,24); Write('CONFIRMA [ S : N ] ? OPCAO _  ');
  Read(Kbd,Opcao);
  If Opcao in['S','s'] Then Ctrl:= False
                       Else Ctrl:= True;

  While Ctrl Do
  Begin
    Gotoxy(40,24);
    Write('':76);
    Gotoxy(20,25);
    Write(' DIGITE O HARMONICO A SER CORRIGIDO');
    J:=0;
    Gotoxy(67,25);
    Read(J);
    If J=0 Then Ctrl:=False
           Else
```

```
                Begin
                  Gotoxy(20,19);
                  Write(Traco);
                  Gotoxy(20,20);



                  Write('¦¦ HARM ¦  Amplitude ¦  Fase  ¦¦');
                  Gotoxy(20,22);
                  Write(Traco);
                  Lin:=21;
                  Gotoxy(20,Lin); Write('¦¦  ',J,'   ¦');
                  Gotoxy(50,Lin); Write('¦¦');
                  Gotoxy(32,Lin); Write(' ':16);
                  Gotoxy(41,LIN); Write('¦');
                  Gotoxy(32,LIN);  Read(amax[j]);
                  Gotoxy(44,LIN);  Read(alf[j]);
                End;
  End;
Until Opcao in['S','s'];

INITGRAPHIC;
clearscreen;
Gotoxy(40,24); Write(' AGUARDE PROCESSAMENTO ........');

{ ** Inverse Fourier Transform ** }

C:=F/Cn;
Dx:=(1/(Npont));
For N:=1 To Npont Do

Begin
  Dt := (N-1) * Dx;
  Yt := 0;
  For I:= 1 To Nh Do

  begin
    Alfr[I]:=(Alf[I]*Pi/180);
    Y[I]:=(Amax[I]*Sin((I*W*Dt)+Alfr[I]));
    Yt:=Yt+Y[I];
  end;


  Yg^[N]:=Yt;
  Tempo^[N]:=Dt*(1/C);

  { *** Fim da Transformada Inversa ***  }

end;

Gotoxy(40,24); Write('Grafico Pronto ... - TECLE ENTER - ');
Readln;

Ymin := Yg^[1];
Ymax := Yg^[1];
```

```
  For  i := 1 to NPont  do
     Begin
       If  Ymin > Yg^[i]  Then    Ymin := Yg^[i];
       If  Ymax < Yg^[i]  Then    Ymax := Yg^[i];
     end;

  Repeat
     ClearScreen;   GotoXY (1,1);
     Writeln ( 'Entre com os valores de: ' );
     Write ( 'Xmin = ' );    Readln ( Xmin );
     Write ( 'Xmax = ' );    Readln ( Xmax );

     Ymin1 := Yg^[Xmin];
     Ymax1 := Yg^[Xmin];
     For  i := Xmin to Xmax  do
            Begin
            If  Ymin1 > Yg^[i]  Then    Ymin1 := Yg^[i];
            If  Ymax1 < Yg^[i]  Then    Ymax1 := Yg^[i];
            end;

     ClearScreen;
     Etiqueta_Eixo ( 255*(Ymin1-Ymin)/(ymax-ymin),
                     255*(Ymax1-Ymin)/(ymax-ymin), 'Y' );
     Etiqueta_Eixo ( Tempo^[Xmin], Tempo^[Xmax], 'X' );
     Eixo_Coordenado ( Tempo^[Xmin], Tempo^[Xmax],
                       255*(Ymin1-Ymin)/(ymax-ymin),
                       255*(Ymax1-Ymin)/(ymax-ymin) );
     For I:=Xmin To Xmax-1 do
         begin
         Drawline ( Tempo^[i],255*(Yg^[i]-Ymin)/(ymax-ymin)
               ,Tempo^[i+1],255*(Yg^[i+1]-Ymin)/(ymax-ymin));
         end;

     Repeat
       GotoXY ( 1,25);   Write ( 'imprimir ?  (S / N) : ');
       KeyBoard ( Key, FuncKey );
       If  UpCase( Key ) = 'S'  then   Printer;
     Until UpCase( Key ) = 'N';

     Repeat
       Gotoxy (1,25); Write ( 'nova faixa? (S/N)', ' ':60 );
       KeyBoard ( Key, FuncKey );
     Until UpCase( Key ) in [ 'N', 'S' ];
  Until UpCase( Key ) = 'N';

  Leavegraphic;
  Gotoxy(31,24);  WRITE('SALVAR O SINAL [S:N] ? OPCAO _ ');
  Read(Kbd,Opcao);
  IF OPCAO IN['S','s'] THEN
    Salva;
  Gotoxy(31,24);
   Write('        ... Outro Caso [ S : N ] ? Opcao _ ');
  Read(Kbd,Opp);
  Dispose(yg);
  Dispose(tempo);
  Dispose(MSB);
  Dispose(LSB);

