

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DESENVOLVIMENTO DE UM INSTRUMENTO DIGITAL PARA MEDIÇÃO
DE GRANDEZAS ELÉTRICAS EM SISTEMAS TRIFÁSICOS

JOSÉ MANUEL ESTEVES VICENTE

ORIENTADOR : PROF. DR. JOÃO ROBERTO COGO
CO-ORIENTADOR : PROF. DR. JOCELIO SOUZA DE SÁ

T. 662

CLASS. 621.317.7; 621.3.049.77 (043.2)
CUTTER. V.6.32d
TOMBO. 662

[illegible]

AGRADECIMENTOS

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, de modo especial:

- A Escola Federal de Engenharia de Itajubá (FEAI) pela oportunidade de realizar este trabalho.

- A Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CNPQ) pela concessão de bolsa de estudos.

- Ao professor João José Marques Gonçalves pelas dicas e orientações durante o desenvolvimento do trabalho.

- Ao professor Luiz Cláudio Alves pelo apoio técnico e operacional durante a realização do trabalho.

- Ao professor Ronaldo dos Santos pela orientação e auxílio durante a realização do trabalho.

- Aos professores Luiz Sérgio Ferreira e João Carlos Araújo pelo auxílio na realização dos testes de validação do modelo proposto.

- Ao professor Antônio Carlos de Sá pelo apoio técnico e operacional durante o desenvolvimento do trabalho.

- Ao professor João Roberto Costa pelo apoio técnico e operacional durante o desenvolvimento do trabalho.

**A meus pais e à minha esposa,
dedico este trabalho.**

AGRADECIMENTOS

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, em especial:

- à Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI) pela oportunidade de realização deste trabalho;
- à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro na concessão da bolsa de estudos;
- ao graduando João José Marques Gonçalves, pelas "dicas" e pelos úteis comentários no desenvolvimento do programa monitor;
- ao graduando Luis Cláudio Alves Gama, pela colaboração no desenvolvimento da interface de comunicação serial;
- ao amigo Ronaldo Ivo Firmo, pela presteza e dedicação na datilografia dos manuscritos;
- aos técnicos Luis Sérgio Ferreira e João Carlos Anselmo, pela ajuda na confecção das placas de circuito impresso e da caixa do instrumento;
- ao professor Jocélio Souza de Sá, pelo acompanhamento participativo durante o desenvolvimento deste trabalho, e
- ao professor João Roberto Cogo, pelo estímulo contínuo e dedicada orientação.

José Manuel Esteves Vicente

ÍNDICE

1 - INTRODUÇÃO	01
1.1 - Objetivos do Instrumento Desenvolvido	01
1.2 - Características Básicas do Instrumento Desenvolvido	02
1.2.1 - Condicionamento dos sinais de entrada	02
1.2.2 - Conversão análogo digital (A/D)	03
1.2.3 - Circuito controlador	03
1.2.4 - Circuito de comunicação serial	04
1.2.5 - Circuito de teclado	05
1.2.6 - Circuito de impressora	05
1.2.7 - Visor alfanumérico	06
1.2.8 - Memória de calibração	06
1.2.9 - Circuito do relógio	07
1.2.10 - Circuito de seleção do instrumento	07
1.2.11 - Fontes de tensão	07
1.3 - Princípio de Funcionamento	07
1.3.1 - Cálculo de tensão, corrente, potência e fator de potência	08
1.3.2 - Cálculo do espectro harmônico	12
1.4 - Determinação da Taxa de Amostragem	14
1.5 - A Conversão Análogo-Digital	21
1.6 - O Erro de Multiplexagem	23
2 - O CIRCUITO BÁSICO ("HARDWARE") DO SISTEMA	27
2.1 - Placa 1	27
2.1.1 - Entradas de tensão	27
2.1.2 - Entradas de corrente	30
2.2 - Placa 2	34
2.2.1 - Fonte de 5[V]	34
2.2.2 - Fonte de 15[V]	34
2.2.3 - Fonte de -15[CV]	34
2.2.4 - Transformador de força	35
2.3 - Placa 3	38
2.3.1 - Unidade central de processamento (CPU)	38
2.3.2 - Geração de sincronismo ("clock")	40

2.3.3 - Circuito de rearme ("reset")	42
2.3.4 - Decodificação para a memória	42
2.3.5 - Memórias não voláteis ("EPROM")	43
2.3.6 - Memórias de acesso aleatório ("RAM")	45
2.3.7 - Decodificação para entrada e saída (I/O) ..	46
2.3.8 - Interface programável de periférico ("PPI")	48
2.4 - Placa 4	49
2.4.1 - Circuito de comunicação serial	49
2.4.1.1 - O padrão RS 232 C	53
2.4.2 - O circuito do relógio	53
2.4.3 - O circuito de seleção do instrumento	53
2.4.4 - O circuito da memória de calibração	53
2.5 - Placa 5	56
2.5.1 - O conversor análogo-digital AD7572/12	56
2.5.2 - Funcionamento do circuito	59
2.6 - Placa 6	61
2.6.1 - Funcionamento mecânico do grupo impressor .	65
2.6.2 - Funcionamento eletrônico do grupo impres sor	67
2.7 - O Visor Alfanumérico de Cristal Líquido (LCD)	68
3 - O PROGRAMA BÁSICO ("SOFTWARE") DO SISTEMA	70
3.1 - Programa Principal	70
3.2 - Opção A	72
3.3 - Opção B	74
3.4 - Opção C	74
3.5 - Opção D	74
3.6 - Opção E	76
3.7 - Subrotinas Importantes	78
3.7.1 - Subrotina de aquisição de dados	78
3.7.2 - Subrotina de leitura da porta serial	82
3.7.3 - Subrotina de escrita na porta serial	84
3.7.4 - Subrotina de leitura doe teclado	86
3.7.5 - Subrotina de escrita no visor alfanumérico	87
3.7.6 - Subrotina da impressora	87

3.7.7 - Subrotina da Transformada Rápida de Fourier (FFT)	89
3.7.8 - Subrotina de cálculo do valor eficaz (RMS) .	90
3.7.9 - Subrotina de cálculo da potência ativa	90
4 - PRECISÃO DO INSTRUMENTO	91
4.1 - Ensaio de tensão, corrente, fator de potência e potência ativa	92
4.2 - Ensaio do espectro harmônico	96
5 - MEDIÇÕES REALIZADAS	101
5.1 - Medição em ponte retificadora trifásica	101
5.2 - Medição em um transformador a vazio	104
6 - CONCLUSÕES	110
7 - BIBLIOGRAFIA	111
8 - ANEXO A ("Lay-out" das placas de circuito impresso).....	112

SIMBOLOGIA

- MIT : Motor de indução trifásico.
- "menu" : Lista de opções.
- "hardware" : Parte física do sistema.
- "software" : Programa controlador do sistema.
- U_{An} : Tensão eficaz da fase A em relação ao neutro.
- U_{Bn} : Tensão eficaz da fase B em relação ao neutro.
- U_{Cn} : Tensão eficaz da fase C em relação ao neutro.
- I_A : Corrente eficaz da fase A.
- I_B : Corrente eficaz da fase B.
- I_C : Corrente eficaz da fase C.
- $\cos\psi_A$: Fator de potência fase A.
- $\cos\psi_B$: Fator de potência fase B.
- $\cos\psi_C$: Fator de potência fase C.
- "Shunt" : Elemento resistivo usado na conversão corrente para tensão.
- "clock" : Frequência de sincronismo.
- CPU : Unidade Central de Processamento.
- "reset" : Inicialização do sistema.
- EPROM : Memória não volátil apagável por luz ultra violeta.
- RAM : Memória volátil.
- PPI : Interface de periféricos programável.
- USART : Circuito integrado de comunicação serial.
- TTL , CMOS : Padrões de famílias lógicas.
- RS-232C : Padrão de comunicação serial.
- bit : Dígitos binário.
- byte : Conjunto de oito bits.
- "bauds" : Velocidade de comunicação em bits por segundo.
- "reed-switch" : Interruptor magnético a vácuo.
- "driver" : Reforçador de corrente.
- ASCII : "American Standart Code for Information Interchange", código de comunicação.
- LCD : Visor de cristal líquido.

- "strap" : conexão de seleção.
- $U_1[i]$: Vetor de pontos do canal 1 (tensão na fase A).
- $I_1[i]$: Vetor de pontos do canal 2 (corrente na fase A).
- $U_2[i]$: Vetor de pontos do canal 3 (tensão na fase B).
- $I_2[i]$: Vetor de pontos do canal 4 (tensão na fase A).
- $U_3[i]$: Vetor de pontos do canal 5 (corrente na fase A).
- $I_3[i]$: Vetor de pontos do canal 6 (tensão na fase B).
- $u(t)$: Valor instantâneo da onda de tensão.
- $i(t)$: Valor instantâneo da onda de corrente.
- U_{RMS} : Tensão eficaz.
- I_{RMS} : Corrente eficaz.
- S : Volt-Amperes.
- FP : Fator de Potência.
- Q : Potência reativa.
- U_{An} : Tensão eficaz da fase A em relação ao neutro.
- I_A : Corrente eficaz da fase A.
- $\cos\psi_A, FP_A$: Fator de potência fase A.
- S_A : Volt-Amperes da fase A.
- P_A : potência média (ativa) da fase A.
- Q_A : Potência reativa da fase A.
- U_{Bn} : Tensão eficaz da fase B em relação ao neutro.
- I_B : Corrente eficaz da fase B.
- $\cos\psi_B, FP_B$: Fator de potência fase B.
- S_B : Volt-Amperes da fase B.
- P_B : potência média (ativa) da fase B.
- Q_B : Potência reativa da fase B.
- U_{Cn} : Tensão eficaz da fase C em relação ao neutro.
- I_C : Corrente eficaz da fase C.
- $\cos\psi_C, FP_C$: Fator de potência fase C.
- S_C : Volt-Amperes da fase C.
- P_C : potência média (ativa) da fase C.
- Q_C : Potência reativa da fase C.
- U_{mt} : Tensão média trifásica.
- I_{mt} : Corrente média trifásica.
- FP_{mt} : Fator de potência médio.
- P_t : Potência média (ativa) total.

- Q_t : Potência reativa total.
- FFT : "Fast Fourier transformer", Transformada Rápida de Fourier.
- F_a : Frequência de amostragem em [Hz].
- F_r : Frequência da rede elétrica [Hz].
- N : Número de pontos amostrados no ciclo.
- "Sample/Hold" : Amostragem e retenção.
- "Buffer" : Reforçador de corrente e casador de impedância.
- MSB : Byte menos significativo.
- V_p : Tensão de pico.
- "slot" : Conector de expansão.
- "flag" : Sinalizador de resultado de comparação.
- "fetch" : Ciclo de busca de instrução.
- "baud rate" : Taxa de comunicação.
- EIA : sigla de "Electronic Industrial Association".
- "tri-state" : Elemento que pode assumir três estados lógicos.
- "Flat Cable" : Cabo multivias flexível.
- "firmware" : Programa monitor residente.
- CP/M : Sistema operacional.
- "Default" : Modo de funcionamento inicial.
- RTP : Relação do transformador de potencial.
- RTC : Relação do transformador de corrente.
- HHARM : N° de harmônicos calculados.
- "Status" : Estado geral do instrumento.
- "loop" : Ciclo de repetição.
- "assembly" : Linguagem de programação.
- "GPIB" : Padrão de comunicação (IEEE 488).
- n_h : Ordem harmônica.
- U_{Ns} : Tensão nominal superior do transformador.
- U_{Ni} : Tensão nominal inferior do transformador.

RESUMO

O crescente aumento da instalação de consumidores de grande porte com cargas não lineares traz preocupações para o sistema elétrico de suprimento de energia. A conexão de cargas não-lineares ao sistema provoca distorção de correntes que originam alteração na forma de onda da tensão.

É atribuído às cargas industriais não lineares de grande porte a fonte principal de distorção no sistema.

Essas distorções podem provocar alguns inconvenientes aos equipamentos tanto do consumidor quanto da concessionária tais como:

- harmônicos;
- perdas adicionais e aquecimentos em máquinas rotativas;
- torques pulsantes em motores (MIT);
- sobrecarga em capacitores e transformadores;
- sobretensões;
- instabilidade em sistemas de controle;
- interferências em sistemas de comunicação;
- problemas de proteção de sistema;
- erros de medição, etc.

A medição correta das grandezas elétricas, bem como a obtenção do espectro harmônico, em sistemas elétricos com cargas não lineares exige instrumentos especiais.

O instrumento desenvolvido neste trabalho consiste em um sistema completamente autônomo, destinado a medir qualquer grandeza elétrica de um sistema elétrico trifásico, que alimenta ou não cargas elétricas não lineares.

1 - INTRODUÇÃO

A filosofia do projeto foi de se obter um instrumento de pequenas dimensões, ideal para uso em campo, e de baixo custo relativo; por isso, procurou-se utilizar, onde foi possível, componentes amplamente difundidos e bastante usados em aplicações gerais.

Seguindo a linha atual em instrumentação, o equipamento é digital, possui visor alfanumérico, as opções de uso que são apresentadas na forma de telas ("menus") e pode ser conectado a um microcomputador para comunicação de dados.

O protótipo foi totalmente projetado e desenvolvido no Laboratório de Eletromecânica para Pequenas Centrais Hidrelétricas (LEPCH) da Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI), inclusive o serviço de placas de circuito impresso. A nível de desenvolvimento de circuitos e programas ("hardware" e "software"), foi utilizado um microcomputador padrão MSX.

1.1 - OBJETIVOS DO INSTRUMENTO DESENVOLVIDO

Embora o instrumento seja capaz de medir diversas grandezas eletromecânicas deu-se ênfase, neste trabalho, à medição das seguintes grandezas elétricas:

- tensão U_{An} ;
- tensão U_{Bn} ;
- tensão U_{Cn} ;
- corrente I_A ;
- corrente I_B ;
- corrente I_C ;
- $\cos\varphi$ A (fator de potência fase A);
- $\cos\varphi$ B (fator de potência fase B);
- $\cos\varphi$ C (fator de potência fase C);
- potência ativa fase A;

- potência ativa fase B;
- potência ativa fase C;
- potência reativa fase A;
- potência reativa fase B;
- potência reativa fase C;
- espectro harmônico tensão U_{An} ;
- espectro harmônico tensão U_{Bn} ;
- espectro harmônico tensão U_{Cn} ;
- espectro harmônico corrente I_A ;
- espectro harmônico corrente I_B ;
- espectro harmônico corrente I_C .

Estas grandezas podem ser apresentadas ao operador tanto no visor alfanumérico, como em uma mini impressora instalada no próprio instrumento. Além disso, o valor destas grandezas pode ser enviado para um microcomputador conectado através da comunicação serial.

1.2 - CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DO INSTRUMENTO DESENVOLVIDO

No diagrama da figura 1.1 está representada a arquitetura geral desenvolvida.

1.2.1 - CONDICIONAMENTO DOS SINAIS DE ENTRADA

Este bloco faz o condicionamento dos sinais elétricos da entrada para que sejam compatíveis com o nível de tensão do conversor análogo-digital. Os sinais de tensão da entrada são atenuados através de divisores resistivos.

Os sinais de corrente da entrada passam por um resistor ("shunt") que faz a conversão corrente/tensão. A tensão nos terminais do resistor ("shunt"), da ordem de milivolts, é amplificada através de amplificadores operacionais.

Desta forma, tanto os sinais de tensão como os de corrente foram adequados para serem lidos pelo bloco de conversão análogo digital na faixa de $\pm 2,5$ [V].

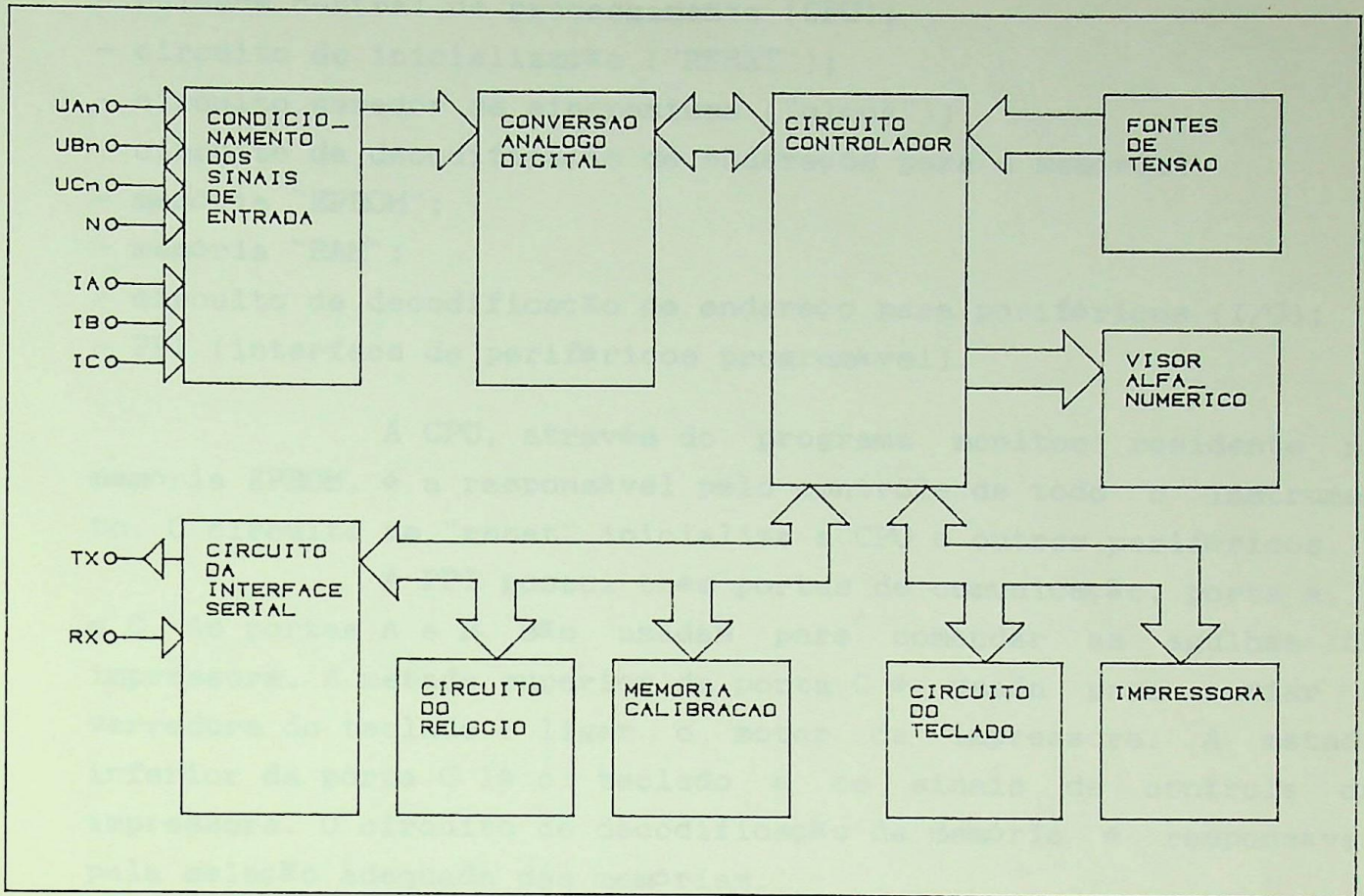


FIGURA 1.1. Arquitetura geral do instrumento.

1.2.2 - CONVERSÃO ANALÓGICO/DIGITAL (A/D)

Este bloco é responsável pela conversão analógico digital (conversão A/D); por isso, nele estão incluídos os circuitos de amostragem e retenção, multiplexagem, conversão A/D, tempo ("clock") do conversor e decodificação dos sinais de entrada.

Este bloco, quando solicitado, converte os sinais analógicos, presentes na sua entrada, para a forma digital, possibilitando, portanto, a sua leitura pelo bloco controlador.

1.2.3 - CIRCUITO CONTROLADOR

Este bloco é o coração do sistema e inclui os circuitos de:

- unidade central de processamento (CPU);
- circuito de inicialização ("RESET");
- circuito gerador de sincronismo ("clock");
- circuito de decodificação de endereços para a memória;
- memória "EPROM";
- memória "RAM";
- circuito de decodificação de endereço para periféricos (I/O);
- PPI (interface de periféricos programável).

A CPU, através do programa monitor residente na memória EPROM, é a responsável pelo controle de todo o instrumento. O circuito de "reset" inicializa a CPU e outros periféricos.

A PPI possui três portas de comunicação, porta A, B e C. As portas A e B são usadas para comandar as agulhas da impressora. A metade superior da porta C é usada para enviar a varredura do teclado e ligar o motor da impressora. A metade inferior da porta C lê o teclado e os sinais de controle da impressora. O circuito de decodificação de memória é responsável pela seleção adequada das memórias.

O circuito de decodificação de I/O é responsável pela habilitação correta dos periféricos: PPI, conversor A/D, visor, interface serial e relógio.

1.2.4 - CIRCUITO DA COMUNICAÇÃO SERIAL

Este circuito é responsável pela comunicação do instrumento, com um microcomputador, através da porta de comunicação serial. É composto por:

- circuito integrado de comunicação serial (USART);
- circuitos conversores de nível TTL <-> RS-232C;
- circuito gerador de frequência;
- circuito divisor de frequência;
- circuito gerador de interrupção.

O USART é um circuito integrado especialmente desenvolvido para fazer a conversão paralelo-serial e serial-paralelo.

O circuito conversor de nível da transmissão de dados faz com que o nível baixo (TTL) zero volt, seja convertido em +15[V] (RS-232C) de saída, e o nível alto (TTL) 5 volts em -15[V] (RS-232C).

Na recepção, a conversão de nível é inversa, ou seja, o nível +15[V] (RS-232C) de entrada é convertido em zero volt (TTL) e o nível -15[V] (RS-232C) em 5 [V] (TTL).

O circuito gerador de frequência é responsável pelo sincronismo ("clock") do USART, utiliza um cristal de quartzo como referência e sua frequência é múltipla da velocidade de comunicação

O circuito divisor de frequência define a velocidade de comunicação em bits por segundo ("bauds"). Fornece ao USART a frequência de sincronismo dividida por um múltiplo de 2^n .

O circuito gerador de interrupção, quando o USART recebe um byte válido, ativa uma linha de interrupção da CPU, para que a mesma faça, imediatamente, a leitura do byte.

1.2.5 - CIRCUITO DO TECLADO

Este circuito é responsável pelo funcionamento do teclado. Ao ser solicitado envia a varredura sequencialmente ao teclado, e o resultado da mesma é codificado e enviado à CPU. Ele é composto por 20 teclas, com contato "REED-SWITCH", ativado por campo magnético.

1.2.6 - CIRCUITO DA IMPRESSORA

A impressora utilizada é do tipo compacta, composta por 10 agulhas, sendo cada uma responsável pela formatação de dois caracteres.

Esta impressora é usada em alguns modelos de calculadora de mesa sendo, portanto, robusta, compacta e facilmente adquirida no mercado.

Este bloco é composto por:

- "drivers" de corrente para excitar as bobinas de disparo das agulhas;
- "driver" de corrente para ativar o motor da impressora;
- codificação dos sinais de controle da impressora.

Quando a impressão se faz necessária a CPU dá partida ao motor de impressão. A CPU deve saber quando o grupo impressor está na posição correta para imprimir; isso lhe é informado pela geração dos sinais de controle.

Quando isso acontece, a CPU alimenta as bobinas para produzir os pontos de caracteres a serem impressos.

Como a formatação das agulhas é feita por programação ("software") consegue-se imprimir o código "ASCII" completo.

1.2.7 - VISOR ALFANUMÉRICO

O visor utilizado no protótipo é de cristal líquido (LCD), alfanumérico de duas linhas, com dezesseis colunas cada uma. Ele recebe diretamente da CPU o código "ASCII" do caracter a ser apresentado, e o mostra na tela. O avanço do cursor é automático.

1.2.8 - MEMÓRIA DE CALIBRAÇÃO

Como a calibração do instrumento é feita por programação ("software") há a necessidade do equipamento gravar as constantes de calibração em uma memória não volátil.

Este bloco é responsável pela gravação dessas constantes de calibração em uma memória tipo EPROM.

Por isso, o bloco faz toda a lógica de temporização necessária à gravação deste tipo de memória.

1.2.9 - CIRCUITO DO RELÓGIO

O instrumento possui um relógio simples, atualizado a cada 1 (um) minuto, que utiliza a frequência alternada de 60[Hz] da fonte de alimentação, como referência de sincronismo.

O sinal senoidal de 60[Hz] é inicialmente "quadrado" (alterado e colocado como uma onda alternada com dois níveis, um positivo e um negativo a 60[Hz]) e dividido por 3600, produzindo um pulso a cada 1 (um) minuto. Estes pulsos gerados são totalizados em um contador, cujas saídas são lidas pela CPU.

1.2.10 - CIRCUITO DE SELEÇÃO DO INSTRUMENTO

A filosofia do equipamento desenvolvido permite que vários instrumentos sejam conectados, em paralelo, a um mesmo microcomputador através da comunicação serial.

Portanto, é necessário que cada instrumento possua um endereço físico diferente do outro, para que o microcomputador saiba qual instrumento está enviando dados.

Esse endereço é selecionado através de quatro teclas seletoras ("STRAPS") possibilitando a conexão de até 16 instrumentos a um mesmo microcomputador.

1.2.11 - FONTES DE TENSÃO

As fontes de tensão são as responsáveis pela alimentação dos circuitos, com as tensões necessárias ao seu funcionamento.

Ele é composto, basicamente, pelo transformador de entrada, ligado à rede elétrica através de um pequeno filtro de linha, e pelos reguladores de tensão.

1.3 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O instrumento desenvolvido pode ser considerado como um versátil equipamento multifunções, cujo funcionamento

consiste sempre em converter a forma de onda analógica, presente em cada canal para a forma digital.

Ele possui 6 canais analógicos de entrada, 3 para tensão, 3 para corrente. No instante em que a forma de onda da tensão da fase A (canal 1) passa por zero iniciando o ciclo, o equipamento inicializa a digitalização simultaneamente em todos os canais, de tal forma que ao final do ciclo, 16,66[ms] para frequência de 60[Hz], existem N valores digitais, correspondentes a cada canal, armazenados na memória definidos com:

$U_1[i] \rightarrow$ vetor de pontos do canal 1 (tensão na fase A)

$I_1[i] \rightarrow$ vetor de pontos do canal 2 (corrente na fase A)

$U_2[i] \rightarrow$ vetor de pontos do canal 3 (tensão na fase B)

$I_2[i] \rightarrow$ vetor de pontos do canal 4 (tensão na fase A)

$U_3[i] \rightarrow$ vetor de pontos do canal 5 (corrente na fase A)

$I_3[i] \rightarrow$ vetor de pontos do canal 6 (tensão na fase B)

1.3.1 - CÁLCULO DA TENSÃO, CORRENTE, POTÊNCIA E FATOR DE POTÊNCIA

Com os dados digitais aquisitados de cada canal são feitos os cálculos necessários para obter as grandezas elétricas desejadas.

A potência média (ativa) medida em um ciclo de período T é definida como:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) \cdot dt \quad (1)$$

onde:

$u(t)$ - valor instantâneo da onda de tensão

$i(t)$ - valor instantâneo da onda de corrente.

A integral definida anteriormente para um número finito N de amostras pode ser aproximada pelo seguinte somatório:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{[i]} \cdot I_{[i]} \quad (2)$$

onde $U_{[i]}$ e $I_{[i]}$ são amostras simultâneas da tensão e da corrente,

igualmente espaçadas, no tempo e devem ser satisfeitas duas condições:

- 1 - a amostragem deve ser feita em um número inteiro de ciclos.
- 2 - a forma de onda no ciclo não deve mudar durante a amostragem.

O valor eficaz da tensão (RMS) é definido como:

$$U_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [u(t)]^2 dt} \quad (3)$$

para N amostras:

$$U_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{[i]}^2} \quad (4)$$

analogamente para a corrente RMS:

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{[i]}^2} \quad (5)$$

As demais funções de interesse são calculadas pelas expressões:

- Volt-Amperes:

$$S = U_{\text{RMS}} \cdot I_{\text{RMS}} \quad (6)$$

- Fator de Potência:

$$\text{FP} = \frac{P}{S} \quad (7)$$

- Potência reativa:

A potência reativa é calculada da mesma forma que a potência ativa, desde que a tensão seja atrasada em relação a corrente em um quarto de ciclo (90 graus). Desta forma, a potência reativa é dada por:

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{[i]} \cdot I_{[i+N/4]} \quad (8)$$

No instrumento desenvolvido, os cálculos para representar o sistema trifásico são processados individualmente para cada canal, sendo depois totalizados.

Para a fase A:

tensão RMS:

$$U_{An} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{1[i]}^2} \quad (9)$$

corrente RMS:

$$I_A = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{1[i]}^2} \quad (10)$$

potência ativa

$$P_A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{1[i]} \cdot I_{1[i]} \quad (11)$$

volt-amperes

$$S_A = U_A \cdot I_A \quad (12)$$

fator de potência

$$FP_A = \frac{P_A}{S_A} \quad (13)$$

potência reativa

$$Q_A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{1[i]} \cdot I_{1[i+N/4]} \quad (14)$$

Para a fase B:

$$U_{Bn} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{2[i]}^2} \quad (15)$$

$$I_B = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{2[i]}^2} \quad (16)$$

$$P_B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{2[i]} \cdot I_{2[i]} \quad (17)$$

$$S_B = U_B \cdot I_B \quad (18)$$

$$FP_B = \frac{P_B}{S_B} \quad (19)$$

$$Q_B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{2[i]} \cdot I_{2[i+N/4]} \quad (20)$$

Para a fase C:

$$U_{Cn} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{3[i]}^2} \quad (21)$$

$$I_C = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{3[i]}^2} \quad (22)$$

$$P_C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{3[i]} \cdot I_{3[i]} \quad (23)$$

$$S_C = U_C \cdot I_C \quad (24)$$

$$FP_C = \frac{P_C}{S_C} \quad (25)$$

$$Q_C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{3[i]} \cdot I_{3[i+N/4]} \quad (26)$$

No caso de um sistema trifásico, define-se os seguintes valores médios.

Tensão média trifásica:

$$U_{mt} = \frac{U_A + U_B + U_C}{3} \cdot \sqrt{3} \quad (27)$$

Corrente média:

$$I_{mt} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} \quad (28)$$

Fator de potência médio:

$$FP_{mt} = \frac{FP_A + FP_B + FP_C}{3} \quad (29)$$

Potência ativa total:

$$P_t = P_A + P_B + P_C \quad (30)$$

Potência reativa total:

$$Q_t = Q_A + Q_B + Q_C \quad (31)$$

1.3.2 - CÁLCULO DO ESPECTRO HARMÔNICO

As análises no domínio de tempo e da frequência são feitas através do desenvolvimento dos sinais de interesse em séries trigonométricas de Fourier.

Para determinar o conteúdo harmônico das formas de

onda adquiridas pelo instrumento, foi implementada uma rotina capaz efetuar a decomposição em série trigonométrica de Fourier, aqui denominada por Análise de Fourier.

Dada uma variável expressa como uma função do tempo, a Análise de Fourier irá decompô-la em um somatório de funções oscilatórias, cada qual com sua frequência específica. Estas frequências, com suas correspondentes amplitudes e ângulos de fase, constituem o conteúdo harmônico da variável original.

O desenvolvimento da técnica da Transformada Rápida de Fourier (FFT) tornou o uso de computadores digitais bastante atrativo.

O método utilizado é o de Cooley e Tukey [10]. Este método reduz o número de multiplicações necessárias ao cálculo do conteúdo harmônico de uma função no tempo por um fator γ/N , comparando com o método clássico.

onde:

N - número de amostras do período no tempo; e

$$\gamma = \frac{\ln N}{\ln 2} \quad (\ln : \text{logaritmo neperiano}) \quad (32)$$

O método Cooley-Tukey é baseado no uso da lógica binária para computação e, por esta razão, o número de passos de frequência discreta são tomados em potência de dois.

Conclui-se que a análise, através da FFT em instrumentos digitais, é mais eficiente em termos de velocidade. Porém, para que os resultados sejam válidos é necessário satisfazer duas condições:

- 1 - o número de amostras adquiridas no período T, da forma de onda analisada, deve ser uma potência de dois (64, 128, 256,..)
- 2 - a amostragem deve ser igualmente espaçada no tempo, (passo de amostragem constante).

Para N amostras no período obtém-se na decomposição $\frac{N}{2}$ harmônicos da frequência fundamental do período amostrado.

O instrumento calcula os espectros harmônicos das

tensões U_{An} , U_{Bn} , U_{Cn} e das correntes I_A , I_B e I_C .

1.4 - DETERMINAÇÃO DA TAXA DE AMOSTRAGEM

A determinação da taxa de amostragem é um compromisso entre a precisão, velocidade e custo do instrumento.

Em termos de precisão, quanto maior o número de amostras no período melhor, porém este aumento implica em um conversor A/D mais rápido e, portanto, mais caro. Além disso, o tempo gasto no cálculo das grandezas elétricas e na obtenção do espectro harmônico também é proporcionalmente maior.

Para atender à performance desejada do equipamento foi feito um estudo comparativo entre várias taxas de amostragem. Como o algoritmo da FFT necessita de um número de amostras de base dois, o estudo comparativo foi feito com taxa de amostragem de 512, 256, 128 e 64 pontos por ciclo.

No estudo foi utilizada uma forma de onda de corrente típica de ponte retificadora a diodos em formação de GRAETZ.

Inicialmente foi amostrada com 512 pontos, com os quais se calculou o valor da corrente RMS (IRMS) e o espectro harmônico (até a 31^a ordem). Os resultados estão nas figuras 1.2 e 1.3.

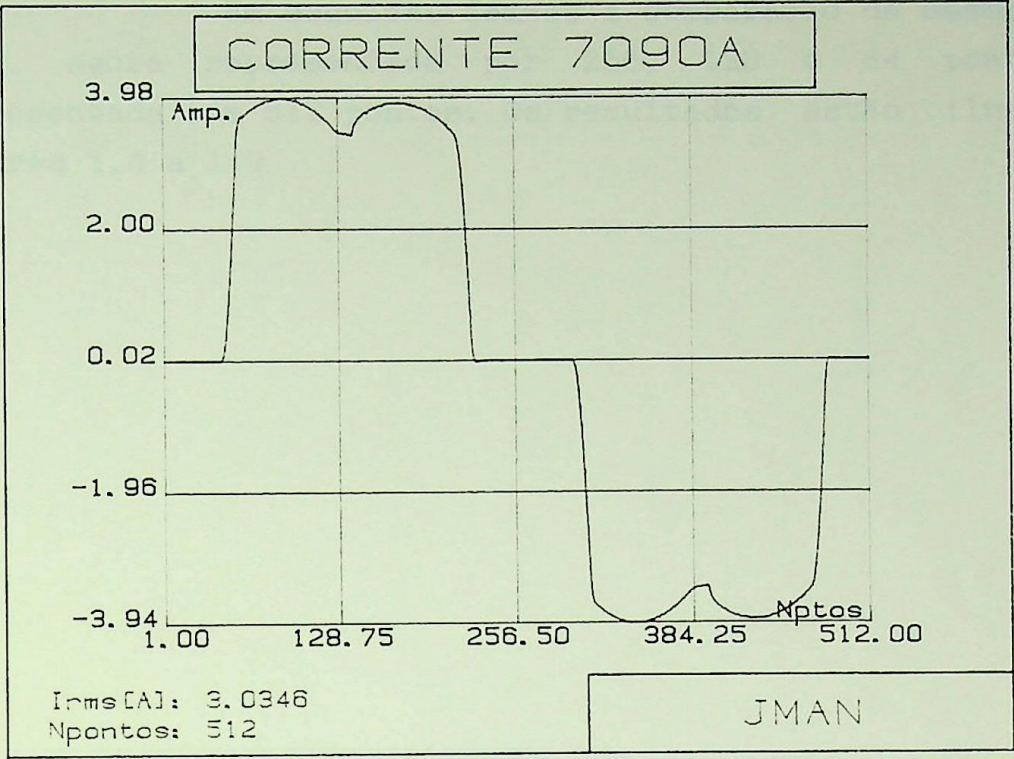


FIGURA 1.2. Forma de onda e valor IRMS calculado para 512 pontos.

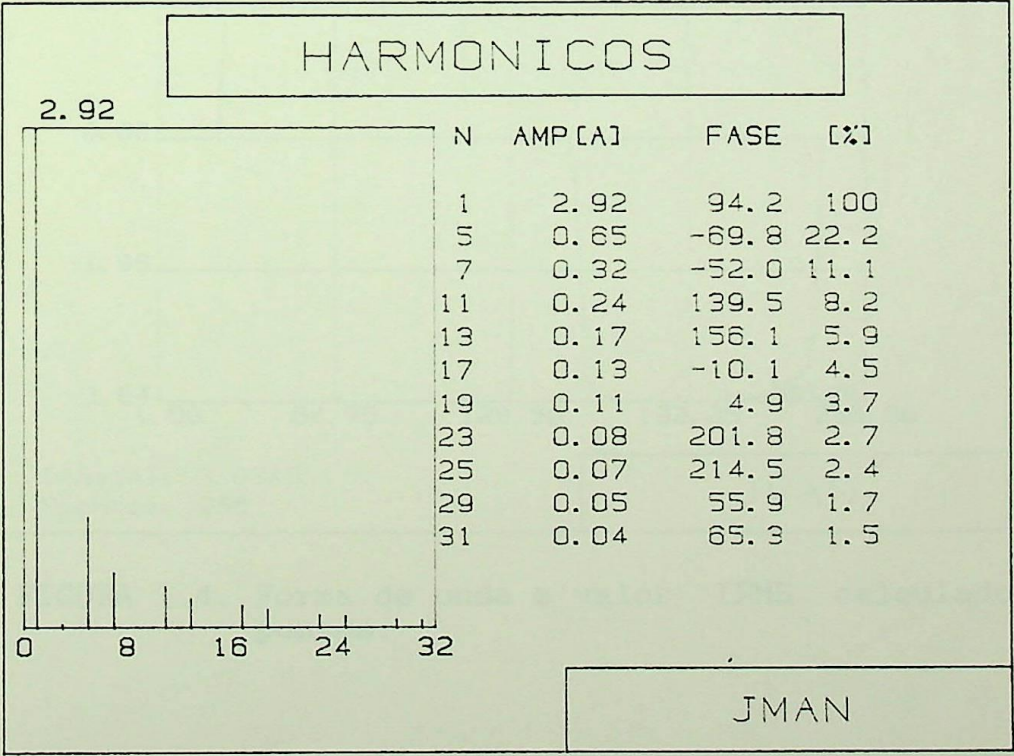


FIGURA 1.3. Espectro harmônico decomposto da figura 1.2.

Em seguida, fez-se a comparação da mesma forma de onda, agora representada por 256, 128 e 64 pontos com a representada com 512 pontos. Os resultados estão ilustrados nas figuras 1.4 a 1.9 .

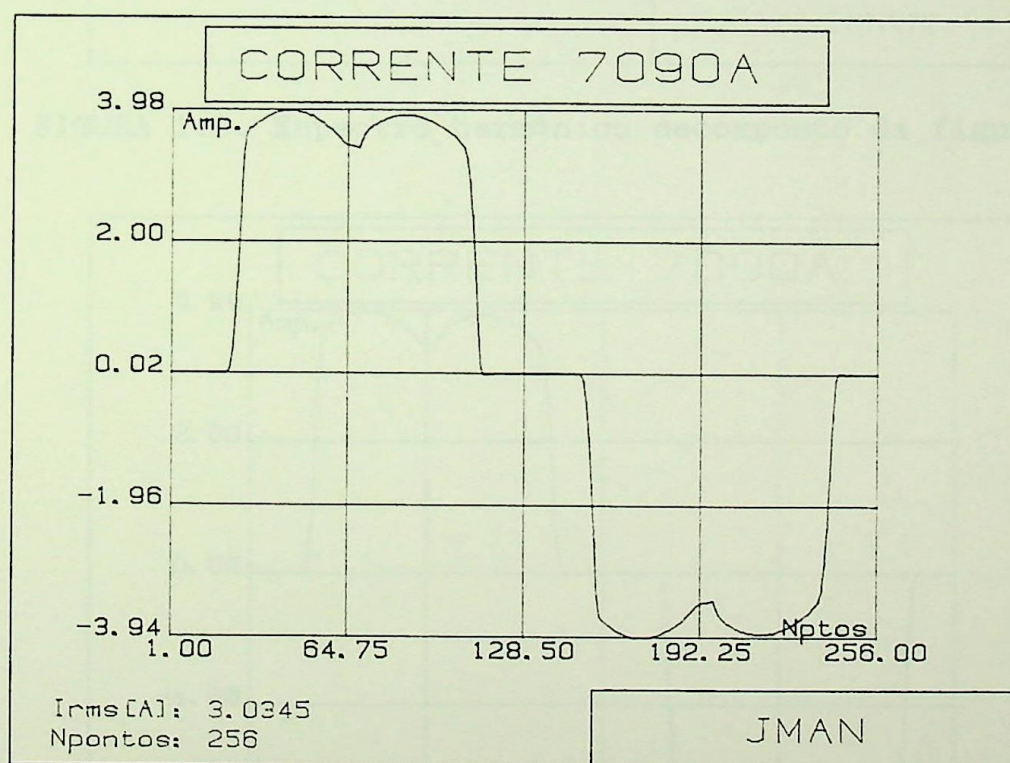


FIGURA 1.4. Forma de onda e valor IRMS calculado para 256 pontos.

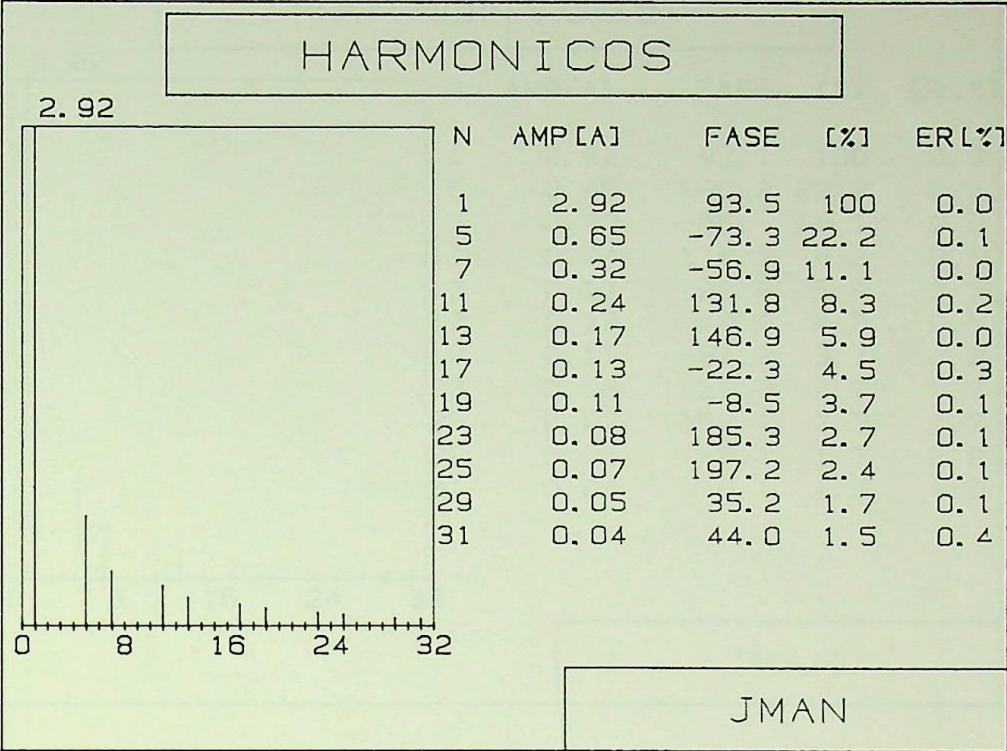


FIGURA 1.5. Espectro harmônico decomposto da figura 1.4

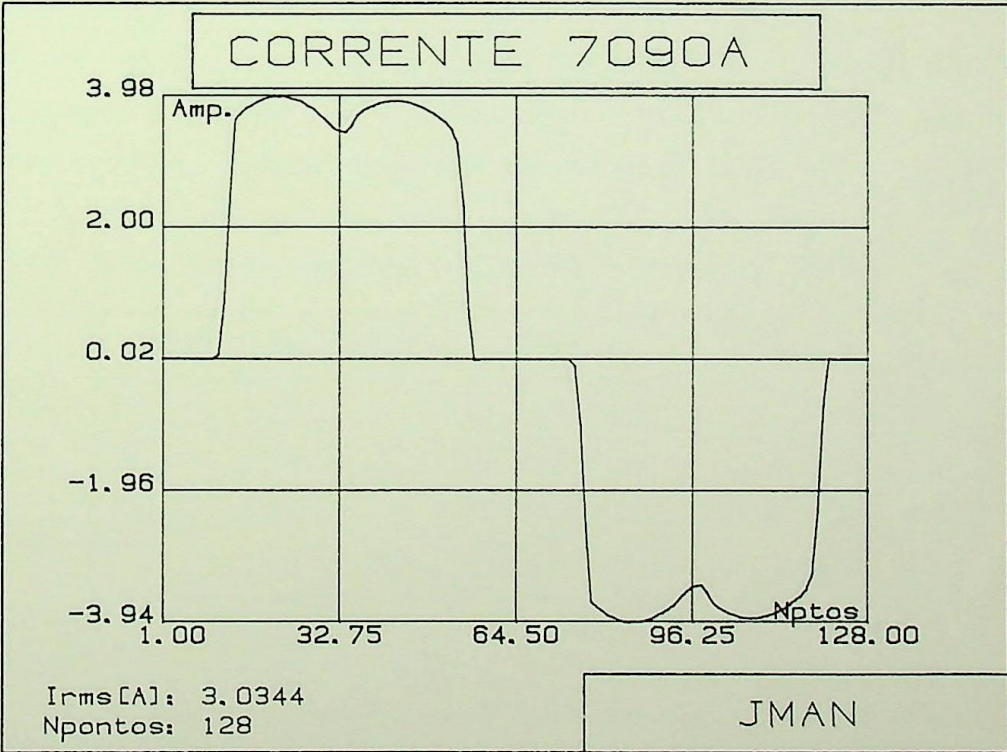


FIGURA 1.6. Forma de onda e valor IRMS calculado para 128 pontos.