End;
```

```
'2':
Begin

  New(yg);
  New(tempo);
  New(MSB);
  New(LSB);
  f:=60;
  Traco:=('================================');
  For i:= 1 To 1000 Do Begin Tempo^[I]:=0; Yg^[I]:=0; End;
  ClrScr;
  Gotoxy(8,5);
  Write(TRACO + TRACO);
  Gotoxy(18,6); Write('** SINTETIZACAO DE HARMONICOS **');
  Gotoxy(8,7);
  Write(TRACO + TRACO);
  Gotoxy(8,16);
  Write(TRACO + TRACO);

  Lin:=10;

  Repeat
    For I:= 1 To 4 Do
    Begin
      Gotoxy(45,Lin); Write(' ':10);
      Lin:=(Lin+1);
    End;

    Repeat
      Gotoxy(20,11);
      Write('No de Ciclos ..... ');
      Readln(Cn);
    Until (cn<>0);

    Gotoxy(20,12);
    Write('Frequencia ..... ');
    Writeln(f:2:0);

    Repeat
      Gotoxy(20,13);
      Write('Numero de Pontos ..... ');
      Readln(Npont);
    Until (Npont<>0);

    Gotoxy(8,16);
    Gotoxy(40,24); Write('CONFIRMA [ S : N ] ? OPCAO _  ');
    Read(KBD,Opcao);
    W:=(2*Pi*Cn);
    Lin:=10;
  Until Opcao in['S','s'];

  ClrScr;
  Gotoxy(20,8); Writeln('================================');
  Gotoxy(20,9); Writeln('|| Pont |  Valor Instantaneo  ||');
  Gotoxy(20,11); Writeln('================================');
  Lin:=10;
  For J:=1 To Npont do
```

```
Begin
  Gotoxy(20,Lin); Write('¦¦   ',J,'    ¦¦');
  GOTOXY(50,Lin); Write('¦¦');
  Gotoxy(32,Lin); Write(' ':16);
  Gotoxy(32,Lin); Read(Yg^[J]);
End;

Repeat
  Clrscr;
  If Npont>1 Then
               P:=(Npont div 2)
             Else
               P:=1;

  Gotoxy(2,3); Write('Pont    Valor Instantaneo  ');
  Lin:=4;
  For j:=1 To P Do
  Begin
    Gotoxy(3,Lin);
    Write(J:2,'     ',Yg^[j]:5:2);
    Lin:=(Lin+1);
  End;

  Gotoxy(46,3); Write('Pont    Valor Instantaneo  ');
  Lin:=4;
  For j:=(P+1) To npont Do
  Begin
    Gotoxy(47,Lin);
    Write(J:2,'     ',yg^[J]:5:2);
    Lin:=Lin+1;
  End;

  Opcao:= (' ');
  Gotoxy(40,24); Write('CONFIRMA [ S : N ] ? OPCAO _  ');
  Read(Kbd,Opcao);
  If Opcao in['S','s'] Then Ctrl := False
                       Else Ctrl := True;
  While Ctrl Do

  Begin
    Gotoxy(40,24);
    Write(' ':76);
    Gotoxy(20,25);
    Write(' DIGITE O Valor instant. A SER CORRIGIDO');
    J:=0;
    Gotoxy(67,25);
    Read(J);
    If J=0 Then   Ctrl:=False
           Else   Begin
                  Gotoxy(20,19);
                  Write(Traco);
                  Gotoxy(20,20);
                  Write('¦¦ Pont ¦  Valor Instantaneo  ¦¦');
                  Gotoxy(20,22);
```

```
                    Write(Traco);
                    Lin:=21;
                    Gotoxy(20,Lin); Write('¦¦  ',J,'   ¦¦');
                    Gotoxy(50,Lin); Write('¦¦');
                    Gotoxy(32,Lin); Write(''':16);
                    Gotoxy(32,LIN);  Read(Yg^[j]);
                    End;
  End;
Until Opcao In['S','s'];



INITGRAPHIC;
clearscreen;
Gotoxy(40,24); Write(' AGUARDE PROCESSAMENTO ........');


C:=F/Cn;
Dx:=(1/(Npont));


For N:=1 To Npont Do

Begin
  Dt := (N-1) * Dx;
  Yt := 0;
  For I:= 1 To Nh Do

  begin
    Alfr[I]:=(Alf[I]*Pi/180);
    Y[I]:=(Amax[I]*Sin((I*W*Dt)+Alfr[I]));
    Yt:=Yt+Y[I];
  end;

  Tempo^[N]:=Dt*(1/C);


end;

Gotoxy(40,24);
  Write( 'Grafico Pronto ... - TECLE ENTER - ' );
Readln;
Ymin := Yg^[1];
Ymax := Yg^[1];
For  i := 1 to NPont  do
   Begin
     If  Ymin > Yg^[i]  Then   Ymin := Yg^[i];
     If  Ymax < Yg^[i]  Then   Ymax := Yg^[i];
   end;