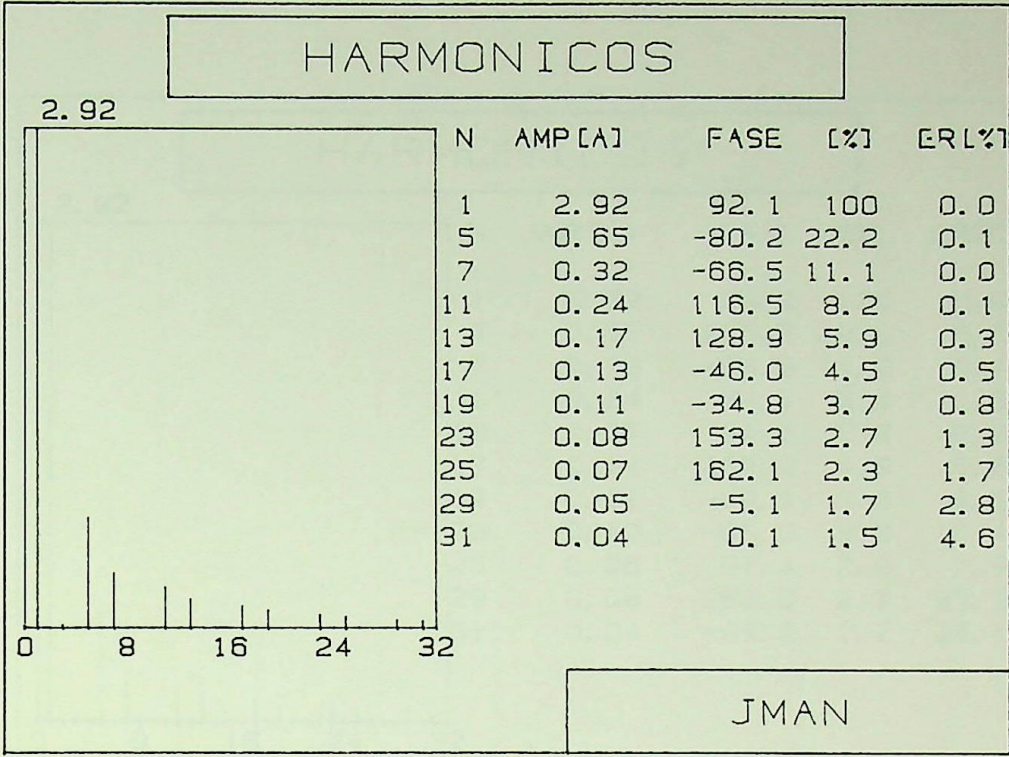


FIGURA 1.7. Espectro harmônico decomposto da figura 1.6.

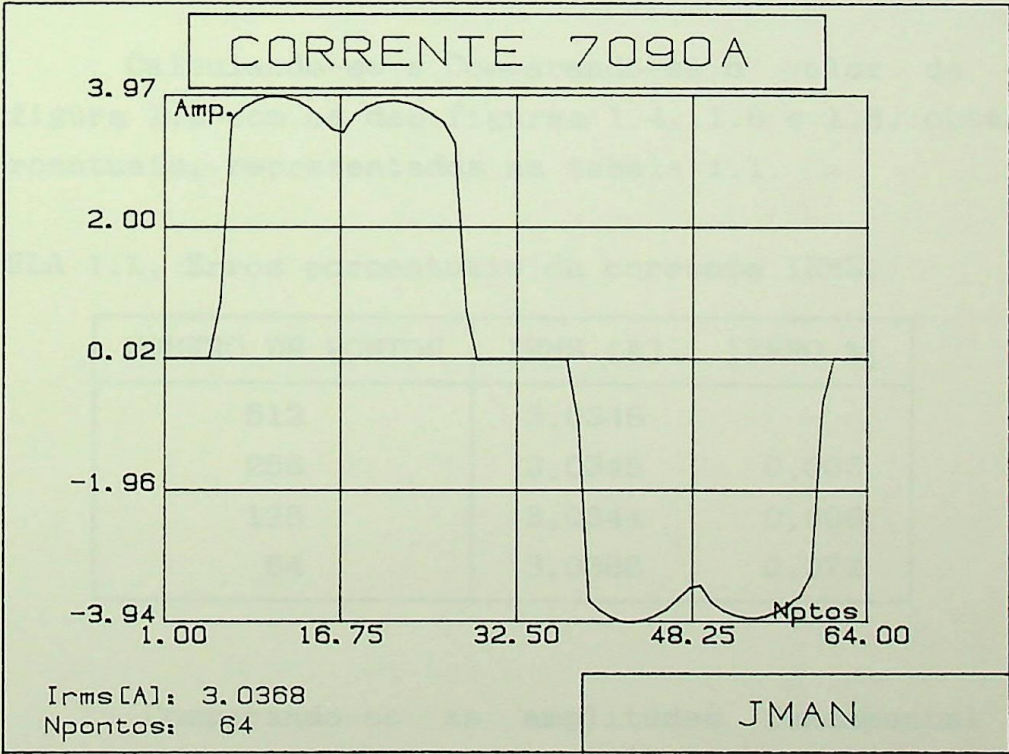


FIGURA 1.8. Forma de onda e valor IRMS calculado para 64 pontos.

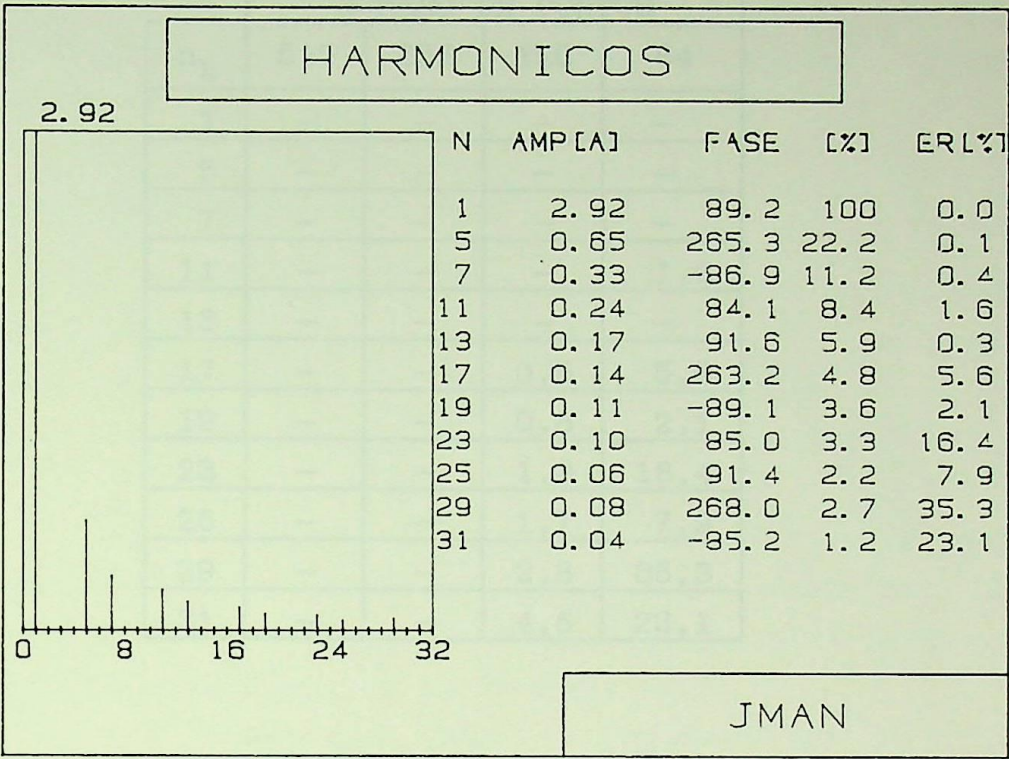


FIGURA 1.9. Espectro harmônico decomposto da figura 1.8.

Calculando-se e Comparando-se o valor da corrente IRMS da figura 1.2 com os das figuras 1.4, 1.6 e 1.8, obtém-se os erros percentuais, representados na tabela 1.1.

TABELA 1.1. Erros percentuais da corrente IRMS.

NUMERO DE PONTOS	IRMS [A]	ERRO %
512	3,0346	—
256	3,0345	0,003
128	3,0344	0,006
64	3,0368	0,072

Comparando-se as amplitudes fundamental e dos harmônicos da figura 1.3 com as figuras 1.5, 1.7 e 1.9, obtém-se os erros percentuais harmônicos representados na tabela 2.

TABELA 1.2. Erros percentuais harmônicos superiores a 0,5%.

n_h	NÚMERO DE PONTOS			
	512	256	128	64
1	—	—	—	—
5	—	—	—	—
7	—	—	—	—
11	—	—	—	1,6
13	—	—	—	—
17	—	—	0,5	5,6
19	—	—	0,8	2,1
23	—	—	1,3	16,4
25	—	—	1,7	7,9
29	—	—	2,8	35,3
31	—	—	4,6	23,1

Analisando-se as tabelas 1.1 e 1.2 deduz-se facilmente que a escolha do número de pontos no período deve ser feita comparando-se os erros obtidos nas decomposições em harmônicos para os diversos números de pontos.

Tendo em vista que em sistemas elétricos industriais analisa-se normalmente, no máximo, até a 32^a ordem harmônica, foi escolhido o número mínimo de 128 pontos por ciclo que garante erro inferior a 5% no 31º harmônico (tabela 1.2).

Portanto, para a frequência dos sinais de tensão e corrente (60[Hz]), a taxa de amostragem por canal vale:

$$F_a = F_r \cdot N \quad (33)$$

onde:

F_a = frequência de amostragem em [Hz]

F_r = frequência da rede elétrica [Hz]

N = número de pontos amostrados no ciclo.

$$F_a = 60 \cdot 128 = 7680 \text{ [Hz]}$$

$N = 128$ pontos por período

Como o instrumento calcula os harmônicos até a 32^a ordem (1920 [Hz]) a taxa de amostragem é quatro vezes maior, satisfazendo portanto o teorema da amostragem.

1.5 - A CONVERSÃO ANALÓGO-DIGITAL

Assim, como os métodos para calcular as grandezas elétricas, vistas anteriormente, implicam em erros de aproximação, a conversão análogo digital (conversão A/D), que é a interface entre os sinais analógicos e os sinais binários, também implica em erros.

O mecanismo de aquisição digital consiste em se fazer a amostragem, em intervalos de tempo regulares, do valor instantâneo do sinal analógico, transformá-lo num valor digital correspondente e armazená-lo na memória.

A amostragem não é possível de ser realizada continuamente no tempo, visto que entre uma amostra e outra do sinal, existe o tempo gasto pelo conversor no processo de conversão e também o tempo dispendido na sua leitura e armazenagem na memória pela CPU.

É necessário garantir ao conversor que o sinal analógico seja mantido constante durante a digitalização. Para isso, utiliza-se na entrada do conversor A/D um circuito analógico conhecido como amostrador/retentor ("Sample/Hold").

O circuito "Sample/Hold", como o nome indica, possui dois modos de funcionamento, programado por um pino digital de entrada.

No modo de amostragem ("Sample") a tensão de saída acompanha as variações da tensão de entrada. Quando o circuito é comandado para retenção ("Hold") a sua saída mantém o último valor, independente do valor da entrada.

Desta maneira, quando o conversor A/D não está operando, o circuito "Sample/Hold" está no modo "Sample", fazendo com que o sinal analógico que chega ao conversor A/D seja fiel ao sinal de entrada.

Quando o conversor A/D é comandado a fazer uma conversão, este comuta o circuito "Sample/Hold" para o modo "hold", mantendo assim constante o sinal na entrada do conversor. Ao final da conversão o circuito "Sample/Hold" é comandado novamente para o modo "Sample".

O circuito "Sample/Hold" consiste basicamente em um capacitor de armazenamento, uma chave analógica, e amplificadores ("Buffers") de entrada e saída. Durante o modo "Sample" o amplificador de entrada é conectado através da chave ao capacitor que faz com que este se carregue rapidamente. Durante o modo "Hold" o capacitor é desconectado da entrada e retém a sua carga.

A figura 1.10 mostra uma configuração típica. Os amplificadores possuem alta impedância de entrada e baixa impedância de saída.

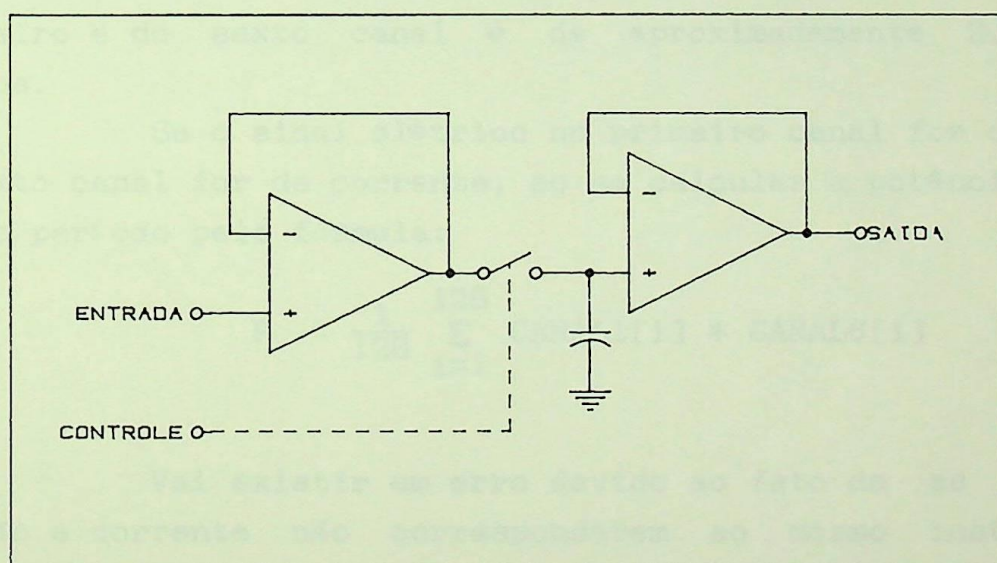


FIGURA 1.10. Configuração típica do "Sample/Hold".

O conversor A/D usado no instrumento utiliza o método da aproximação sucessiva. Este método emprega um conversor D/A em um laço de realimentação e em operação, compara um bit por vez desse conversor, começando pelo mais significativo (MSB).

À medida que cada bit é comparado, a saída do comparador indica se a entrada analógica é maior ou menor que a

saída do conversor D/A. Uma vez comparados todos os bits deste conversor, o ciclo de conversão está encerrado.

O processo de conversão apresenta um erro de quantificação fundamentalmente associado à divisão de um sinal continuamente variável em um número finito de bits; seu valor máximo é mais ou menos de meio bit menos significativo ($\pm 1/2$ bit).

1.6 - O ERRO DE MULTIPLEXAGEM

A forma mais barata de fazer a aquisição de dados, em sistemas multicanais, consiste em se utilizar apenas um conversor análogo digital. Para que sejam lidos vários canais é necessário que se faça a multiplexagem analógica entre eles.

Em um sistema elétrico de frequência igual a 60 [Hz], ao se fazer a multiplexagem entre 6 canais de entrada, para amostrar 128 pontos no período, o tempo decorrido entre a leitura do primeiro e do sexto canal é de aproximadamente 2,8 graus elétricos.

Se o sinal elétrico no primeiro canal for de tensão e no sexto canal for de corrente, ao se calcular a potência ativa média no período pela fórmula:

$$P = \frac{1}{128} \sum_{i=1}^{128} \text{CANAL1}[i] * \text{CANAL6}[i] \quad (34)$$

Vai existir um erro devido ao fato de as amostras de tensão e corrente não corresponderem ao mesmo instante no tempo.

Foi simulado em computador o cálculo da potência ativa, entre tensão e corrente senoidais, utilizando-se a expressão (34), sendo cada canal representado por 128 pontos (figuras 1.11 e 1.12, curva cheia).

Os pontos correspondentes da corrente, inicialmente em fase com os de tensão, foram defasados de tal forma a variar o fator de potência entre um e zero.

Para cada condição, foi calculada e armazenada a

potência ativa. Em seguida, simulou-se novamente o cálculo da potência ativa, porém cometendo um erro de 2,8 graus elétricos de defasagem na corrente (figuras 1.11 e 1.12, curva tracejada).

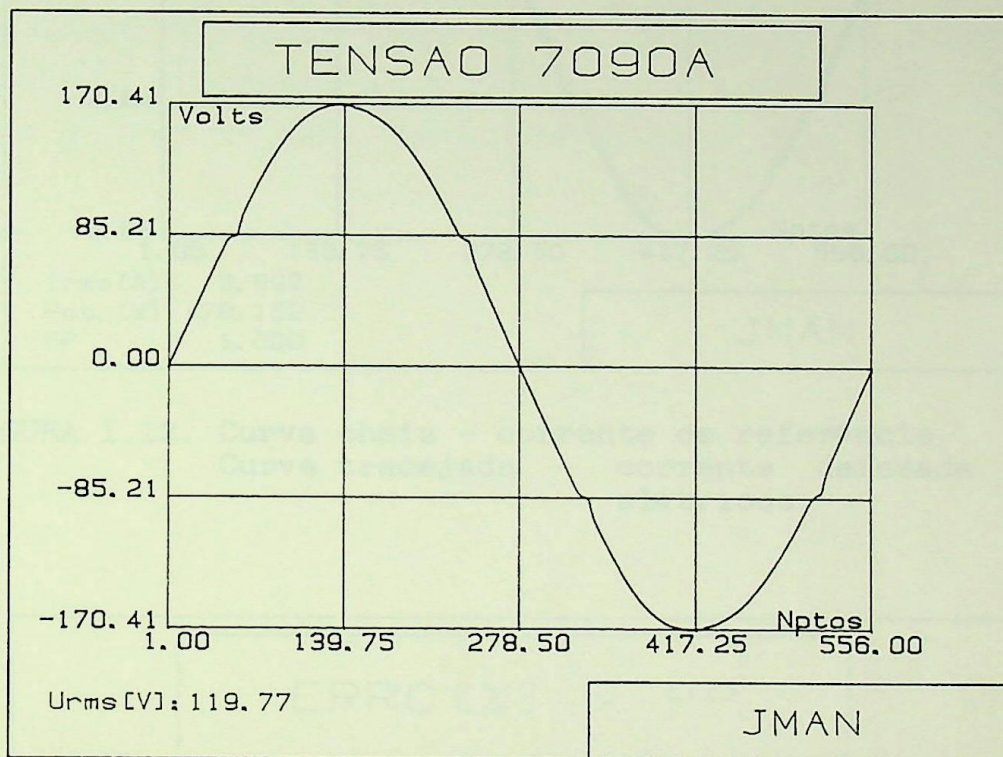


FIGURA 1.11. Curva da tensão.

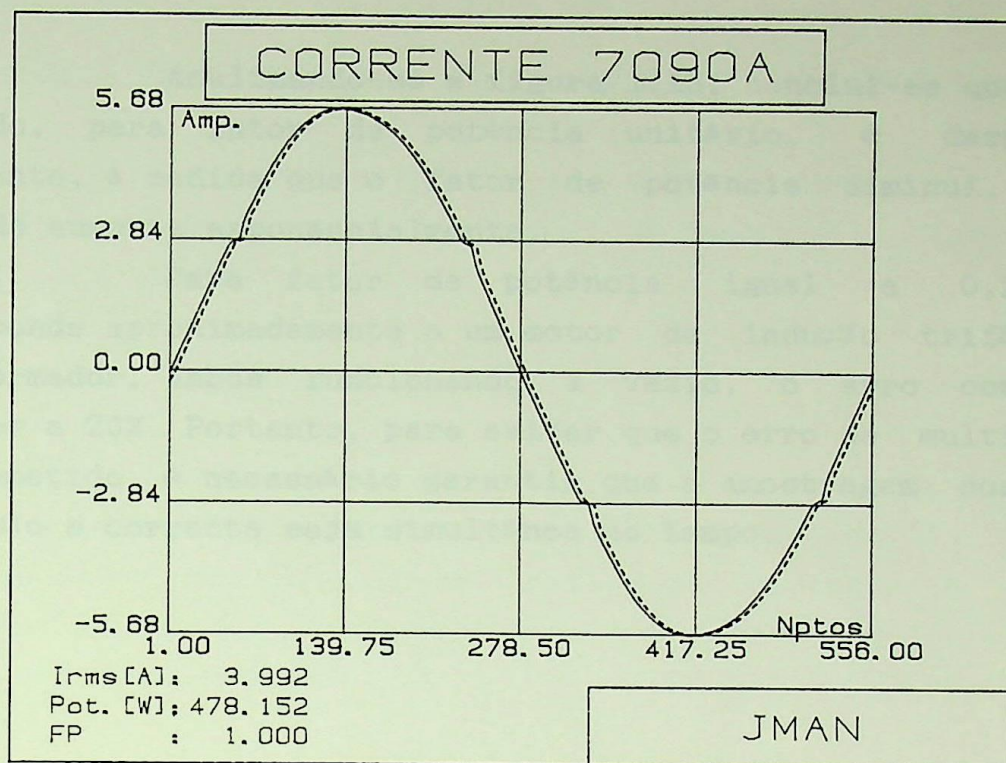


FIGURA 1.12. Curva cheia - corrente de referência
Curva tracejada - corrente defasada de $2,8^\circ$ elétricos.