Repeat
   ClearScreen;   GotoXY (1,1);
   Writeln ( 'Entre com os valores de: ' );
   Write ( 'Xmin = ' );   Readln ( Xmin );
   Write ( 'Xmax = ' );   Readln ( Xmax );
```

```
      Ymin1 := Yg^[Xmin];
      Ymax1 := Yg^[Xmin];
      For  i := Xmin to Xmax  do
             Begin
             If  Ymin1 > Yg^[i]  Then   Ymin1 := Yg^[i];
             If  Ymax1 < Yg^[i]  Then   Ymax1 := Yg^[i];
             end;

      ClearScreen;
      Etiqueta_Eixo ( 255*(Ymin1-Ymin)/(ymax-ymin),
                      255*(Ymax1-Ymin)/(ymax-ymin), 'Y' );
      Etiqueta_Eixo ( Tempo^[Xmin], Tempo^[Xmax], 'X' );
      Eixo_Coordenado ( Tempo^[Xmin], Tempo^[Xmax],
                        255*(Ymin1-Ymin)/(ymax-ymin),
                        255*(Ymax1-Ymin)/(ymax-ymin) );


      For I:=Xmin To Xmax-1 do
          begin
          Drawline ( Tempo^[i],255*(Yg^[i]-Ymin)/(ymax-ymin)
                ,Tempo^[i+1],255*(Yg^[i+1]-Ymin)/(ymax-ymin));
          end;

      Repeat
        GotoXY ( 1,25);   Write ( 'imprimir ? (S / N) : ' );
        KeyBoard ( Key, FuncKey );
        If  UpCase( Key ) = 'S'  then   Printer;
      Until UpCase( Key ) = 'N';

      Repeat
        Gotoxy ( 1,25 );
           Write ( 'nova faixa?  ( S/N )', ' ':60 );
        KeyBoard ( Key, FuncKey );
      Until UpCase( Key ) in [ 'N', 'S' ];
    Until UpCase( Key ) = 'N';

    Leavegraphic;


    Gotoxy(31,24);  WRITE('SALVAR O SINAL [S : N]? OPCAO _ ');
    Read(Kbd,Opcao);
    IF OPCAO IN['S','s'] THEN

      Salva;

    Gotoxy(31,24);
     Write('           .... Outro Caso [ S : N ] ? Opcao _ ');
    Read(Kbd,Opp);

    Dispose(yg);
    Dispose(tempo);
    Dispose(MSB);
    Dispose(LSB);
  End;
```

```
'3':
Begin

  New(yg);
  New(tempo);
  New(MSB);
  New(LSB);

  For i:= 1 To 1000 Do Begin Tempo^[I]:=0; Yg^[I]:=0; End;
  ClrScr;
  Gotoxy(8,5);
  Write(TRACO + TRACO);
  Gotoxy(18,6); Write('**  Leitura   de   Arquivo   **');
  Gotoxy(8,7);
  Write(TRACO + TRACO);
  Gotoxy(8,16);
  Write(TRACO + TRACO);
  Lin:=10;
  Repeat

    f:=60;
    For I:= 1 To 4 Do

    Begin
      Gotoxy(45,Lin); Write(''':10);
      Lin:=(Lin+1);
    End;

    Repeat
      Gotoxy(20,11);
      Write('No de Ciclos ..... ');
      Readln(Cn);
    Until (cn<>0);

    Gotoxy(20,12);
    Write('Frequencia ..... ');
    Writeln(f:2:0);

    Repeat
      Gotoxy(20,13);
      Write('Numero de Pontos ..... ');
      Readln(Npont);
    Until (Npont<>0);

    Gotoxy(8,16);
    Gotoxy(40,24); Write('CONFIRMA [ S : N ] ? OPCAO _  ');
    Read(KBD,Opcao);
    Lin:=10;

  Until Opcao in['S','s'];

  ClrScr;


  Learq;
```

```
INITGRAPHIC;
clearscreen;
Gotoxy(40,24); Write(' AGUARDE PROCESSAMENTO ........');


C:=F/Cn;
Dx:=(1/(Npont));
For N:=1 To Npont Do

Begin
  Dt := (N-1) * Dx;
  Yt := 0;

  Tempo^[N]:=Dt*(1/C);


end;

Gotoxy(40,24);
 Write( 'Grafico Pronto ... - TECLE ENTER - ' );
Readln;

Ymin := Yg^[1];
Ymax := Yg^[1];
For  i := 1 to NPont  do
   Begin
     If  Ymin > Yg^[i]  Then   Ymin := Yg^[i];
     If  Ymax < Yg^[i]  Then   Ymax := Yg^[i];
   end;

Repeat
   ClearScreen;   GotoXY (1,1);
   Writeln ( 'Entre com os valores de: ' );
   Write ( 'Xmin = ' );   Readln ( Xmin );
   Write ( 'Xmax = ' );   Readln ( Xmax );

   Ymin1 := Yg^[Xmin];
   Ymax1 := Yg^[Xmin];
   For  i := Xmin to Xmax  do
          Begin
          If  Ymin1 > Yg^[i]  Then   Ymin1 := Yg^[i];
          If  Ymax1 < Yg^[i]  Then   Ymax1 := Yg^[i];
          end;