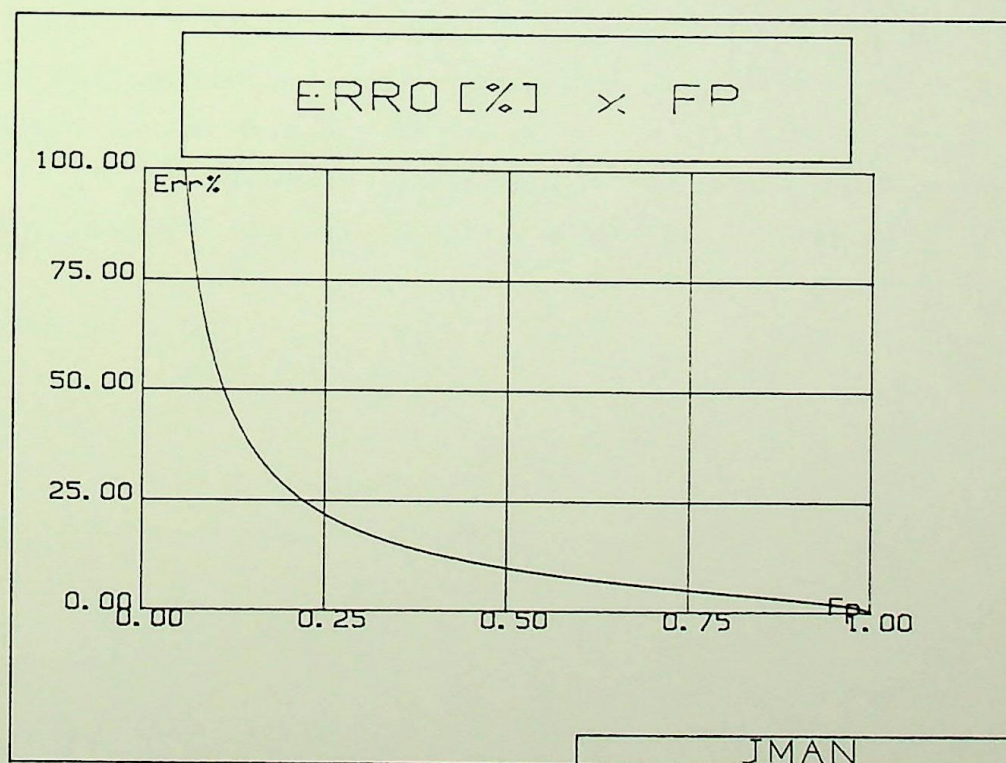


FIGURA 1.13. Erro percentual no cálculo da potência ativa em função do fator de potência.

Analisando-se a figura 1.13, conclui-se que o erro cometido, para fator de potência unitário, é desprezível. Entretanto, à medida que o fator de potência diminui, o erro cometido aumenta exponencialmente.

Para fator de potência igual a 0,25, que corresponde aproximadamente a um motor de indução trifásico ou transformador, ambos funcionando a vazio, o erro cometido é superior a 20%. Portanto, para evitar que o erro de multiplexagem seja cometido, é necessário garantir que a amostragem dos sinais de tensão e corrente seja simultânea no tempo.

2 - O CIRCUITO ("HARDWARE") DO INSTRUMENTO DESENVOLVIDO

O circuito ("hardware") do instrumento foi distribuído em 6 placas de circuito impresso. A descrição destas placas será feita a seguir.

2.1 - PLACA 1

Nesta placa está o circuito de condicionamento dos sinais de entrada que recebe os sinais externos de tensão e corrente alternada. Estes sinais para serem enviados à placa do conversor A/D (placa 5), necessitam de ser adequados, à tensão de entrada do conversor A/D.

2.1.1 - ENTRADAS DE TENSÃO

Existem três entradas de tensão: tensão da fase A, tensão da fase B e tensão da Fase C. O valor máximo de entrada permitido é de 130[V] RMS.

A forma de onda de tensão de entrada não pode ser alterada nem defasada, apenas deve ser atenuada a 2,5 [V_p] para ser enviada ao conversor A/D.

A atenuação desejada é feita através de um divisor de tensão passivo, calculado para esse fim, ilustrado na figura 2.1a.

Cálculo de R₁ e R₂:

$$U_1 = 130 [V_{RMS}] = 130 \cdot \sqrt{2} [V_p] = 183,85 [V_p]$$

$$U_2 = 2,5 [V_p]$$

$$I = \frac{U_2}{R_2}$$

Adotando R₂ = 900 [Ω]

$$I = \frac{2,5}{900} = 0,00277 \text{ [A]}$$

$$R_1 = \frac{U_1 - U_2}{I} = \frac{183,85 - 2,5}{0,00277}$$

$$R_1 = 65.285 \text{ } [\Omega]$$

$$R_1 \cong 65 \text{ [k}\Omega\text{]}$$

Valor comercial adotado:

$$R_1 = 68 \text{ [k}\Omega\text{]}$$

$$Pd_2 = R_2 I^2 = 900 \cdot 0,00277^2 = 6,8 \text{ [mW]}$$

$$Pd_1 = R_1 I^2 = 68.000 \cdot 0,00277^2 \cong 0,52 \text{ [W]}$$

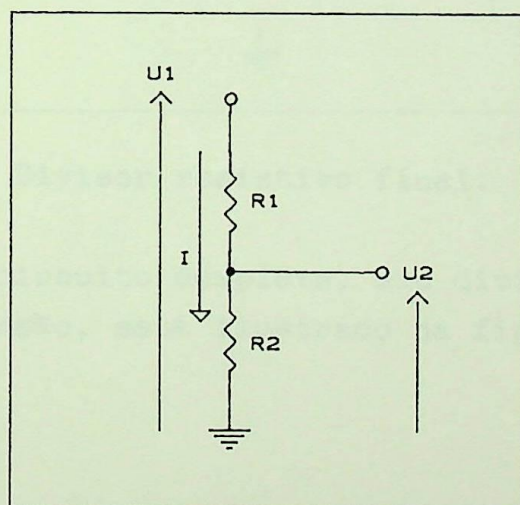


FIGURA 2.1a. Divisor resistivo

De modo a evitar o aquecimento dos resistores foi feita a associação, ilustrada na figura 2.1b, passando cada resistor \$R_1\$ a dissipar.

$$Pd_1 = R_1 \cdot \left(\frac{I}{2} \right)^2 = 68000 \cdot \left(\frac{0,00277}{2} \right)^2$$

$$Pd_1 \cong 0,13 \text{ [W]} \quad \therefore \quad 130 \text{ [mW]}$$

$$R_1 = 68 \text{ [k}\Omega\text{]} \quad 1/4 \text{ [W]}$$

$$R_3 = 2 R_2 = 1,8 \text{ [k}\Omega\text{]} \quad 1/4 \text{ [W]}$$

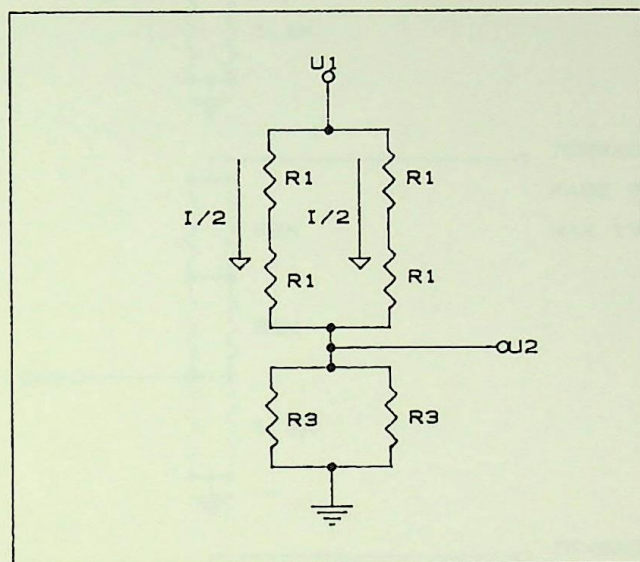


FIGURA 2.1b. Divisor resistivo final.

O circuito completo, dos divisores resistivos dos três canais de tensão, está ilustrado na figura 2.2.

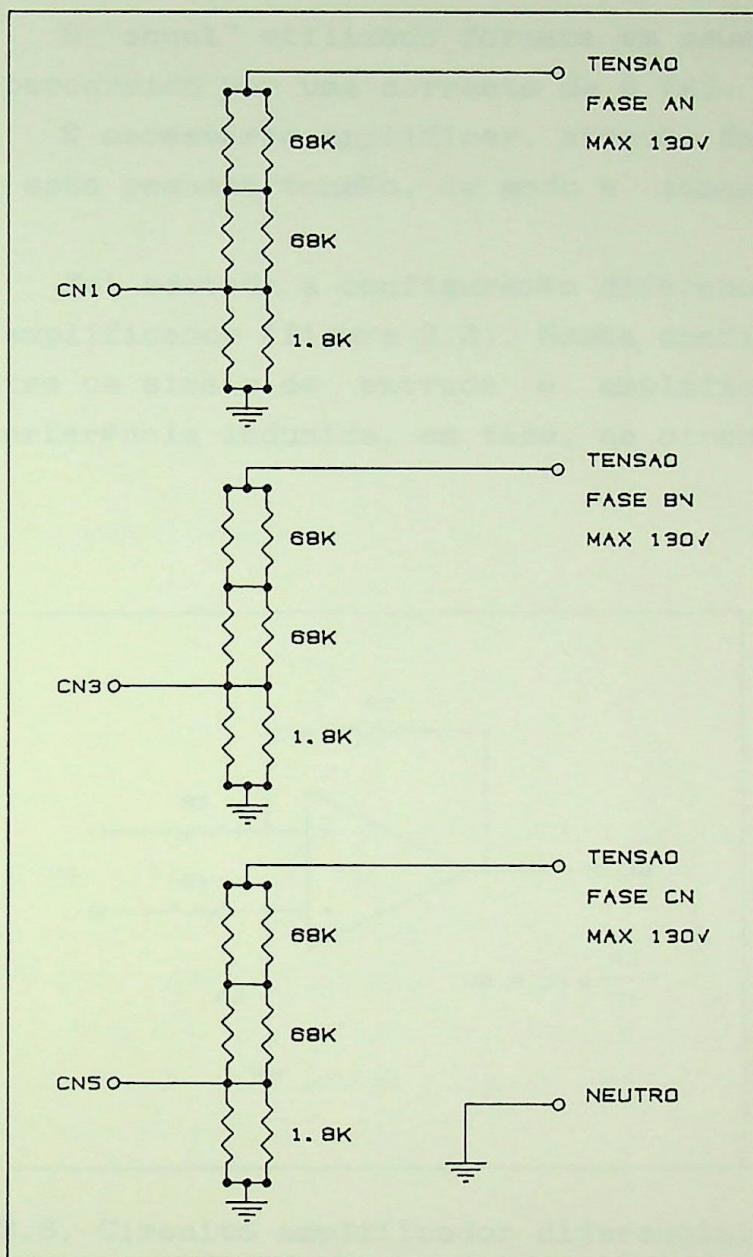


FIGURA 2.2. Circuito completo dos divisores resistivos.

2.1.2 - ENTRADAS DE CORRENTE

As entradas de corrente são: corrente da fase A, corrente da fase B e corrente da Fase C. O valor máximo permitido de cada entrada é de 5,5 [A] RMS.

Como a entrada do conversor A/D é de tensão, é necessário fazer inicialmente a conversão, através de um resistor ("shunt"), corrente-tensão.

O "shunt" utilizado fornece em seus terminais, 60 [mV] quando percorrido por uma corrente de 5 [A].

É necessário amplificar, através de um amplificador operacional, esta pequena tensão, de modo a aumentá-la para 2,5 [V_p].

Foi adotada a configuração diferencial de entrada no circuito amplificador (figura 2.3). Nesta configuração apenas a diferença entre os sinais de entrada é amplificada. Com isso, qualquer interferência induzida, em fase, no circuito de entrada é cancelada.

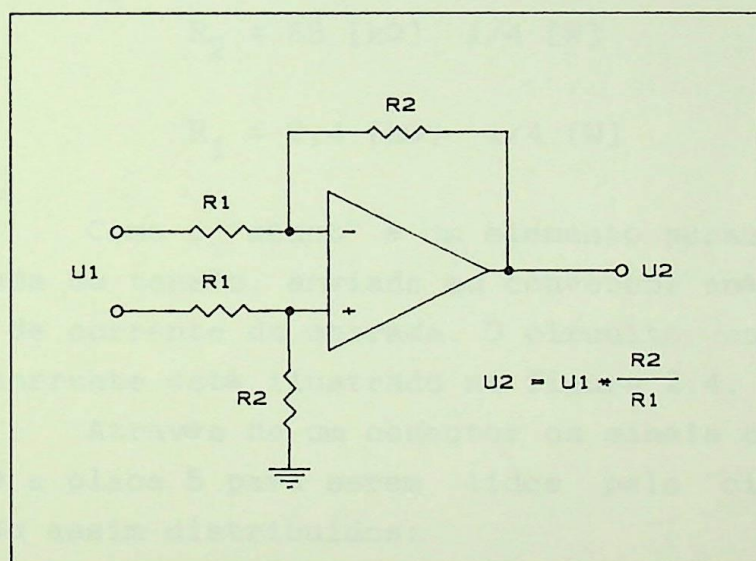


FIGURA 2.3. Circuito amplificador diferencial.

Cálculo de R_1 e R_2 :

"Shunt" usado: 5[A]/60[mV]

$$U_1 = 60 \text{ [mV}_{\text{RMS}}]$$

$$U_{1p} = 60 \cdot \sqrt{2}$$

$$U_{1p} = 84,85 \text{ [mV}_p\text{]}$$

$$U_{2p} = 2,5 \text{ [V}_p\text{]}$$

Adotando $R_1 = 2400 \text{ } [\Omega]$:

$$R_2 = R_1 \frac{U_{2p}}{U_{1p}}$$

$$R_2 = 2400 \cdot \frac{2500}{84,85}$$

$$R_2 \cong 70710 \text{ } [\Omega]$$

Valor comercialmente adotado:

$$R_2 = 68 \text{ [k}\Omega\text{]} \quad 1/4 \text{ [W]}$$

$$R_1 = 2,4 \text{ [k}\Omega\text{]} \quad 1/4 \text{ [W]}$$

Como o "shunt" é um elemento puramente resistivo a forma de onda de tensão, enviada ao conversor análogo digital, é a mesma onda de corrente de entrada. O circuito completo dos três canais de corrente está ilustrado na figura 2.4.

Através de um conector os sinais condicionados são levados até a placa 5 para serem lidos pelo circuito conversor A/D, e estão assim distribuídos:

- tensão da fase A $\longrightarrow$ canal 1
- tensão da fase B $\longrightarrow$ canal 3
- tensão da fase C $\longrightarrow$ canal 5
- corrente da fase A $\longrightarrow$ canal 2
- corrente da fase B $\longrightarrow$ canal 4
- corrente da fase C $\longrightarrow$ canal 6

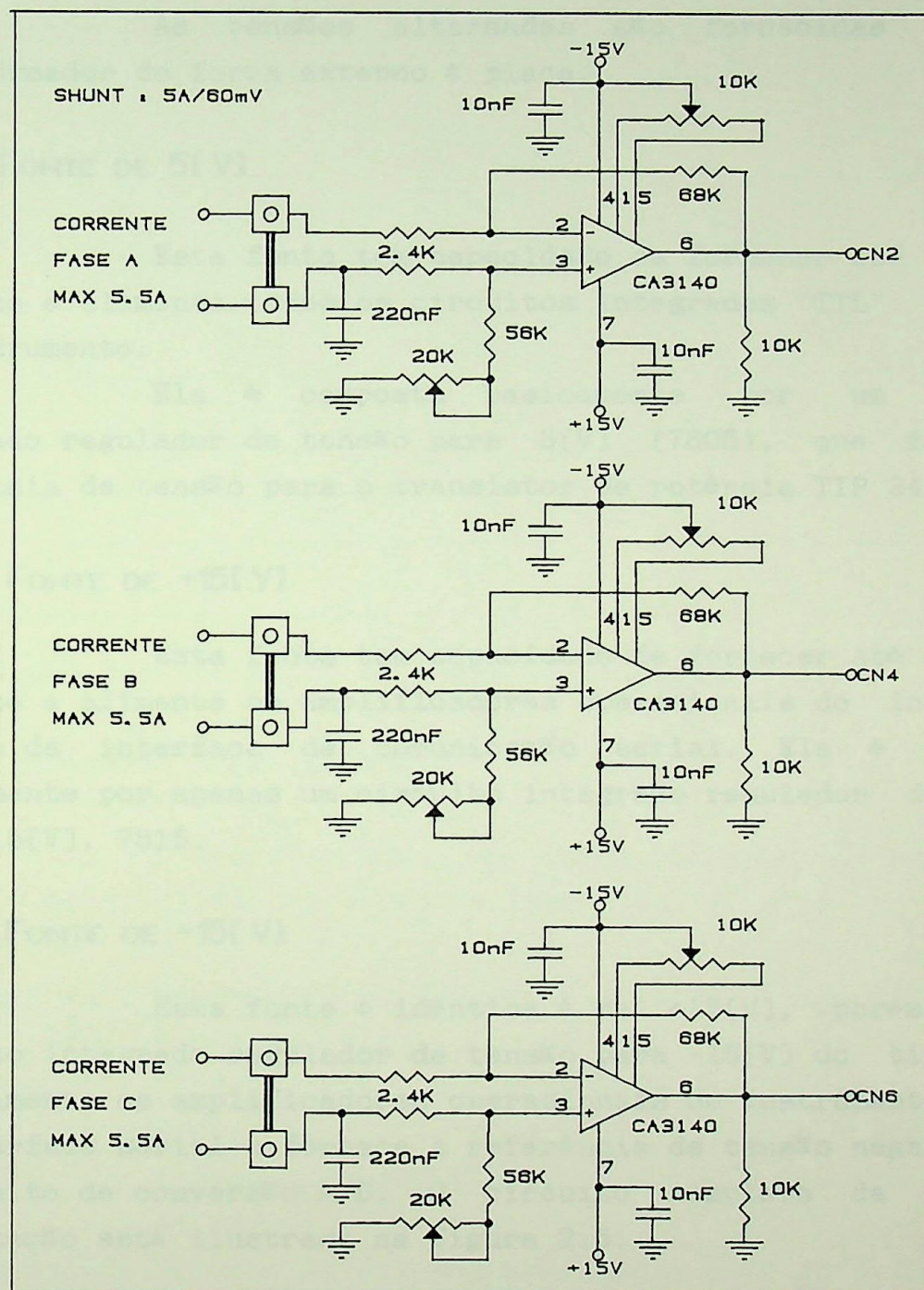


FIGURA 2.4. Circuito completo dos canais de corrente.

2.2 - PLACA 2

Nesta placa estão as fontes de alimentação de tensão contínua e três conectores para borda de placa do tipo de encaixe ("SLOT") que fazem a ligação entre as placas 3, 4 e 5.

As tensões alternadas são fornecidas por um transformador de força externo à placa.

2.2.1 - FONTE DE 5[V]

Esta fonte tem capacidade de fornecer até 3[A] de corrente e alimenta todos os circuitos integrados "TTL" e "CMOS" do instrumento.

Ela é composta basicamente por um circuito integrado regulador de tensão para 5[V] (7805), que fornece a referência de tensão para o transistor de potência TIP 34.

2.2.2 - FONTE DE +15[V]

Esta fonte tem capacidade de fornecer até 0,5[A] de corrente e alimenta os amplificadores operacionais do instrumento e parte da interface de comunicação serial. Ela é composta, basicamente por apenas um circuito integrado regulador de tensão para +15[V], 7815.

2.2.3 - FONTE DE -15[V]

Esta fonte é idêntica à de +15[V], porém usa um circuito integrado regulador de tensão para -15[V] do tipo 7915. Ela alimenta os amplificadores operacionais do instrumento, parte da interface serial e fornece a referência de tensão negativa para o circuito de conversão A/D. O circuito completo da fonte de alimentação está ilustrado na figura 2.5.

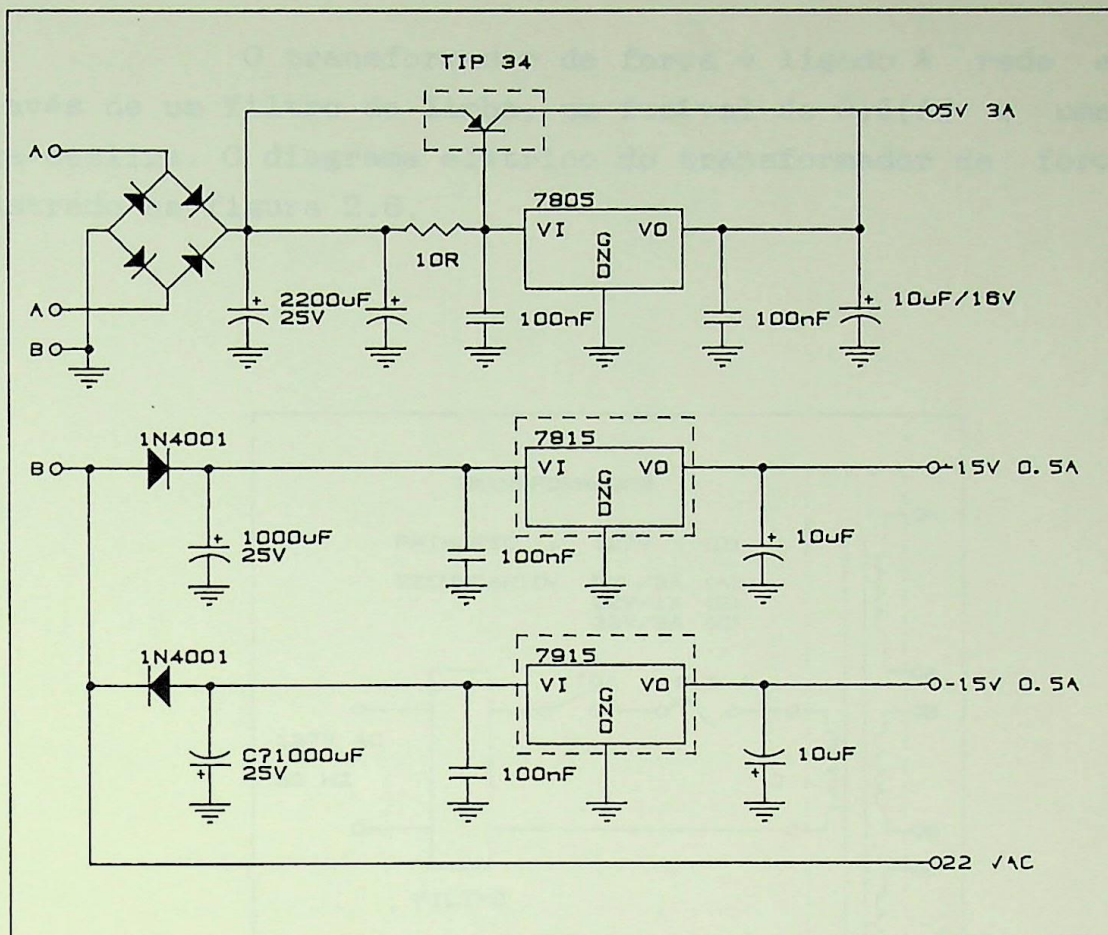


FIGURA 2.5. Circuito da fonte de alimentação.

2.2.4 - TRANSFORMADOR DE FORÇA

O transformador de força possui um enrolamento primário para 127 [V] em corrente alternada e três enrolamentos secundários:

Enrolamento A: Fornece 9 [V] com capacidade de 3[A], alimenta a fonte de +5[V]

Enrolamento B: Fornece 22 [V] com capacidade de 1[A] e alimenta as fontes de +15[V] e de -15[V]. Também é usada como referência de sincronismo para o circuito do relógio.

Enrolamento C: Fornece 22 [V] com capacidade de 3[A] e alimenta o conjunto impressor.

Enrolamento D: Enrolamento primário.

O transformador de força é ligado à rede elétrica através de um filtro de linha, um fusível de 0,5[A] e uma chave liga-desliga. O diagrama elétrico do transformador de força está ilustrado na figura 2.6.

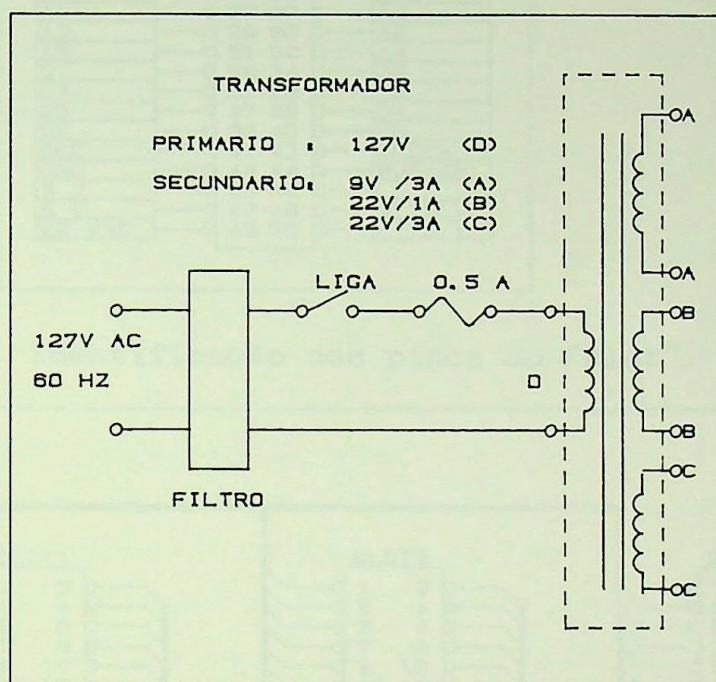


FIGURA 2.6. Ligação do transformador de força à rede elétrica.

A identificação dos pinos dos "slots" e da ligação elétrica entre eles está ilustrada nas figuras 2.7 e 2.8.

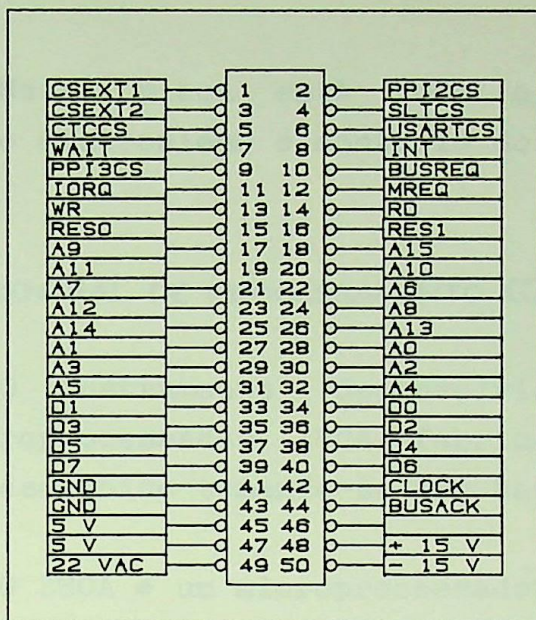


FIGURA 2.7. Identificação dos pinos do "slot".

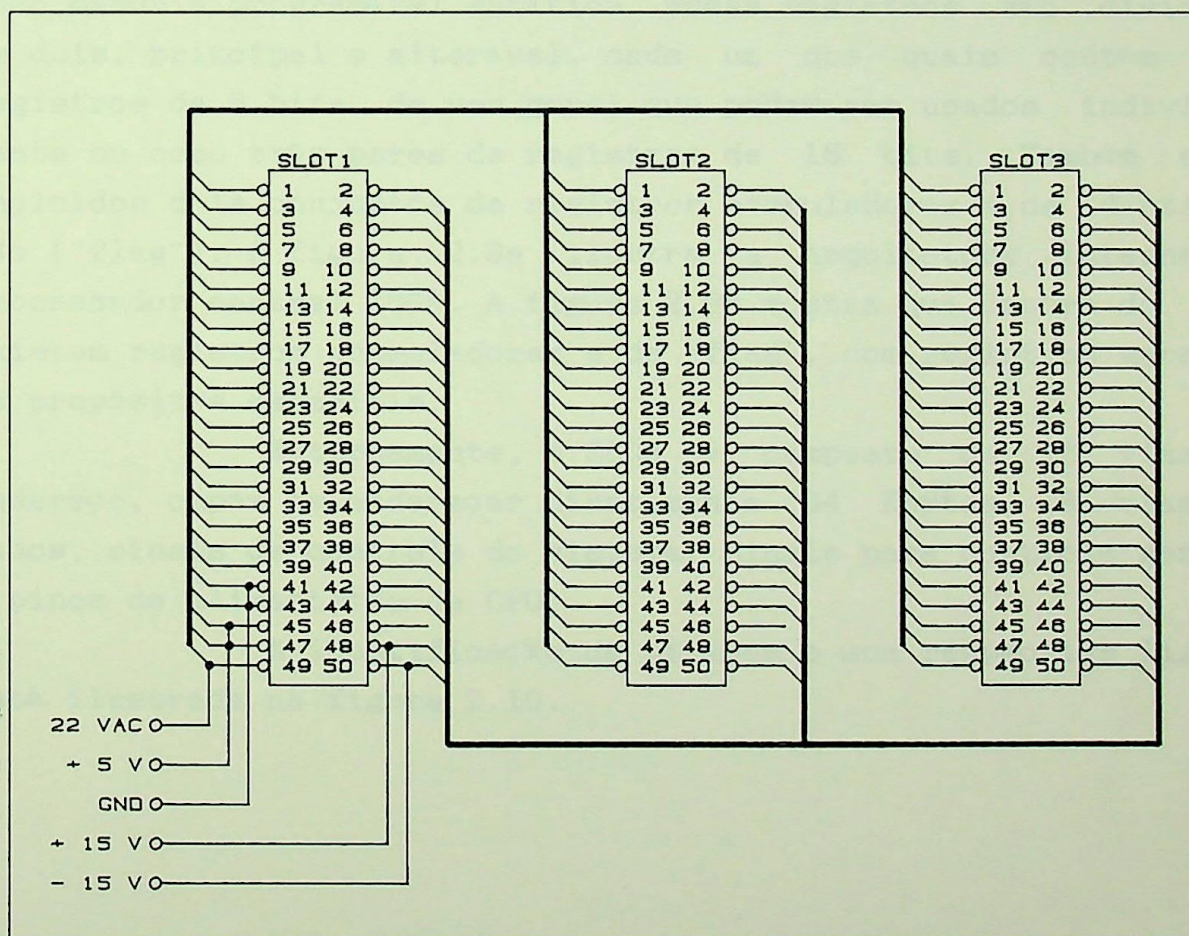


FIGURA 2.8. Diagrama da ligação elétrica entre "slots".

2.3 - PLACA 3

Nesta placa está todo o circuito controlador, responsável pelo sincronismo e controle do instrumento, dividido em:

2.3.1 - UNIDADE CENTRAL DE PROCESSAMENTO (CPU)

O instrumento desenvolvido está baseado no componente microprocessador Z80A fabricado pela Zilog. Este componente foi escolhido tomando-se por base sua eficácia e baixo custo.

O Z80A é um microprocessador de registro orientado. Dezoito registros de 8 bits e quatro de 16 bits, dentro do processador central, são acessíveis ao programador e funcionam como memória programável estática. Esses registros são divididos em dois, principal e alterável, cada um dos quais contém oito registros de 8 bits, de uso geral que podem ser usados individualmente ou como três pares de registros de 16 bits. Também estão incluídos dois conjuntos de registros acumuladores e de identificação ("flag"). A figura 2.9a ilustra a arquitetura interna do processador central Z80A. A figura 2.9b mostra que dentro do Z80A existem registros acumuladores e de "flag", com registros gerais e de propósitos especiais.

Externamente, o Z80A é composto de 16 vias de endereço, capaz de endereçar diretamente 64 Kbytes, 8 vias de dados, sinais de controle do sistema, sinais para controle gerais, e pinos de alimentação da CPU.

A identificação da pinagem e sua respectiva ligação está ilustrada na figura 2.10.

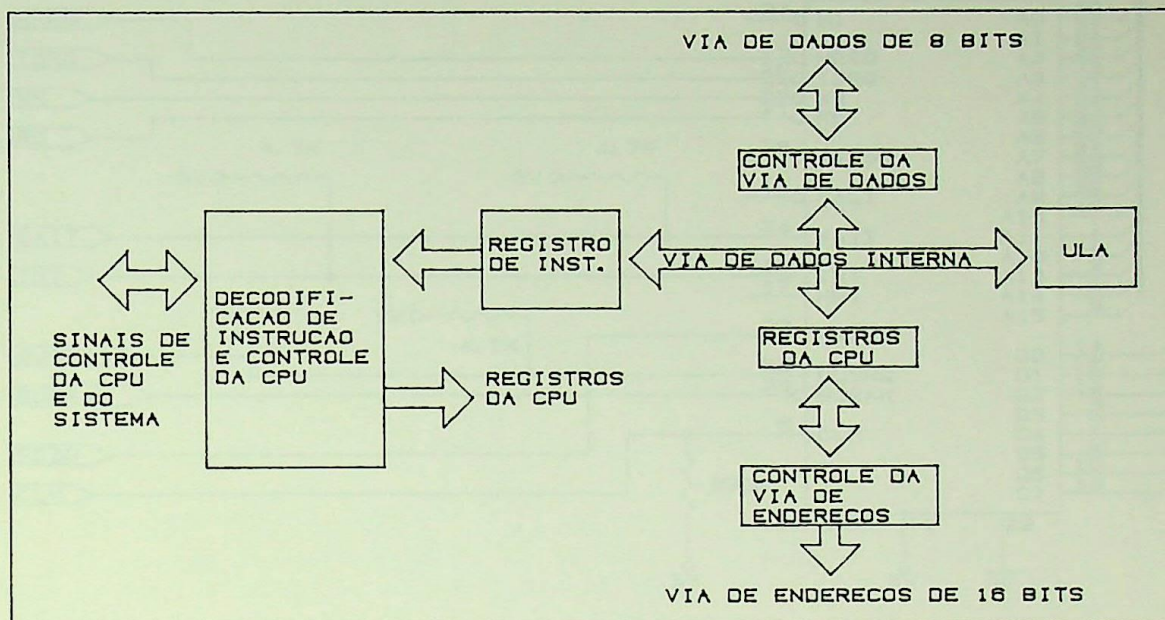


FIGURA 2.9a. Diagrama de blocos da arquitetura interna do processador central Z80A.

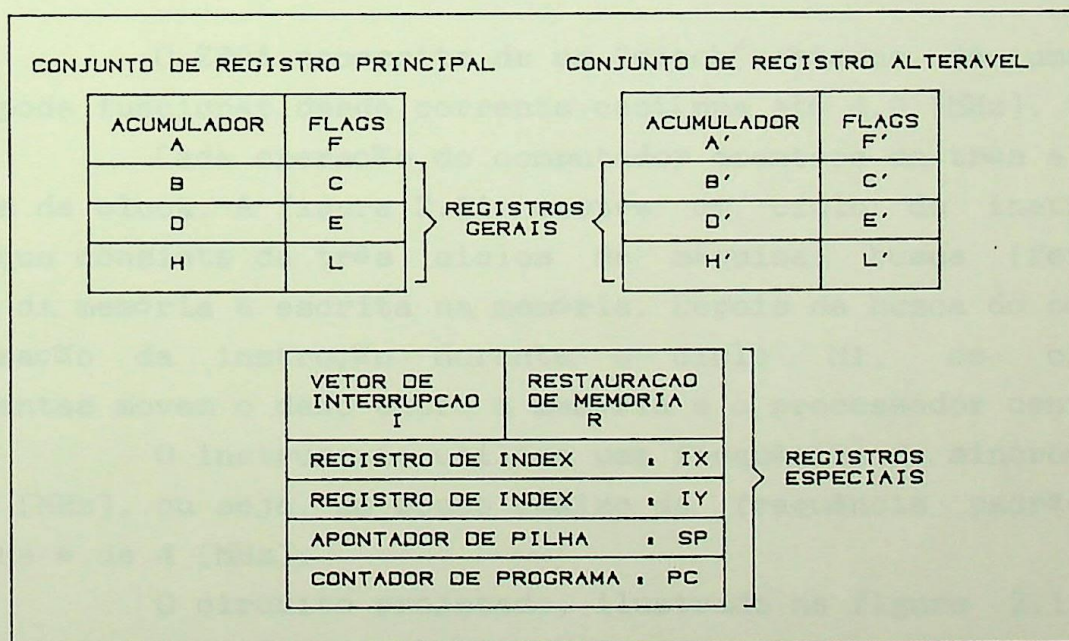


FIGURA 2.9b. Configuração de registro do processador central Z80A.

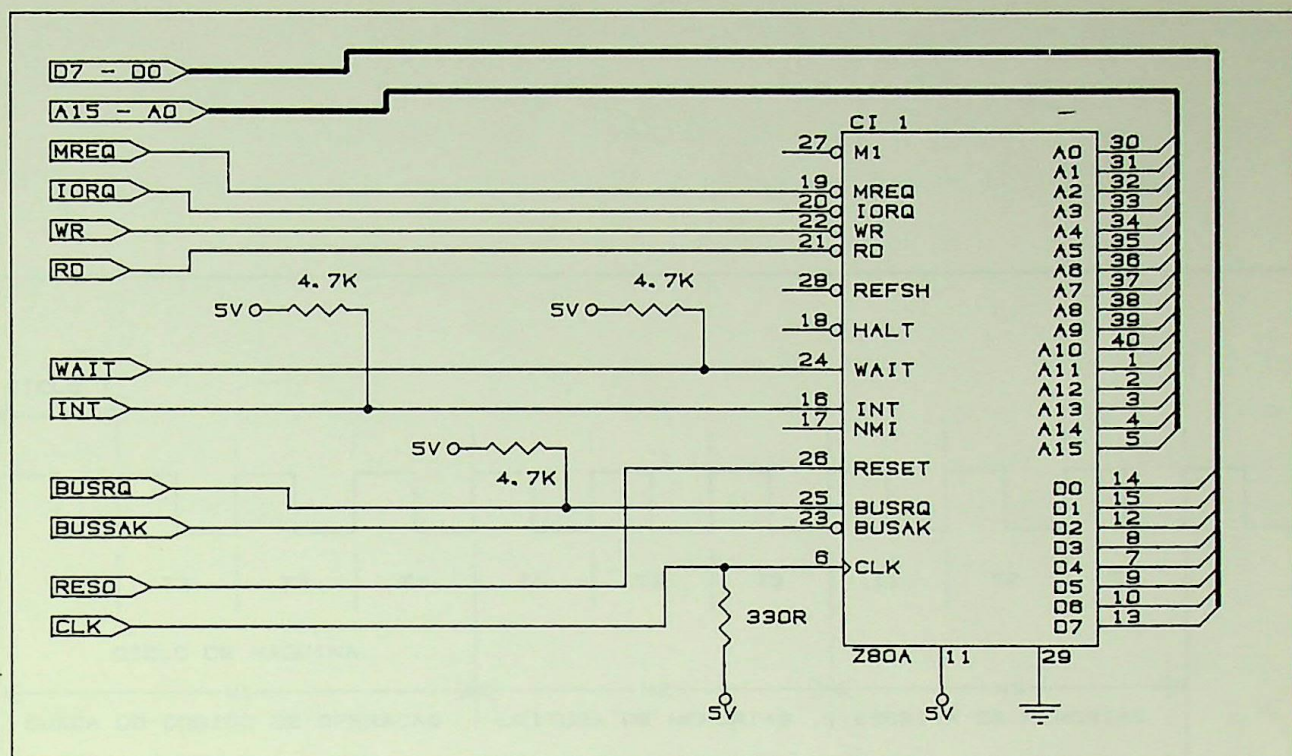


FIGURA 2.10. Configuração dos pinos para o microprocessador Z80A.

2.3.2 - GERAÇÃO DO SINCRONISMO ("CLOCK") PARA A CPU

O Z80A necessita de um "clock" externo de uma só fase e pode funcionar desde corrente contínua até 4,0 [MHz].

Cada operação do computador acontece de três a seis períodos de clock. A figura 2.11 mostra um ciclo de instrução típico que consiste de três ciclos de máquina: busca (fetch), leitura da memória e escrita na memória. Depois da busca do código de operação da instrução durante o ciclo M1, os ciclos subsequentes movem o dado entre a memória e o processador central.

O instrumento utiliza uma frequência de sincronismo de 3.58 [MHz], ou seja, um pouco abaixo da frequência padrão de Z80A, que é de 4 [MHz].

O circuito projetado, ilustrado na figura 2.12, é simplesmente um oscilador clássico a cristal, utilizando dois inversores (CI 2A e CI 2B) na geração do sinal e um terceiro (CI 2C) apenas para "quadrar" este sinal.

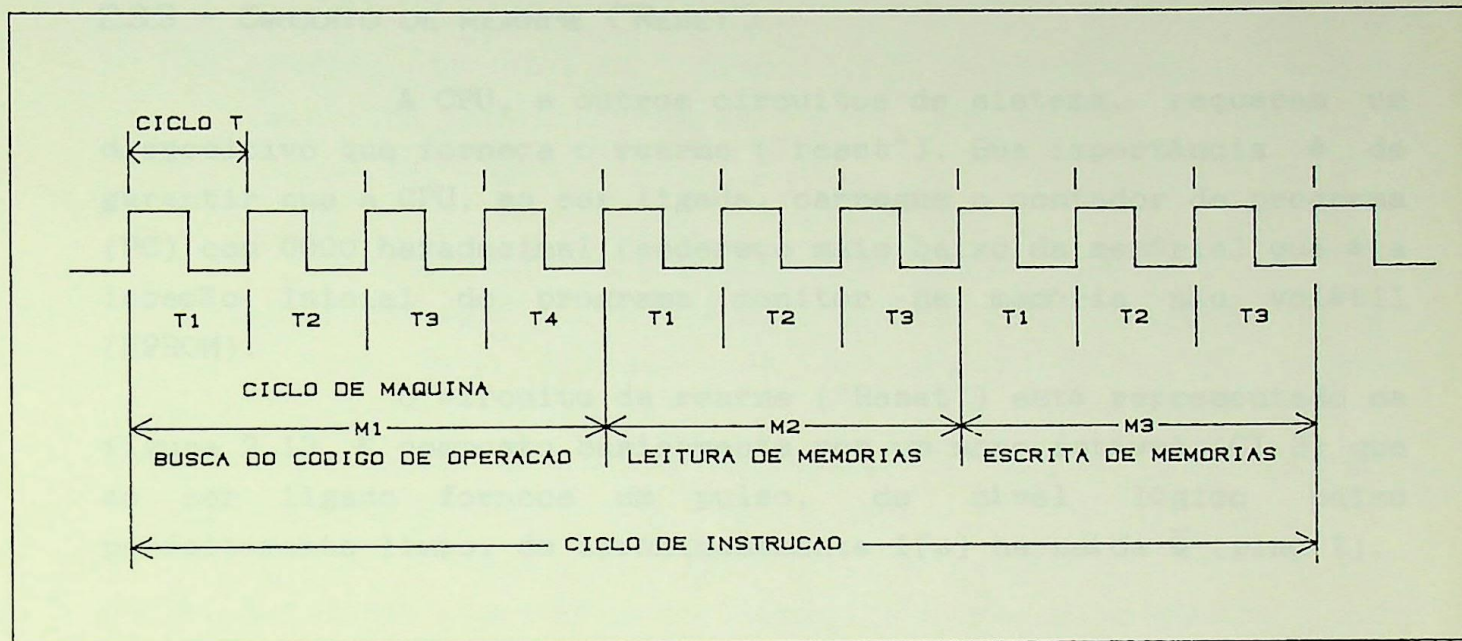


FIGURA 2.11. Ciclo de instrução típico.

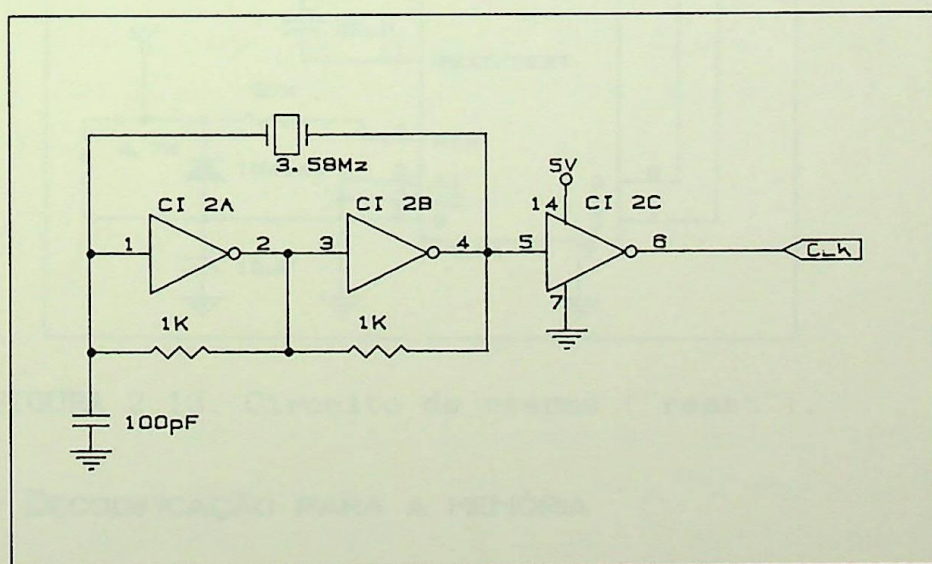


FIGURA 2.12. Circuito do oscilador a cristal.