   ClearScreen;
   Etiqueta_Eixo ( 255*(Ymin1-Ymin)/(ymax-ymin),
                   255*(Ymax1-Ymin)/(ymax-ymin), 'Y' );
   Etiqueta_Eixo ( Tempo^[Xmin], Tempo^[Xmax], 'X' );
   Eixo_Coordenado ( Tempo^[Xmin], Tempo^[Xmax],
                     255*(Ymin1-Ymin)/(ymax-ymin),
                     255*(Ymax1-Ymin)/(ymax-ymin) );
```

```
      For I:=Xmin To Xmax-1 do
          begin
          Drawline ( Tempo^[i],255*(Yg^[i]-Ymin)/(ymax-ymin)
                 ,Tempo^[i+1],255*(Yg^[i+1]-Ymin)/(ymax-ymin));
          end;

      Repeat
        GotoXY ( 1,25);   Write ( 'imprimir ? (S/N) : ' );
        KeyBoard ( Key, FuncKey );
        If  UpCase( Key ) = 'S'  then   Printer;
      Until UpCase( Key ) = 'N';

      Repeat
        Gotoxy ( 1,25 );
           Write ( 'nova faixa? (S/N)', ' ':60 );
        KeyBoard ( Key, FuncKey );
      Until UpCase( Key ) in [ 'N', 'S' ];
    Until UpCase( Key ) = 'N';

    Leavegraphic;

    Gotoxy(40,24);
     Write(' .... Outro Caso [ S : N ] ? Opcao _ ');
    Read(Kbd,Opp);
  end;

  '4':

  Begin

    learq;

    For n:=1 to 128 do
    begin
      Ar[n] := Yg^[n*2-1];
      Ai[n] := Yg^[n*2];
    end;

    {          writeln(yg^[n]);   }

    fft;

    Gotoxy(40,24);
     Write(' .... Outro Caso [ S : N ] ? Opcao _ ');
    Read(Kbd,Opp);

  end;


  '5':
Begin

   New(msb);
   New(yg);
```

```
    clrscr;
    gotoxy(10,16);
    write('- Nome do arquivo:');
    read(nome); Nome:=Nome+'.gfr';
    assign(arq,nome); reset(arq);
    readln(arq);
    gotoxy(10,18);
    write('- Numero de pontos : ');
    read(npont);
    clrscr;
    for n:=1 to Npont do
    begin
      read(arq,r); yg^[n]:=r;     { le os pontos da funcao }
    end;
    close(arq);

     Ymin := Yg^[1];
     Ymax := Yg^[1];
     For  i := 1 to Npont do

     Begin
       If  Ymin > Yg^[i]  Then    Ymin := Yg^[i];
       If  Ymax < Yg^[i]  Then    Ymax := Yg^[i];
      end;
      for i := 1 to npont do
      begin
       Msb^[i] :=
        chr(Trunc(((Yg^[i] - Ymin)/(Ymax - Ymin))*255) );

       writeln(Msb^[i], '      ', ord(MSB^[i]) );
    end;

   salvaepr;
   Dispose( msb);
   Dispose( yg);

end;

  '6':

  begin

    repeat

      repeat
        clrscr;
        write
        (''':16,'Calculo de Parametros Inerentes a dois Sinais');
        for i:=1 to 6 do writeln;
        writeln(''':10,'Parametros do Sistema:'); writeln;
        writeln(''':10,'-    Selecao          :');
        writeln;
        writeln(''':20,'[1] Valor Medio');
        writeln(''':20,'[2] Valor Eficaz');
        writeln(''':20,'[3] Fat. de Pot. , Pot. " S - P - Q "');
        writeln(''':20,'[4] Fim');
```

```
  gotoxy(40,09); read(kbd,tec); write(tec);
  gotoxy(10,24); write('Para alterar tecle '); lowvideo;
  write('ESC'); normvideo;
  gotoxy(10,25); write('Outra tecla para continuar...');
  read(kbd,cont); if cont<>#27 then continua:=true
                               else continua:=false;

until continua;

Case tec of

'1':
Begin

  learq;
  Vem := 0;
  For n:=1 to 360 do  vem := Yg^[n] + Vem;
  Vem := Vem / 360;
  write(Vem);
  Gotoxy(40,24);
   Write(' .... Outro Caso [ S : N ] ? Opcao _ ');
  Read(Kbd,Opcao);
end;

'2':
Begin

  learq;
  Vef := 0;
  For n:=1 to 720 do Vef := Vef + (Yg^[n]*Yg^[n]);
  Vef := Sqrt(Vef/360);
  write(Vef);
  Gotoxy(40,24);
   Write(' .... Outro Caso [ S : N ] ? Opcao _ ');
  Read(Kbd,Opcao);
end;