Este sinal de "clock" serve para alimentar a CPU e o circuito conversor A/D.

Foi usado um cristal de 3.58 [MHz] por ser facilmente encontrado no comércio de componentes eletrônicos.

2.3.3 - CIRCUITO DE REARME ("RESET")

A CPU, e outros circuitos de sistema, requerem um dispositivo que forneça o rearme ("reset"). Sua importância é de garantir que a CPU, ao ser ligada, carregue o contador de programa (PC) com 0000 hexadecimal (endereço mais baixo da memória) que é a locação inicial do programa monitor na memória não volátil (EPROM).

O circuito de rearme ("Reset") está representado na figura 2.13. É composto basicamente por um mono estável (CI 3) que ao ser ligado fornece um pulso, de nível lógico baixo perfeitamente limpo, de aproximadamente 1[s] na saída $\bar{Q}$ (pino 1).

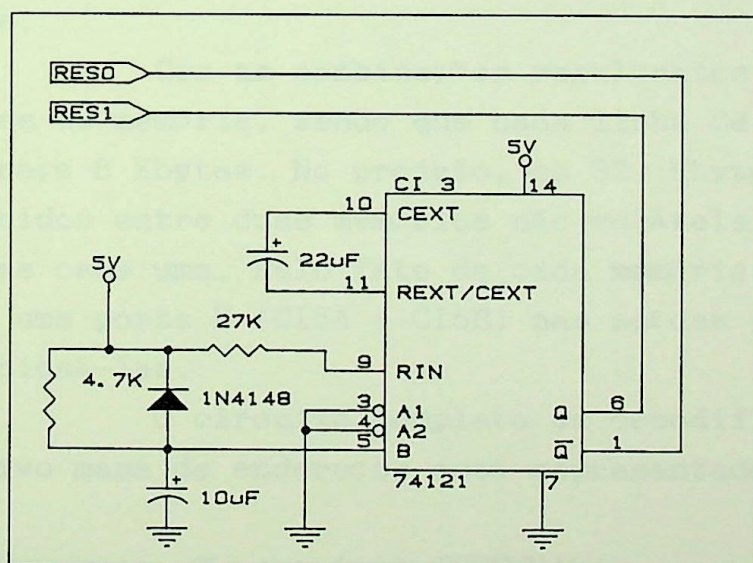


FIGURA 2.13. Circuito de rearme ("reset").

2.3.4 - DECODIFICAÇÃO PARA A MEMÓRIA

Para as operações de acesso à memória o Z80A usa 3 saídas de controle que são $\overline{MREQ}$, $\overline{RD}$ e $\overline{WR}$. As suas definições são

as seguintes:

- $\overline{MREQ}$: Pedido de memória. Sempre que ocorrer uma transação entre o processador central e a memória, a linha $\overline{MREQ}$ vai a zero
- $\overline{RD}$: Pedido de leitura. Sempre que o processador central ler dados da memória ou de uma porta de entrada, a linha de $\overline{RD}$ vai a zero.
- $\overline{WR}$: Pedido de escrita. Sempre que o processador central escrever dados na memória ou em uma porta de saída, a linha de $\overline{WR}$ vai a zero.

A decodificação necessária à seleção das memórias está ilustrada na figura 2.14. É efetuada por um demultiplexador 1 por 8 (CI4), com suas entradas de seleção A, B e C ligadas respectivamente às linhas A13, A14 e A15. A decodificação é habilitada quando os pinos de controle G2A e G2B, ligados respectivamente à $\overline{MREQ}$ e SLTCS vão a zero.

A linha SLTCS faz a seleção da página da memória. Só foi utilizada nos testes de desenvolvimento de hardware e do software.

Com as combinações resultantes é possível endereçar 64 Kbytes de memória, sendo que cada linha de saída de y0 a y7 (CI 4) endereça 8 Kbytes. No projeto, os 32 Kbytes inferiores foram distribuídos entre duas memórias não voláteis do tipo (EPROM) de 16 Kbytes cada uma. Pelo fato de cada memória ser de 16 Kbytes usou-se uma porta E (CI5A e CI5B) nas saídas y0-y1 e y2-y3 a fim de selecioná-las.

O circuito completo de decodificação de memória e o respectivo mapa de endereços está representado na figura 2.14.

2.3.5 - MEMÓRIAS NÃO VOLÁTEIS (EPROM)

As "EPROMS" são memórias não voláteis que podem ser programadas de acordo com a necessidade do usuário, por meio de um processo especial. Para se apagar uma EPROM necessita-se de luz ultra violeta, sob a qual, coloca-se a memória durante um período de 20 a 40 minutos.

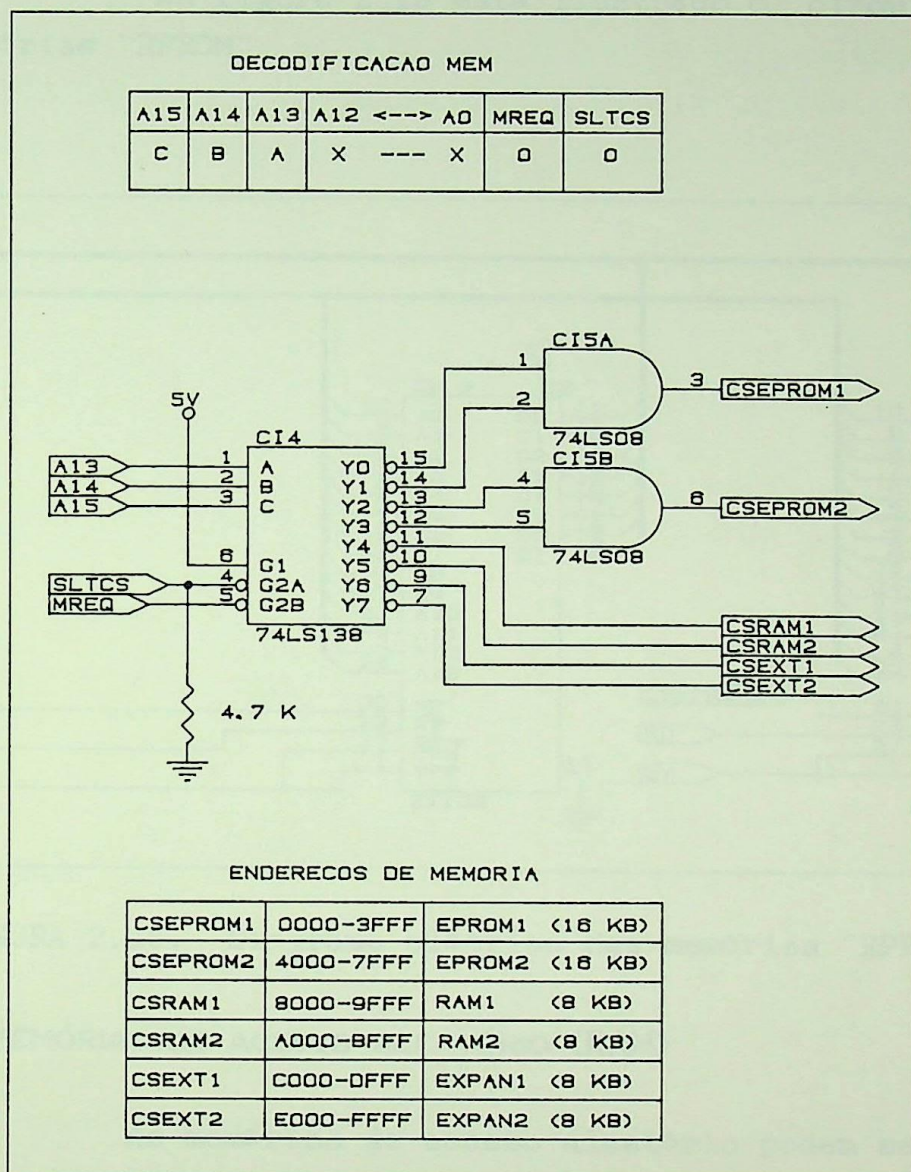


FIGURA 2.14. Circuito de decodificação de memória.

No instrumento foram usadas duas memórias do tipo EPROM (27128), de 16 Kbytes cada uma, nas quais foi gravado o programa monitor que controle todo o instrumento.

Para se programar este tipo de memória necessita-se conectar ao pino VPP uma tensão de 21 [V] sendo que o endereço da

locação a ser gravada é aplicado no barramento de endereços (A0 a A13), o dado a ser gravado é aplicado no barramento de dados (D0 a D7). Por último, é aplicado um pulso negativo, de 50[ms] de duração, no pino $\overline{\text{PGM}}$.

Na figura 2.15 está ilustrado o circuito completo das memórias "EPROM".

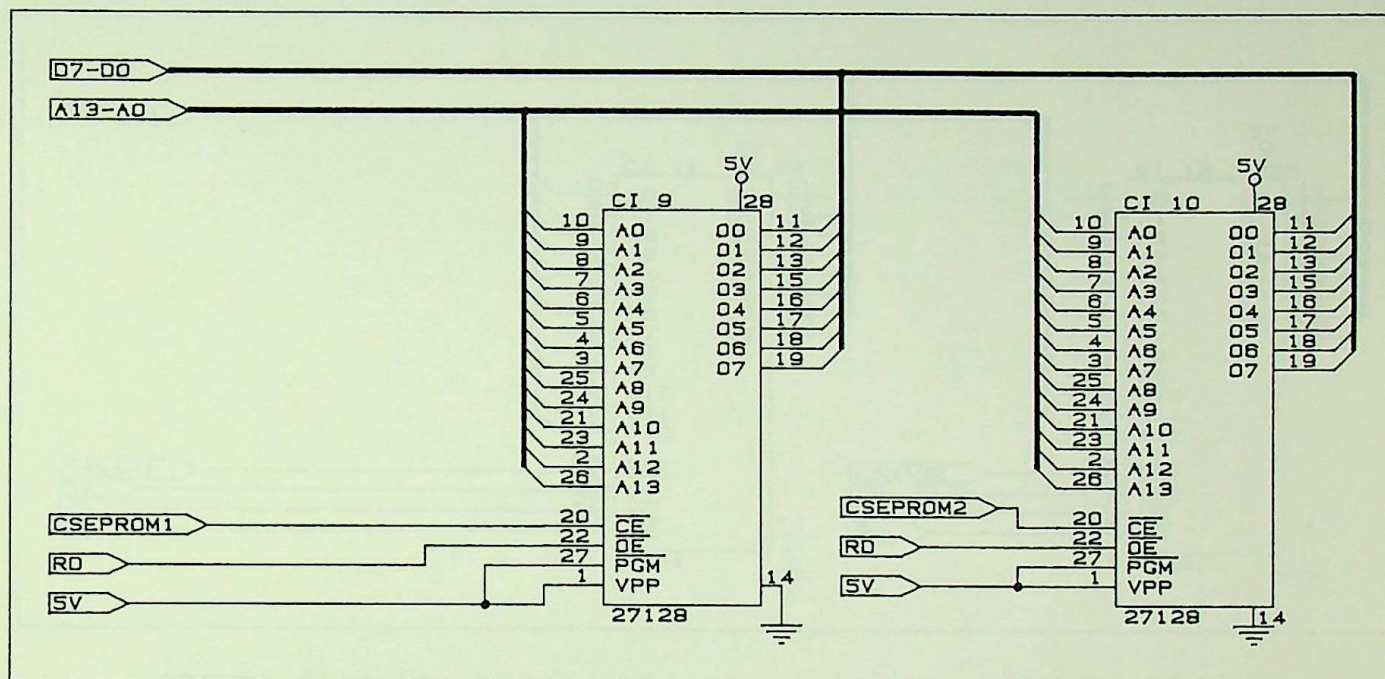


FIGURA 2.15. Diagrama elétrico das memórias "EPROM".

2.3.6 - MEMÓRIAS DE ACESSO ALEATÓRIO (RAM)

As memórias de acesso aleatório podem ser lidas ou gravadas através de sinais apropriados. São memórias "voláteis", ou seja, perdem as informações gravadas quando a sua alimentação é desligada.

No instrumento foram usadas duas memórias "RAM" estáticas, de 8 Kbytes cada uma (6264). A função destas memórias é de armazenar os dados de entrada, intermediários e de saída nos diversos cálculos efetuados pelo software desenvolvido. Na figura 2.16 está ilustrado o circuito completo das memórias "RAM".

2.3.7 - DECODIFICAÇÃO PARA ENTRADA E SAÍDA (I/O)

Para as operações de acesso às portas de entrada e saída o Z80A usa a combinação das linhas $\overline{\text{IORQ}}$, $\overline{\text{WR}}$ e $\overline{\text{RD}}$ de modo a identificar se é operação de escrita ou leitura em um periférico.

Quando o Z80A faz um pedido de escrita as linhas $\overline{\text{IORQ}}$ e $\overline{\text{WR}}$ vão a zero sinalizando-o. Para um pedido de leitura o procedimento é idêntico porém, com as linhas $\overline{\text{IORQ}}$ e $\overline{\text{RD}}$.

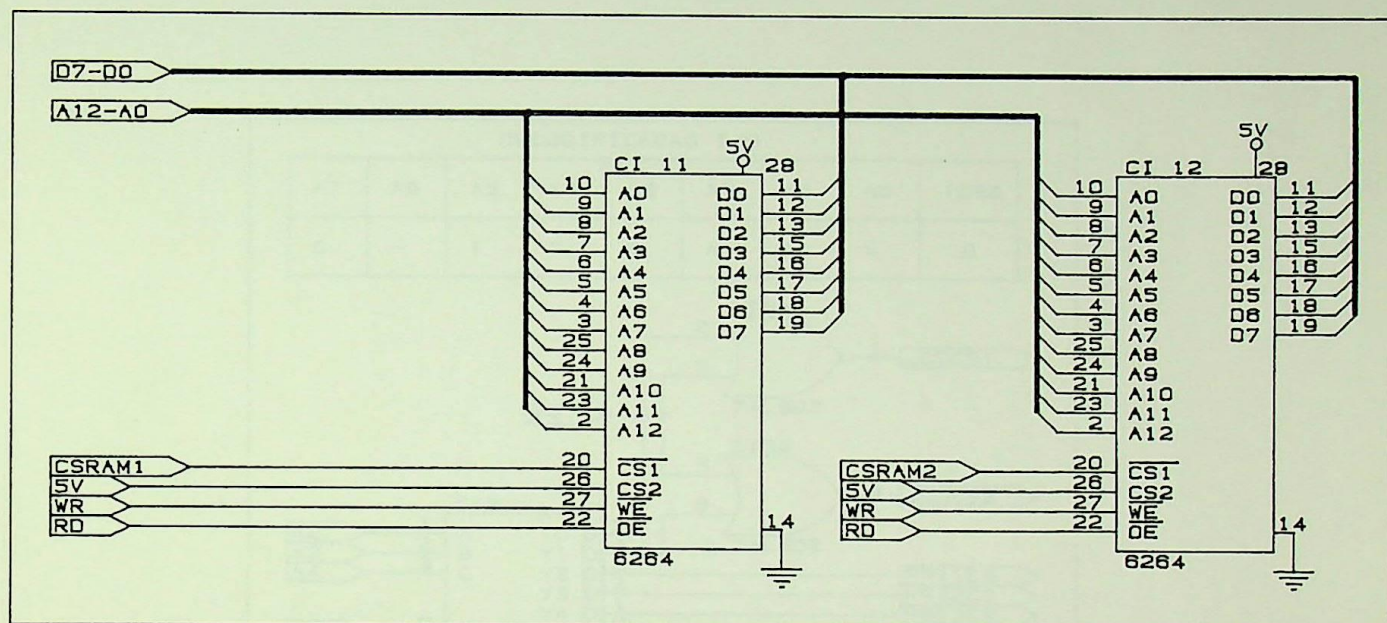


FIGURA 2.16. Diagrama elétrico das memórias "RAM".

A decodificação das portas de entrada e saída está ilustrada na figura 2.17. É efetuada por um demultiplexador 1 por 8 (CI 8) com as suas entradas de seleção A, B e C ligadas respectivamente às linhas A2, A3 e A4. As entradas de habilitação G1, G2A e G2B estão ligadas respectivamente às linhas A5, A7 e $\overline{\text{IORQ}}$.

As linhas de saída decodificadas tanto podem ser de escrita como de leitura, e devem ser combinadas com as linhas $\overline{\text{WR}}$ ou $\overline{\text{RD}}$.

O mapa de endereços decodificados e os respectivos periféricos está ilustrado também na figura 2.17.

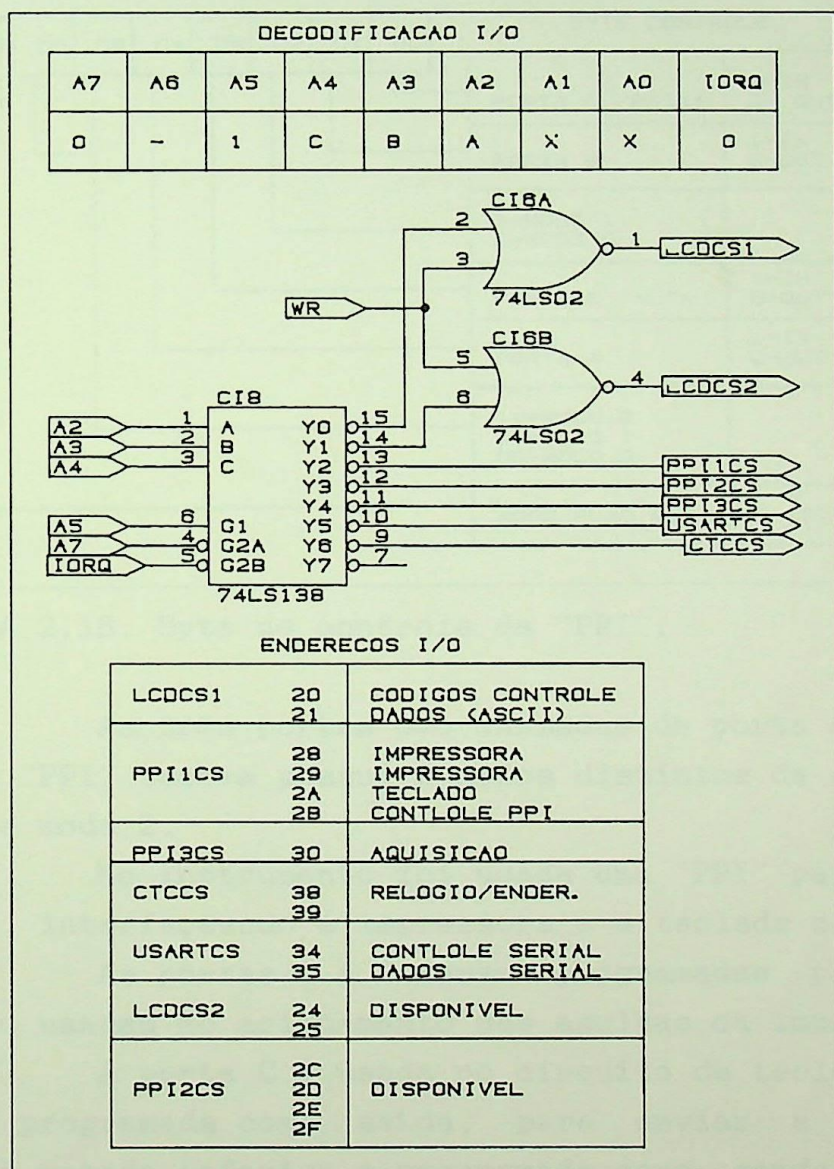


FIGURA 2.17. Decodificação de (I/O).

2.3.8 - INTERFACE PROGRAMÁVEL DE PERIFÉRICO (PPI)

A "PPI" é um dispositivo que possui três portas de 8 bits cada, que podem ser programadas como entrada ou saída.

Antes de se utilizar a "PPI", para transferência de dados, deve-se definir quais portas serão usadas como entrada e quais serão usadas como saída. Tal operação é denominada inicialização da "PPI" e consiste em se escrever um byte de controle, montado conforme ilustrado na figura 2.18, no endereço de controle da "PPI".

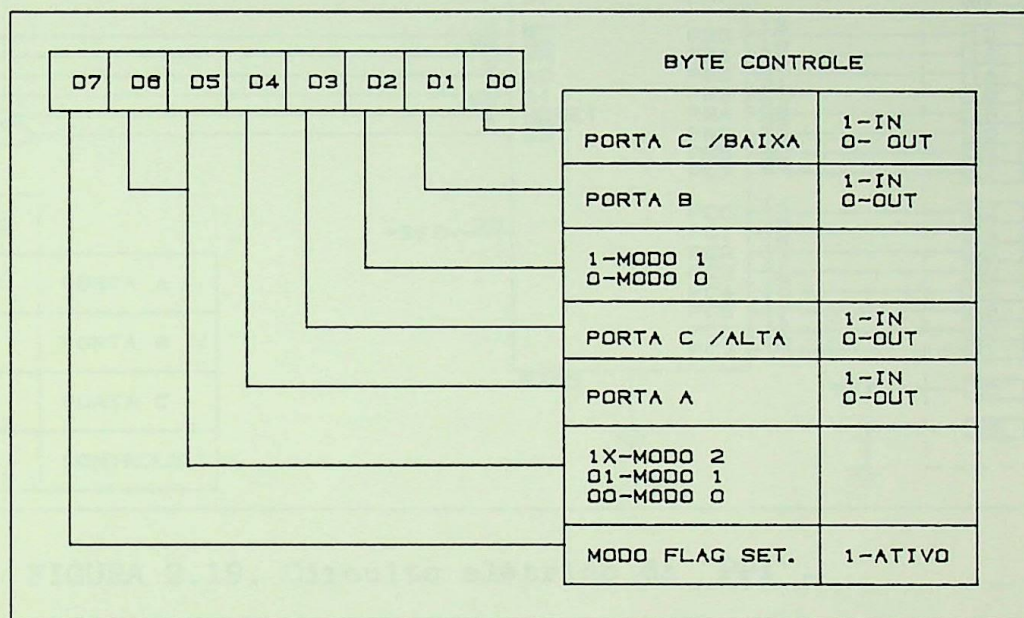


FIGURA 2.18. Byte de controle da "PPI".