'3':
Begin

  gotoxy(10,16);
  write('                      1   : ');

  learq;

  gotoxy(10,16);
  write('- Nome do arquivo  2 : ');
  read(nome); nome:=nome+'.gfr';
  clrscr;
  assign(arq,nome); reset(arq);
  readln(arq);
  for n:=1 to 720 do

  begin
    read(arq,r);
    Tempo^[n]:=r;     { le os pontos da funcao }
  end;
```

```
            close(arq);
            Pat := 0;
            Pap := 0;
            For n:=1 to 360 do

            begin
              Pat := Pat + (Yg^[n] * Tempo^[n]);
              Pap := Pap + Sqr(Yg^[n]) * Sqr(Tempo^[n]);
            end;

            Pat := Pat / 360;
            Pap := Sqrt(Pap / 360);
            clrscr;
            gotoxy(20,12);
            writeln('S = ',Pap:8:3);
            gotoxy(20,13);
            writeln('P = ',Pat:8:3);
            gotoxy(20,14);
            writeln('Q = ',Sqrt((Pap*Pap)-(Pat*Pat)):8:3);
            gotoxy(20,14);
            writeln('Fp = ',(Pat / Pap):8:3);
            Gotoxy(40,24);
             Write(' .... Outro Caso [ S : N ] ? Opcao _ ');
            Read(Kbd,Opcao);

          end;
          end; { case }
        Until (Opcao in[ 'N','n' ]) or (tec = '4');

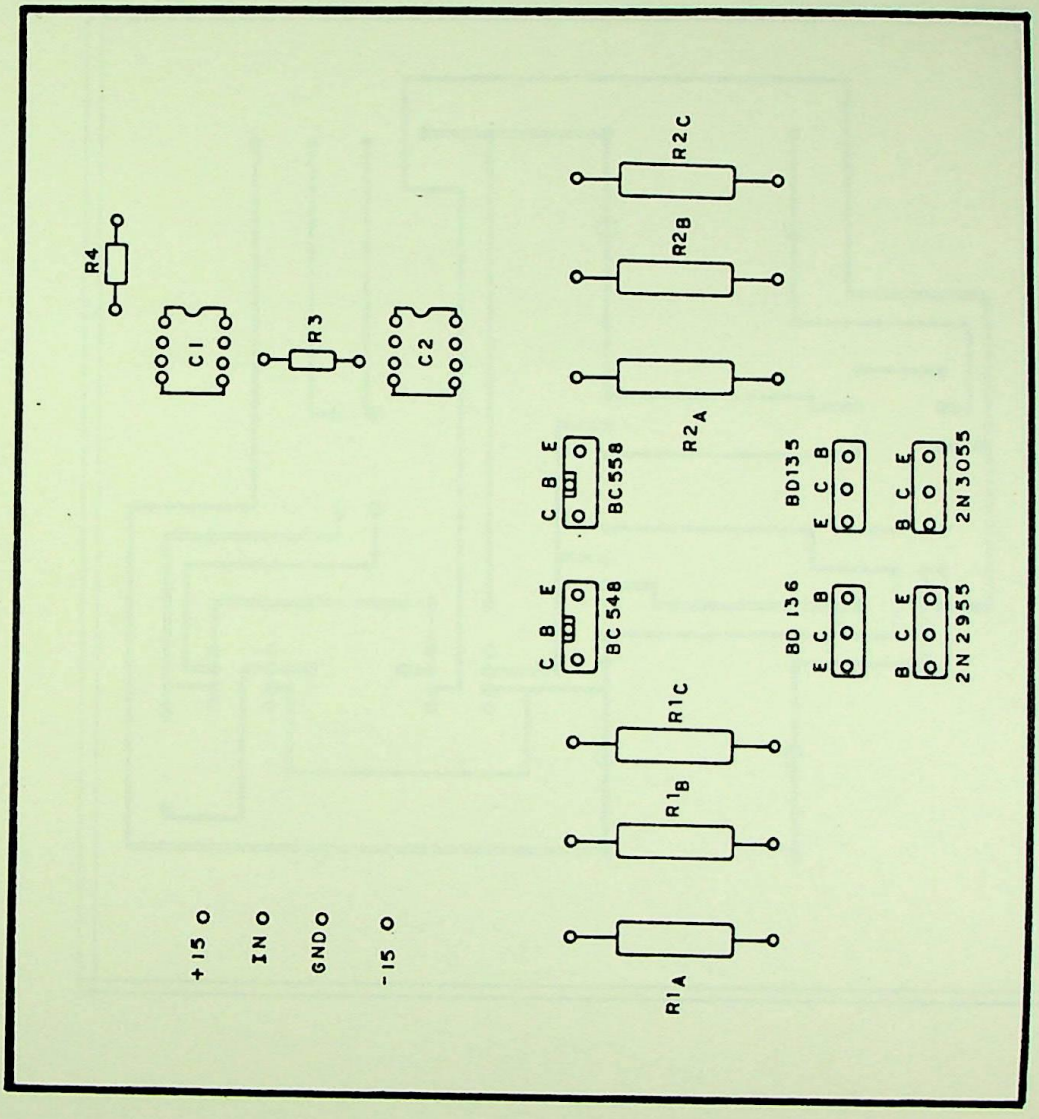
      end;

      end; { case }
    Until (Opp in['N','n']) or (tecla = '7');

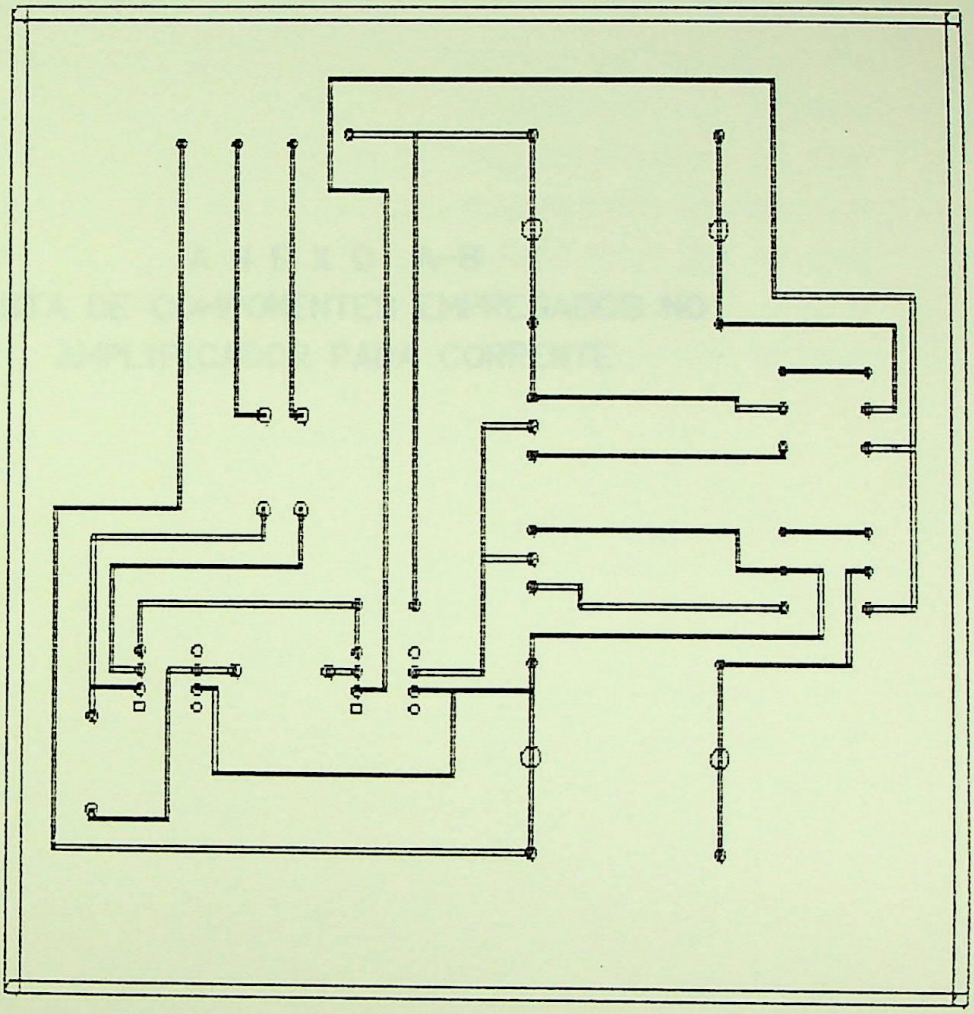
close (arq);
END.
```

# A N E X O  A-7

## CIRCUITAGEM E VISTA SUPERIOR DO AMPLIFICADOR PARA CORRENTE




VISTA SUPERIOR DO AMPLIFICADOR PARA CORRENTE



CIRCUITAGEM DO AMPLIFICADOR PARA CORRENTE

# A N E X O  A-8

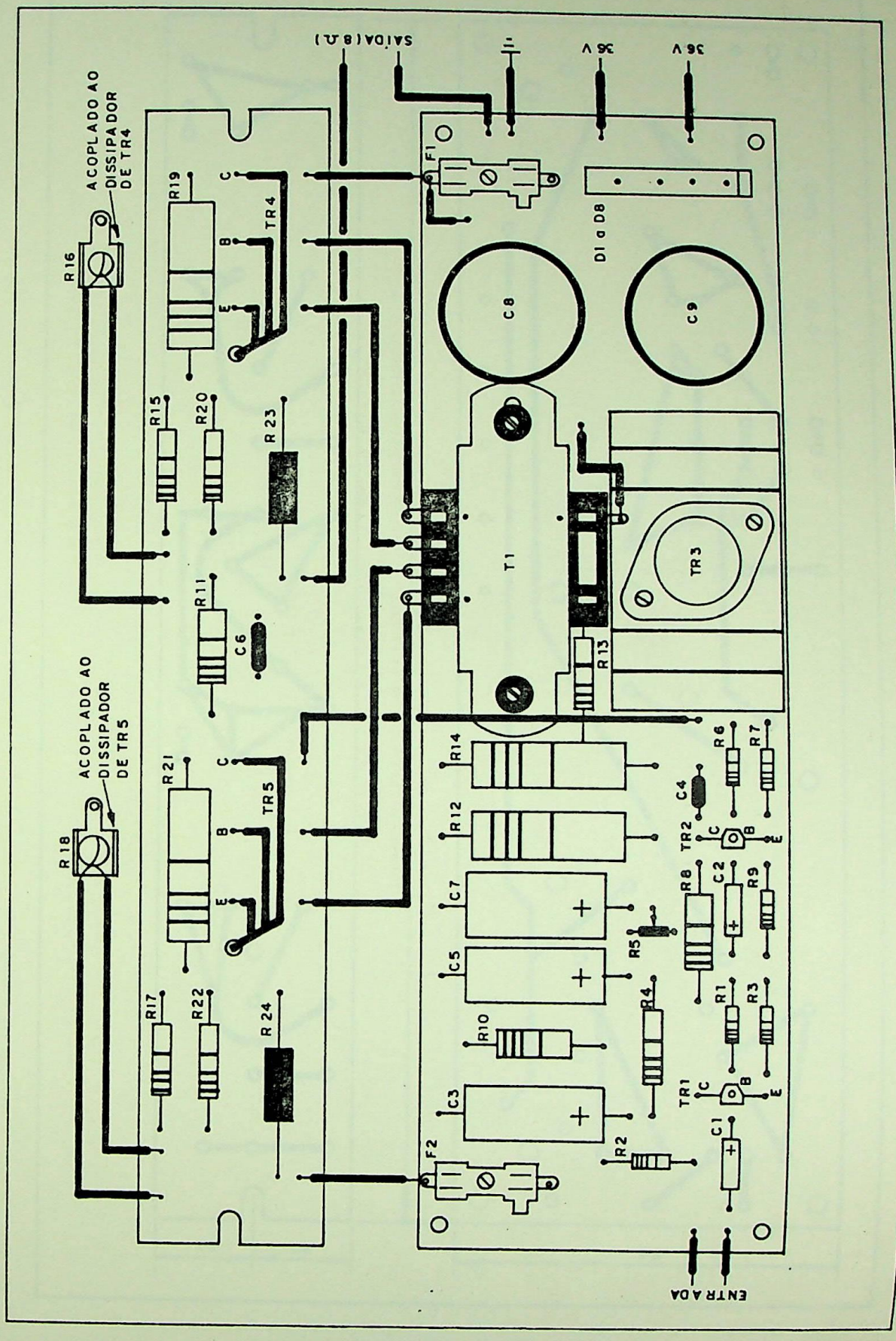
## LISTA DE COMPONENTES EMPREGADOS NO AMPLIFICADOR PARA CORRENTE

ANEXO A-8 LISTA DE COMPONENTES EMPREGADOS NO AMPLIFICADOR PARA CORRENTE

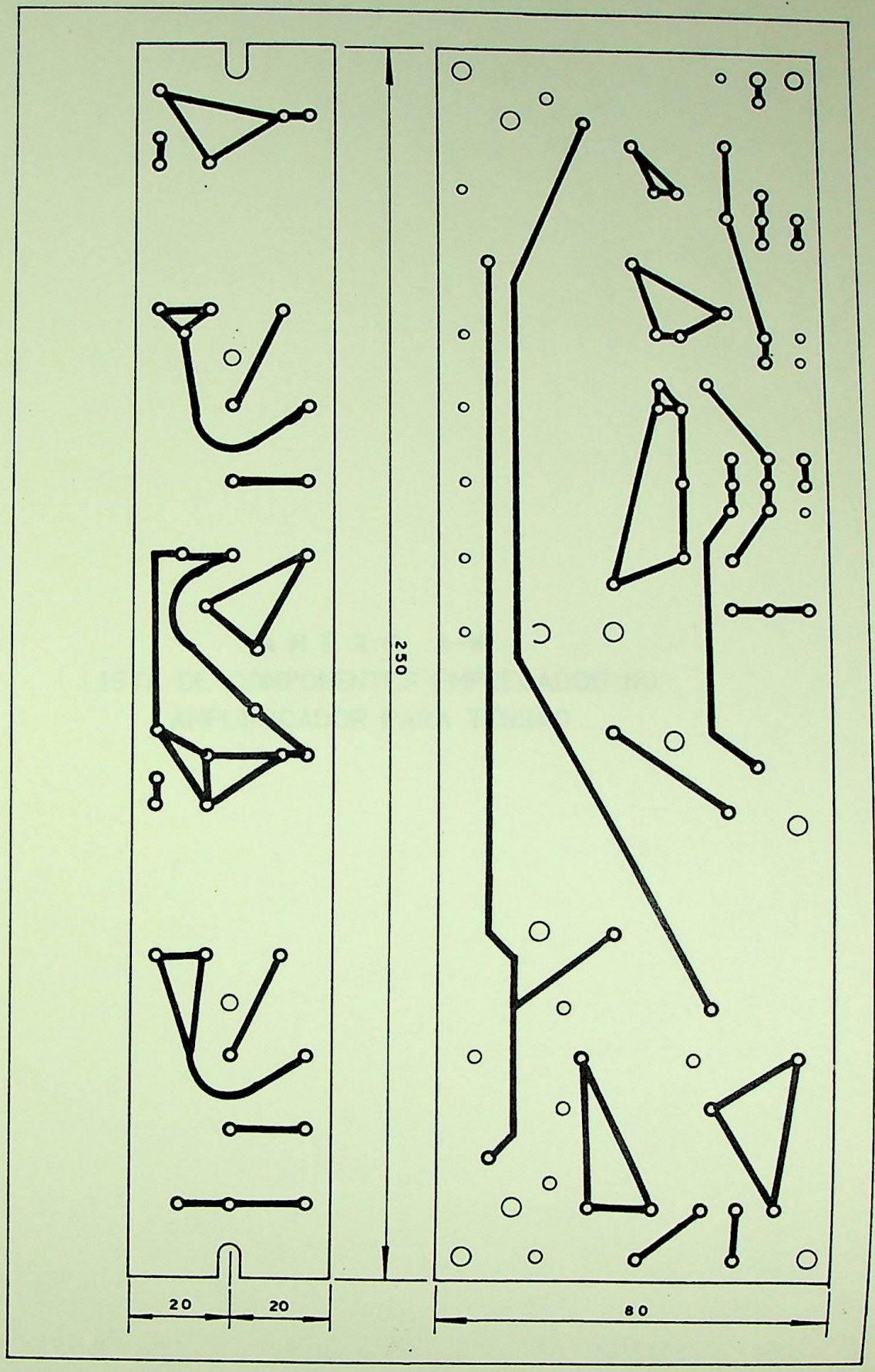
| | |
|---|---|
| R1, R2 | 1R2//1R2//1R2 , 10W |
| R3 | 15 K |
| R4 | 11 K |
| R5 | 10 K |
| CI-1, CI-2 | 741 |
| POT1 | POTENCIÔMETRO DE 10 KΩ |
| Q1 | TRANSISTOR NPN BC 558 |
| Q2 | TRANSISTOR PNP BC 548 |