As três portas são chamadas de porta A, porta B e porta C. A "PPI" também possui 3 modos distintos de operação, modo 0, modo 1 e modo 2.

No instrumento foi usada uma "PPI" para simplificar o hardware, interfaceando a impressora e o teclado com a CPU.

As portas A e B foram programadas para serem de saída e são usadas no acionamento das agulhas da impressora.

A porta C é usada no circuito do teclado. A metade superior é programada como saída, para enviar a varredura ao teclado e a metade inferior é programada como sendo de entrada, para ler o estado do teclado.

Na figura 2.19 está ilustrado o circuito elétrico da "PPI". A placa controladora é encaixada no "slot" número 3 da placa 2.

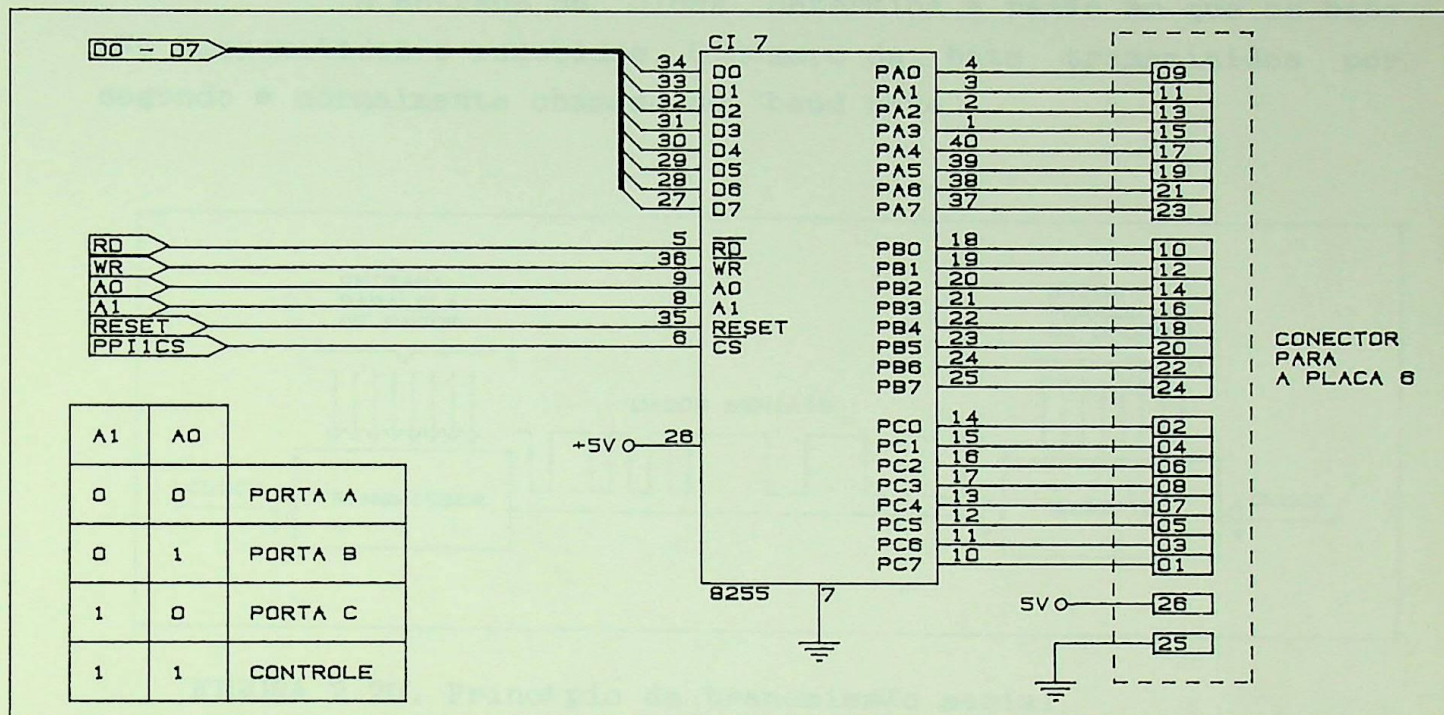


FIGURA 2.19. Circuito elétrico da "PPI".

2.4 - PLACA 4

Nesta placa estão montados os circuitos de comunicação serial, relógio e memória "EPROM" de calibração.

2.4.1 - CIRCUITO DE COMUNICAÇÃO SERIAL

O interfaceamento serial é usado para a transferência de dados a um bit por vez. É usado na comunicação do instrumento com um computador.

A transmissão serial de dados tem a vantagem de utilizar menos linhas de conexão que a transmissão paralela; somente um par de fios é requerido para a entrada e outro para a saída.

A transmissão serial requer que a palavra paralela seja convertida em serial, tarefa que é feita através de hardware, utilizando-se um circuito integrado desenvolvido especialmente para esse fim. Uma operação de transmissão típica está representada na figura 2.20.

A entrada de "clock" determina a razão em que os bits são transmitidos e recebidos. O número de bits transmitidos por segundo é normalmente chamado de "baud rate"

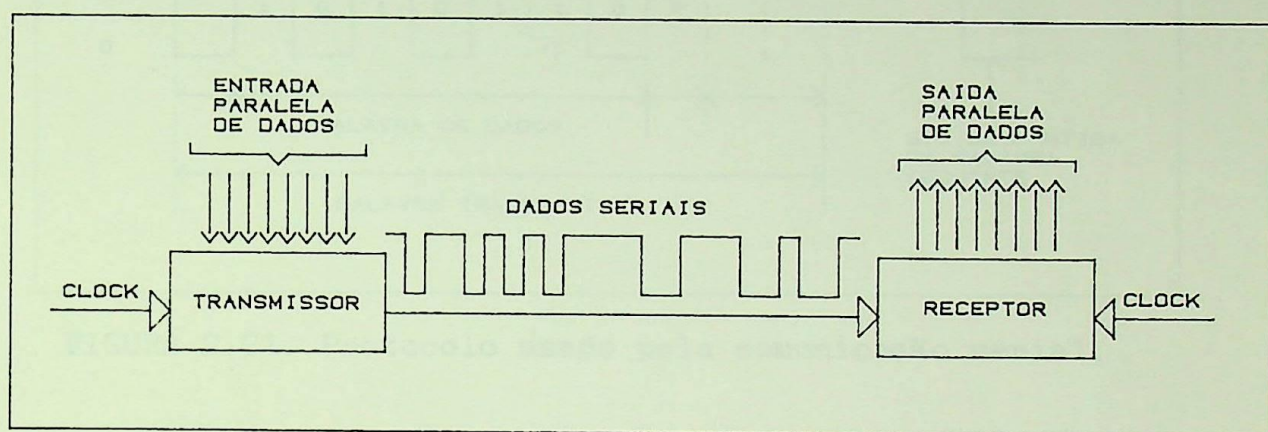


FIGURA 2.20. Princípio da transmissão serial.

O protocolo deve ser padronizado, para que o aparelho receptor possa reconhecer o início e fim da palavra serial. A palavra começa com o bit de partida (0), continua com os bits de dados e o bit opcional de paridade, termina com um ou dois bits de parada (1), como ilustrado na figura 2.21.

O circuito implementado para a comunicação serial está ilustrado na figura 2.22. O componente principal desta interface é um "USART" (Universal Synchronous Assynchronous Receiver Transmitter) do tipo 8251 (CI 9), configurado para trabalhar em modo assíncrono.

A velocidade de transmissão e recepção, bem como a temporização do "USART" é dada pelo gerador de "Baud-rate", constituído por um oscilador a cristal e divisores binários, sendo possível escolher-se velocidades de comunicação entre 75 a 9600 "Bauds", por meio de teclas ("straps") montadas na placa.

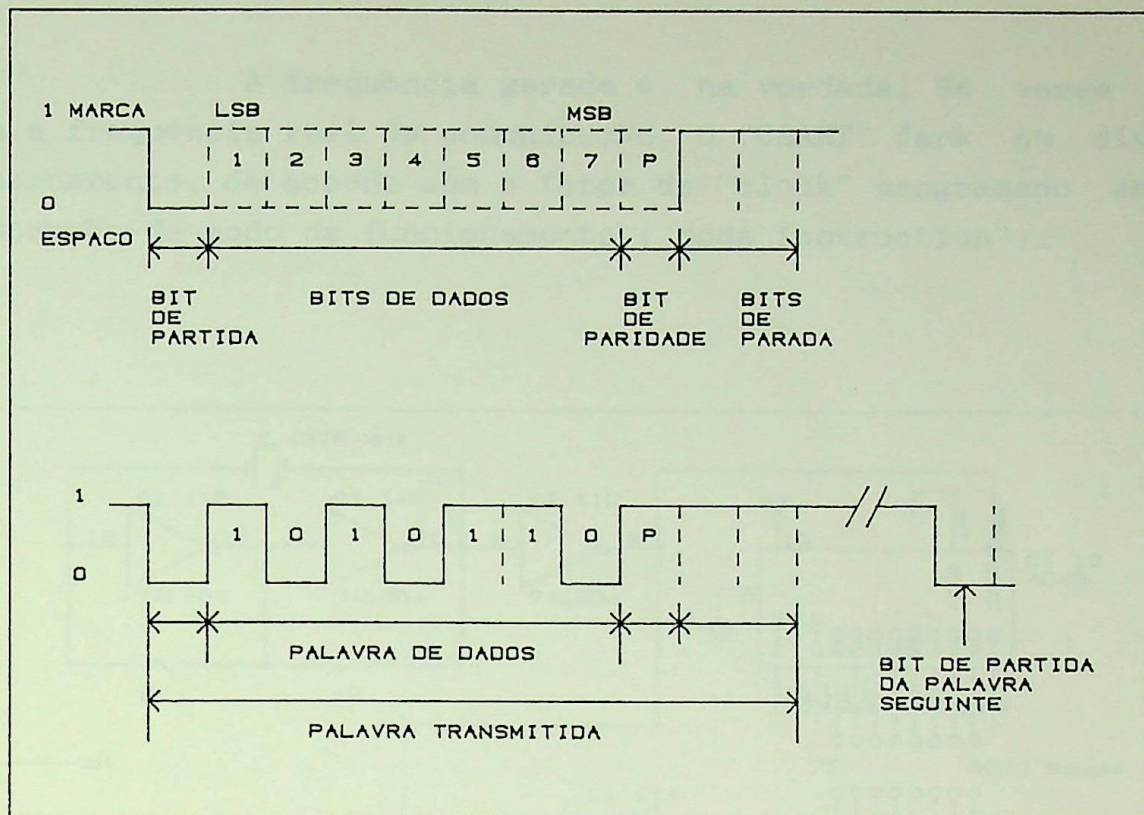


FIGURA 2.21. Protocolo usado pela comunicação serial.

A adaptação dos níveis TTL do "USART" aos níveis "RS-232C" é executada pelos adaptadores de linha, implementados para esta função apenas por um transistor e um amplificador operacional.

O gerador de "Baud-rate" utiliza um cristal de 2.4576 [MHz] que facilita a obtenção das frequências de transmissão/recepção. A frequência gerada pelo oscilador é entregue ao "USART" para suas temporizações internas e é aplicada também ao CI 10 (4040), um contador binário de 12 estágios, que entrega diretamente em suas saídas (Q_1 a Q_9) as frequências necessárias para as velocidades de 150 a 9600 "Bauds".

Através de um "strap", seleciona-se a velocidade desejada, aplicando-a às entradas de "clock" de transmissão e recepção do USART.

A frequência gerada é, na verdade, 64 vezes maior que a frequência real de comunicação. O "USART" fará as divisões internamente, de acordo com o fator de "clock" programado em sua instrução de modo de funcionamento ("Mode Instruction").

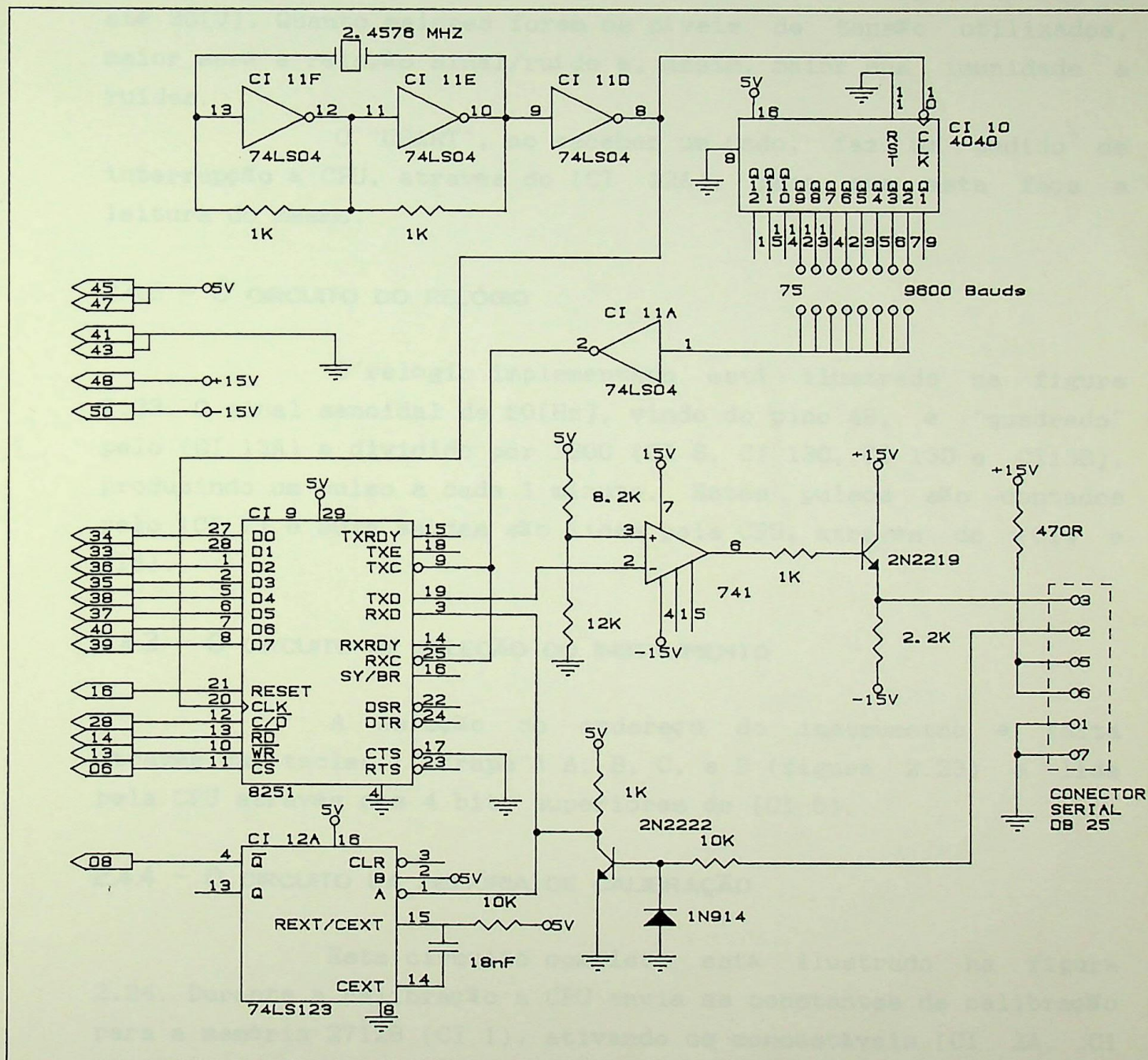


FIGURA 2.22. Diagrama elétrico implementado da comunicação serial.

2.4.1.1 - PADRÃO RS-232C

Este padrão de interface foi definido pela EIA ("Electronic Industrial Association"). Utiliza um conector de 25 pinos tipo DB25. O padrão define o estado binário 1 como uma tensão entre -3[V] e -15[V]. O estado 0 deve estar na faixa de +3[V] a +15[V]. Desta maneira, a variação de tensão pode ir de 6 até 30[V]. Quanto maiores forem os níveis de tensão utilizados, maior será a relação sinal/ruído e, assim, maior sua imunidade a ruídos.

O "USART", ao receber um dado, faz um pedido de interrupção à CPU, através do (CI 12A), para que esta faça a leitura do mesmo.

2.4.2 - O CIRCUITO DO RELÓGIO

O relógio implementado está ilustrado na figura 2.23. O sinal senoidal de 60[Hz], vindo do pino 49, é "quadrado" pelo (CI 13A) e dividido por 3600 (CI 6, CI 13C, CI 13D e CI13B), produzindo um pulso a cada 1 minuto. Estes pulsos são contados pelo (CI 7) e suas saídas são lidas pela CPU, através do (CI4 e CI5).

2.4.3 - O CIRCUITO DE SELEÇÃO DO INSTRUMENTO

A seleção do endereço do instrumentno é feita através das teclas ("straps") A, B, C, e D (figura 2.23) e lida pela CPU através dos 4 bits superiores do (CI 5).

2.4.4 - O CIRCUITO DA MEMÓRIA DE CALIBRAÇÃO

Este circuito completo está ilustrado na figura 2.24. Durante a calibração a CPU envia as constantes de calibração para a memória 27128 (CI 1), ativando os monoestáveis (CI 2A, CI 2B, CI 3A e CI3B).

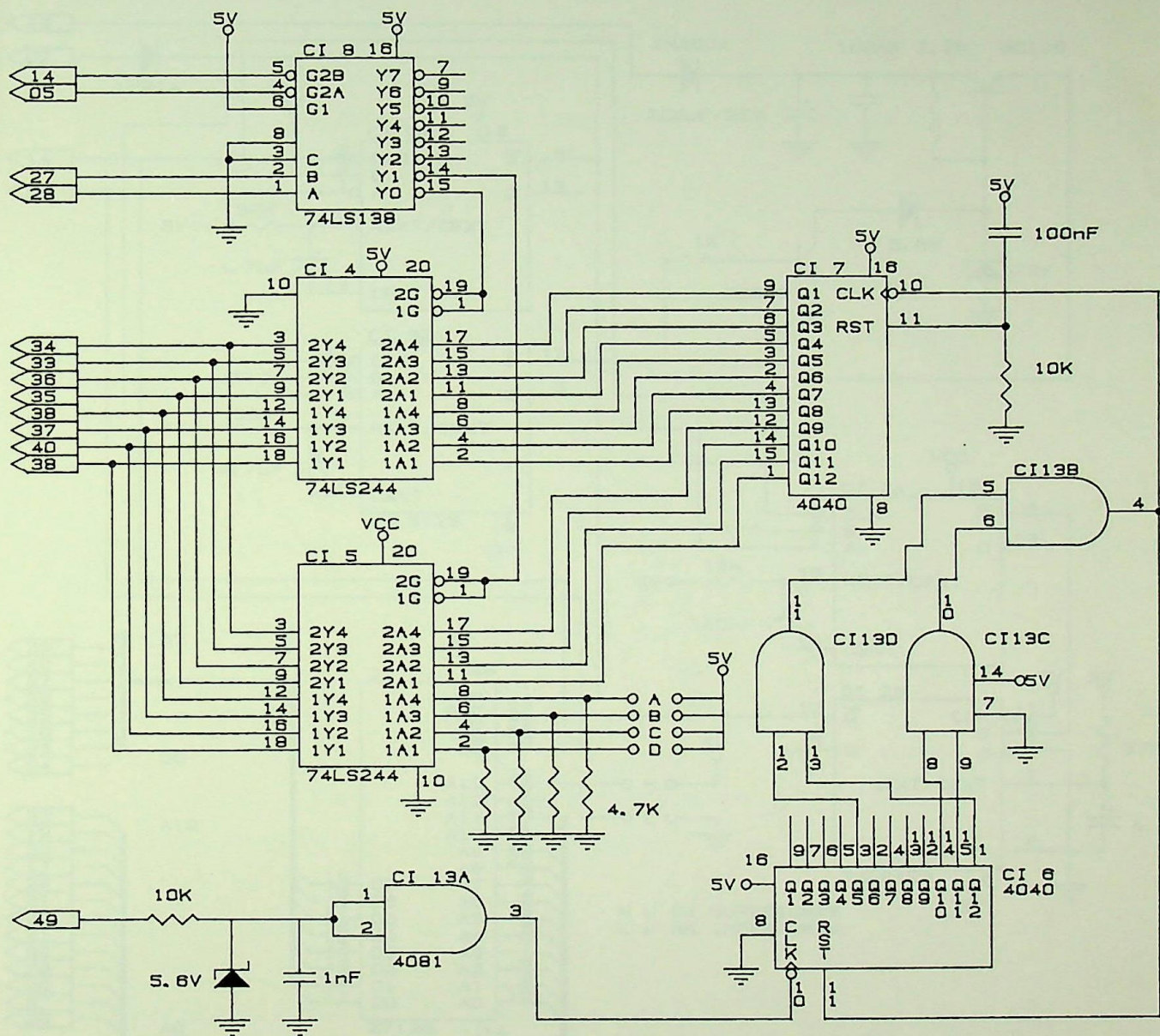


FIGURA 2.23. Diagrama elétrico do circuito do relógio.