| Q3 | TRANSISTOR NPN BD 135 |
| Q4 | TRANSISTOR PNP BD 136 |
| Q5 | TRANSISTOR NPN 2N3055 |
| Q6 | TRANSISTOR PNP 2N2955 |

# A N E X O  A-9

## CIRCUITAGEM E VISTA SUPERIOR DO AMPLIFICADOR PARA TENSÃO




VISTA SUPERIOR DO AMPLIFICADOR PARA TENSAO




CIRCUITAGEM DO AMPLIFICADOR PARA TENSAO

# A N E X O  A-10

## LISTA DE COMPONENTES EMPREGADOS NO AMPLIFICADOR PARA TENSÃO

ANEXO A-10 LISTA DE COMPONENTES EMPREGADOS NO AMPLIFICADOR PARA TENSÃO

R1.....470 K
R2.....1,5 K
R3.....330 Ω
R4.....1,8 Ω, 1/2 W
R5.....TRIM-POT" 470 K
R6.....10 K
R7.....220 Ω
R8.....1 K , 1 W
R9.....1,5 Ω
R10.....1,5 K , 1 W
R11.....1,2 K , 1 W
R12, R14.....100 Ω , 2,5 W
R13.....3,3 Ω , 1/2 W
R15, R17.....10 Ω , 1/2 W
R16, R18.....50 Ω TERMISTOR (NTC)
R19, R21.....1,5 K , 2,5 W
R20, R22.....27 Ω, 1/2 W
R23, R24.....0,47 Ω , 5 W
R25.....2,2 K., 5 W
R26.....POTENCIÔMETRO 100 K
R27.....3K3
R28.....100 K
POT1.....100 K
POT2.....10 K
POT3.....1 K
C1.....2,2 μF 63 V ELETROLÍTICO
C1.....10 μF 25 V ELETROLÍTICO
C3,C5.....470 μF 25 V ELETROLÍTICO
C4.....180 pF
C6.....1000 pF

C7.....1000 µF 25 V ELETROLÍTICO

C8, C9.....2500 µF 70 V ELETROLÍTICO

CI1,CI2 .....LM741

Q1, Q2.....BC109, BC549, BC149, BC239

Q3,Q4,Q5.....BD130, 2N3055

D1 a D8 .....1N4002/3/4/5/6/7 OU PONTE RETIF.

T1 .....TRANSFORMADOR "DRIVER" AUDIUM 1100D

T2.....TRANSFORMADOR PARA INSTRUMENTAÇÃO
110/36+36 - 2 A