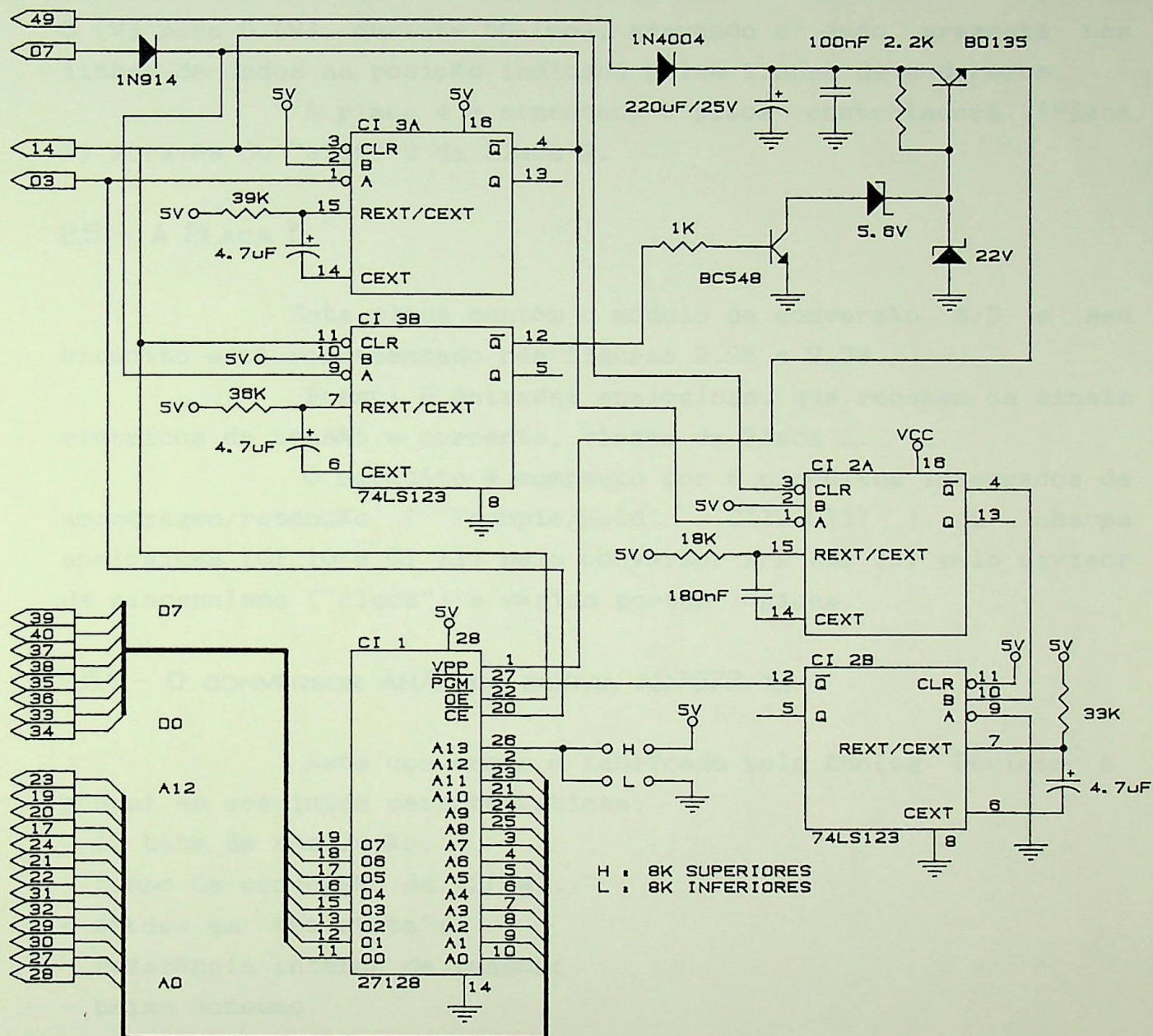


FIGURA 2.24. Diagrama elétrico do circuito da memória de calibração.

O circuito integrado monoestável (CI 3A) faz com que a linha de espera ("WAIT") da CPU fique ativa por 50[ms], congelando as suas linhas de endereços e de dados, o monoestável (CI 3B) comuta a tensão do pino "Vpp" de 5 [V] para 21 [V], os monoestáveis (CI 2A e CI 2B) fazem com que a linha "PGM" comute de 5 [V] para 0 [V], durante 50 [ms], gravando o dado presente nas linhas de dados na posição indicada pelas linhas de endereços.

A placa 4 é conectada à placa controladora (Placa 3) através do "slot" 2 da Placa 2.

2.5 - A PLACA 5

Esta placa contém o módulo de conversão A/D e seu circuito está representado nas figuras 2.25 e 2.26.

Possui 6 entradas analógicas, que recebem os sinais elétricos de tensão e corrente, vindos da Placa 1.

O circuito é composto por 6 circuitos integrados de amostragem/retenção ("sample/Hold" CI12-CI17), 6 chaves analógicas (CI 10 e CI 11) pelo conversor A/D (CI 7), pelo divisor de sincronismo ("clock") e várias portas lógicas.

2.5.1 - O CONVERSOR ANALÓGICO DIGITAL AD7572/12

Este conversor é fabricado pela Analog Devices e possui as seguintes características:

- 12 bits de resolução;
- tempo de conversão de 12[μs];
- saídas em "tri-state";
- referência interna de tensão;
- baixo consumo.

Este conversor de 12 bits é ideal para fazer o interfaceamento com CPU de 8 bits, porque permite que os 12 bits convertidos sejam lidos em duas vezes. Através do controle do pino "HBEN". Primeiro são lidos os 8 bits inferiores e depois os 4 bits superiores.

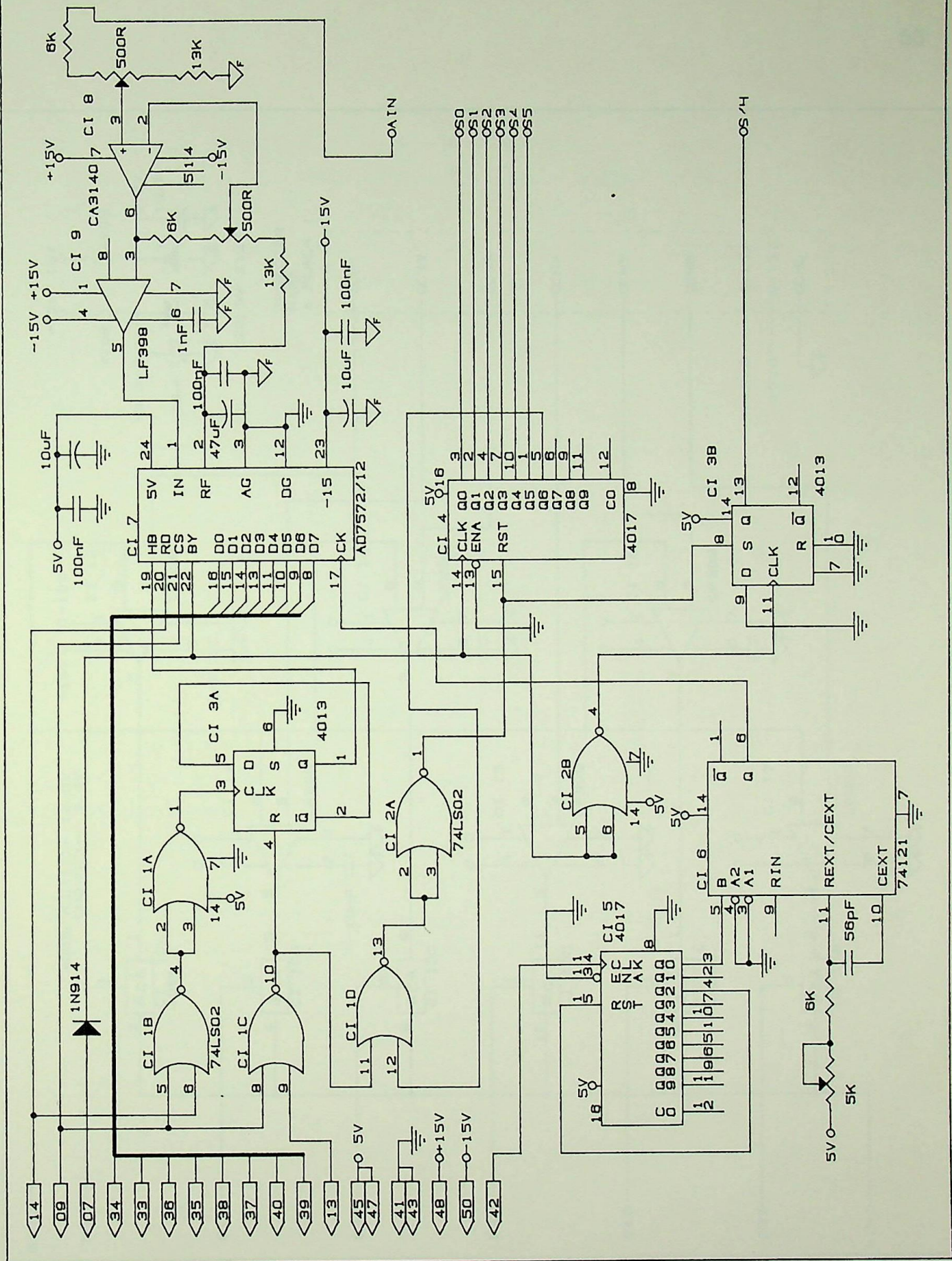


FIGURA 2.25. Circuito de conversão analógico digital.

Os outros pinos de controle são: $\overline{RD}$, $\overline{CS}$ e $\overline{BUSY}$. O pino $\overline{BUSY}$ é de saída e sinaliza o fim da conversão. Para iniciar a conversão os pinos HBEN, $\overline{RD}$ e $\overline{CS}$ devem mudar para nível lógico baixo. Iniciada a conversão, o pino $\overline{BUSY}$ muda para nível lógico baixo e assim permanece durante a conversão. Quando a conversão termina, o pino $\overline{BUSY}$ retorna ao nível lógico alto, e os 8 bits inferiores estão disponíveis nas saídas D0 - D7, para serem lidos pela CPU.

Para ler os 4 bits superiores deve-se mudar o pino HBEN para nível lógico alto, porém com os pinos $\overline{RD}$ e $\overline{CS}$ em nível lógico baixo. Desta forma, os 4 bits superiores ficam disponíveis nas saídas D0 - D4. Nesta segunda operação o pino $\overline{BUSY}$ permanece em nível lógico alto, porque não houve conversão, apenas um chaveamento interno para colocar os 4 bits superiores no barramento.

2.5.2 - FUNCIONAMENTO DO CIRCUITO

Para se conseguir amostrar 128 pontos por ciclo em 6 canais, simultaneamente (total de 768 pontos), foi necessário forçar o conversor A/D a operar com tempo de conversão de, aproximadamente, 10 μs e implementar, através do "hardware", toda a lógica de seleção dos canais e de amostragem e retenção, de tal forma que na parte de programação "software" apenas é necessário enviar um comando de rearme ("reset") e fazer 1536 leituras seguidas (duas leituras para cada dado convertido).

O comando inicial de rearme "reset" faz com que:

- 1 - o pino HBEN do conversor vai a zero através do (CI 1C) e (CI 3A).
- 2 - A chave analógica S0 (CI 10A) é selecionada através do contador (CI 4) e dos (CI 1C), (CI 1D), e (CI 2A).
- 3 - Os 6 circuitos de entrada de amostragem e retenção, são comutados para "Sample" através do (CI 3B), (CI 1C), (CI 1D) e (CI 2A).

Nesta condição, o canal 1 (tensão na fase A) está

conectado ao conversor A/D através do (CI12) e da chave analógica (CI 10A).

Em seguida, são feitas 12 leituras na porta do conversor A/D fazendo com que:

1^a leitura: O pino HBEN está em nível lógico zero. Os pinos $\overline{RD}$ e $\overline{CS}$ vão ao nível lógico zero. Com esta condição o conversor A/D inicia o ciclo de conversão comutando o pino $\overline{BUSY}$ para zero. No instante que o pino $\overline{BUSY}$ vai para zero todos os "Sample/Hold" (CI 12 - CI 17) são comutados para "Hold" através do CI 3B e CI 2B, e assim permanecerão até que ocorra um novo "reset". Como a linha $\overline{WAIT}$ da CPU também está conectada ao pino $\overline{BUSY}$, esta fica parada aguardando o fim da conversão. Ao fim da conversão a linha $\overline{BUSY}$ retorna ao nível lógico alto, incrementando o contador (CI 4), e liberando a CPU para fazer a leitura do dado convertido que são os 8 bits inferiores do canal 1. Ao fim da 1^a leitura o pino HBEN, através do (CI 3A), (CI 1A) e (CI 1B) vai para o nível lógico alto.

2^a leitura: O pino HBEN está em nível lógico alto. Os pinos $\overline{RD}$ e $\overline{RD}$ vão ao nível lógico zero. Com esta condição os 4 bits superiores da conversão anterior são lidos. A linha $\overline{BUSY}$ permanece em nível lógico alto, ao fim da leitura o pino HBEN vai de nível lógico zero.

3^a leitura: Como no fim da 1^a leitura o contador (CI 4) foi incrementado, agora é o canal 2 (corrente na fase A) que está conectado ao conversor A/D através do (CI 13) e da chave analógica (CI 10B).

O pino HBEN está novamente em nível lógico zero. O resto do procedimento é igual à 1^a leitura.

Ao final da 1^a leitura o contador (CI 4) foi novamente incrementado e o pino HBEN está de novo no nível lógico alto. Desta maneira, os 8 bits superiores do canal 2 são lidos pela CPU.

4ª leitura: O procedimento desta leitura é idêntico ao da 2ª leitura. Ao fim desta os 4 bits superiores do canal 2 são lidos pela CPU.

O procedimento para a 5ª, 7ª, 9ª e 11ª leituras é o mesmo da 3ª leitura e para a 6ª, 8ª, 10ª e 12ª leitura o procedimento é o mesmo da 4ª leitura. Ao fim da 11ª leitura, quando o contador (CI 4) é incrementado, a sua saída Q6 provoca o rearme "reset" do contador e comanda novamente os "sample/Hold" para o modo "Sample". Desta forma o circuito está pronto para fazer novamente 12 leituras no conversor A/D.

Este procedimento é repetido 128 vezes, totalizando 1536 leituras no conversor. Ao final do ciclo de leitura foram amostrados e armazenados na memória através da CPU, 128 pontos de cada canal.

Como durante cada bloco de 12 leituras, duas para cada canal, os circuitos de entrada "Sample/Hold" ficaram no modo "Hold", os 6 dados convertidos de 12 bits, dos 6 canais de entrada, correspondem ao mesmo instante no tempo, garantindo, desta maneira, a leitura simultânea das amplitudes de cada canal de entrada.

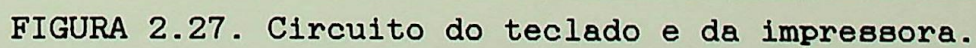
O sinal de sincronismo ("clock") para o conversor A/D é gerado usando-se a frequência de 3.58 MHz vinda da placa 3, que é dividida por três, através do (CI 5) e ajustada com ciclo ativo de 50 por cento através de mono estável (CI 6).

Esta placa é conectada à placa controladora (Placa 3) através do "slot" 1 da placa 2.

2.6 - A PLACA 6

Nesta placa está o circuito responsável pela operação do teclado e da impressora.

Os sinais de controle, para esta placa, vêm das portas A, B e C da "PPI" da placa 3, através de um cabo conector flexível multivias ("Flat Cable"). O diagrama elétrico desta placa está representado na figura 2.27.



Os sinais de varredura, vindos da porta C alta da "PPI", chegam codificados aos pinos A, B e C do (CI 7). Este, por sua vez, decodifica-os fazendo a varredura das colunas do teclado, através das saídas y1 a y5.

A leitura das linhas de teclado é codificada pelo (CI 8) e lida pela porta C baixa da "PPI".

Quando é necessário acionar a impressora, o (CI 7) decodifica esta condição, ativando a sua saída y7. Esta comanda o circuito de alimentação de motor.

Com a impressora em movimento, os sinais de controle gerados por ela, são codificados através do (CI 9) e (CI 8) e lidos pela porta C baixa da "PPI".

O disparo das agulhas, comandado pelas portas A e B da "PPI", é feito através do (CI 5) e (CI 6).

Na figura 2.28 está ilustrado o diagrama elétrico do conjunto impressora e na figura 2.29 o código "ASCII" de cada tecla.

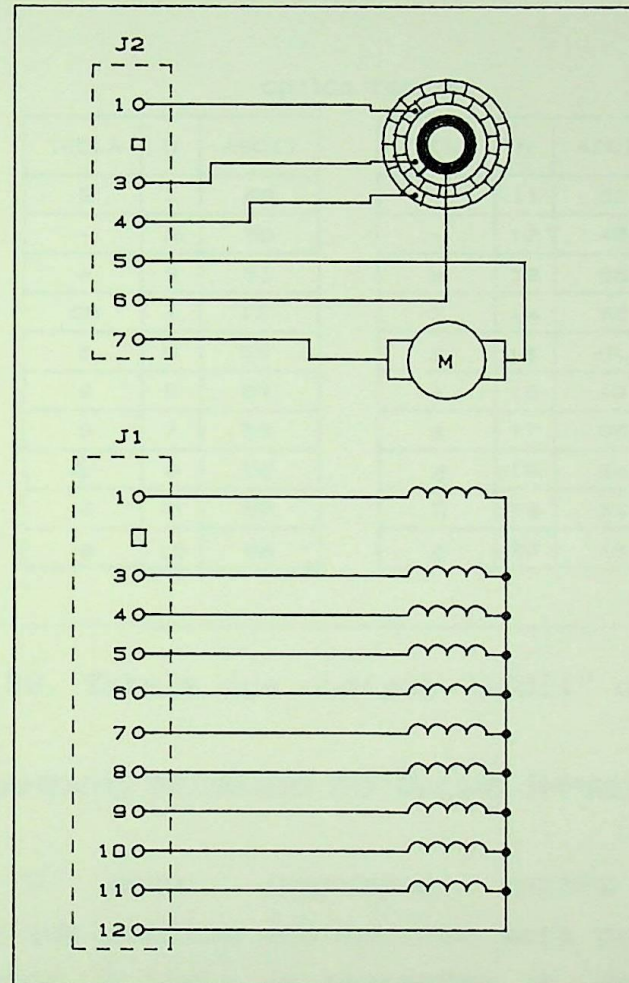


FIGURA 2.28. Diagrama elétrico da impressora.

TECLADO					
A	B	C	D	E	
6	7	8	9	-	
2	3	4	5	+	
0	1	.	←	CR	

CODIGO TECLAS					
TECLA	N	ASCII	TECLA	N	ASCII
E	1	69	4	11	52
-	2	50	.	12	48
+	3	51	8	13	68
CR	4	13	7	14	55
D	5	53	3	15	51
9	6	54	1	16	49
5	7	55	A	17	65
←	8	56	6	18	54
C	9	57	2	19	50
8	10	56	0	20	48

FIGURA 2.29. Tabela dos códigos "ASCII" do teclado.

2.6.1 - FUNCIONAMENTO MECÂNICO DO GRUPO IMPRESSOR

O grupo impressor contém um dispositivo eletromecânico que utiliza dez agulhas para produzir caracteres de matriz por pontos. A linha de impressão é de 20 caracteres de largura.

À medida que o rolo de impressão avança, as agulhas de impressão movem-se para trás e para a frente no espaço de dois caracteres enquanto percutem a fita nas posições exigidas. Cada matriz de caractere tem cinco pontos de largura e sete pontos de altura. As agulhas imprimem em ambas as direções, da direita para a esquerda e da esquerda para a direita, salvo no retorno do

último percurso enquanto o rolo de impressão dá uma entrelinha. Na figura 2.30 está ilustrado a sequência de impressão de uma agulha.

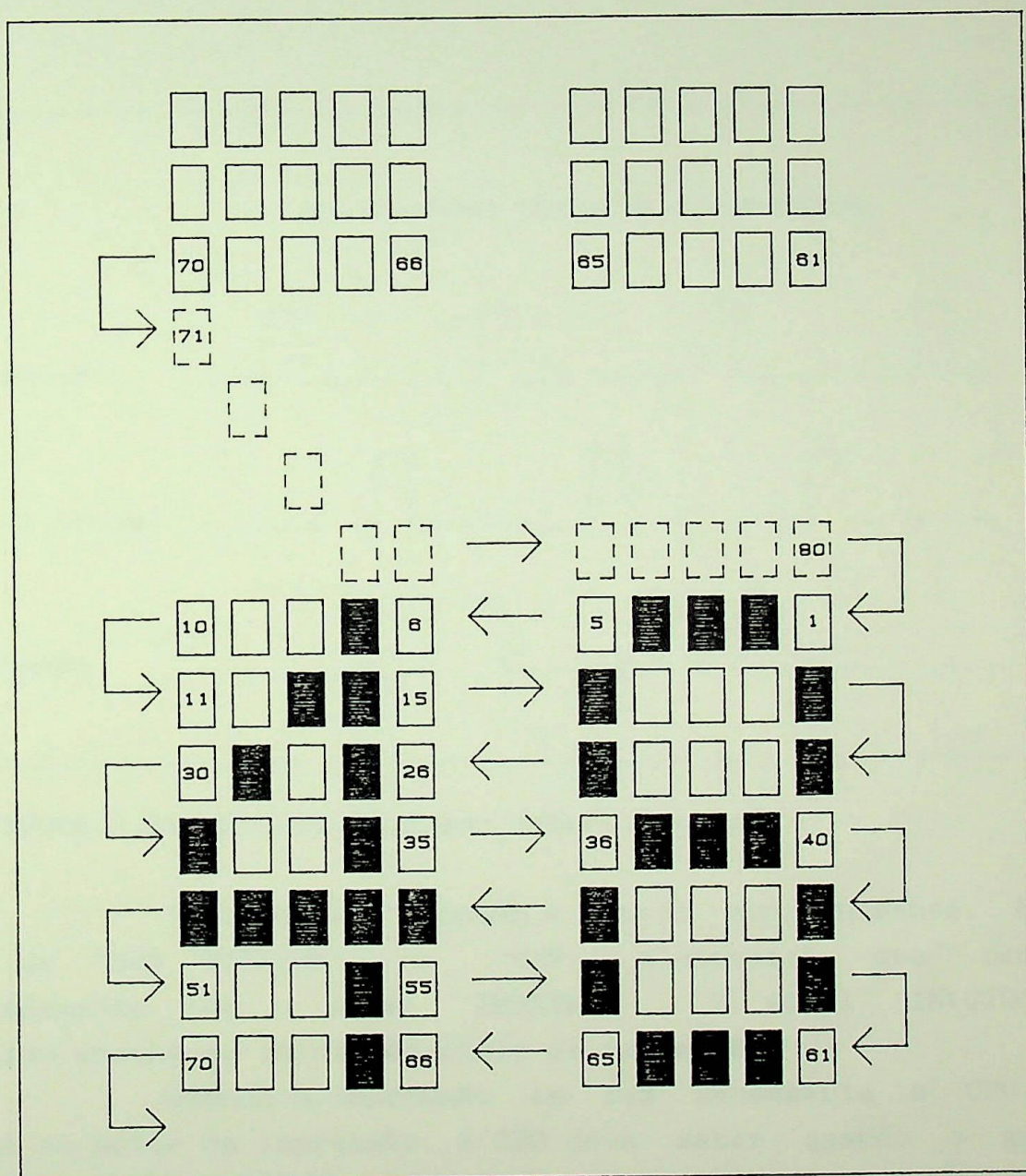


FIGURA 2.30. Sequência de impressão.

2.6.2 - FUNCIONAMENTO ELETRÔNICO DO GRUPO IMPRESSOR

O disco estroboscópico (figura 2.28) do grupo impressor fornece três sinais à unidade lógica, representados na figura 2.31. Estes sinais são "IMPRIME", "NÃO IMPRIME" e "INÍCIO". "IMPRIME" é o sinal de impressão de ponto e é gerado continuamente pela rotação do disco estroboscópico.

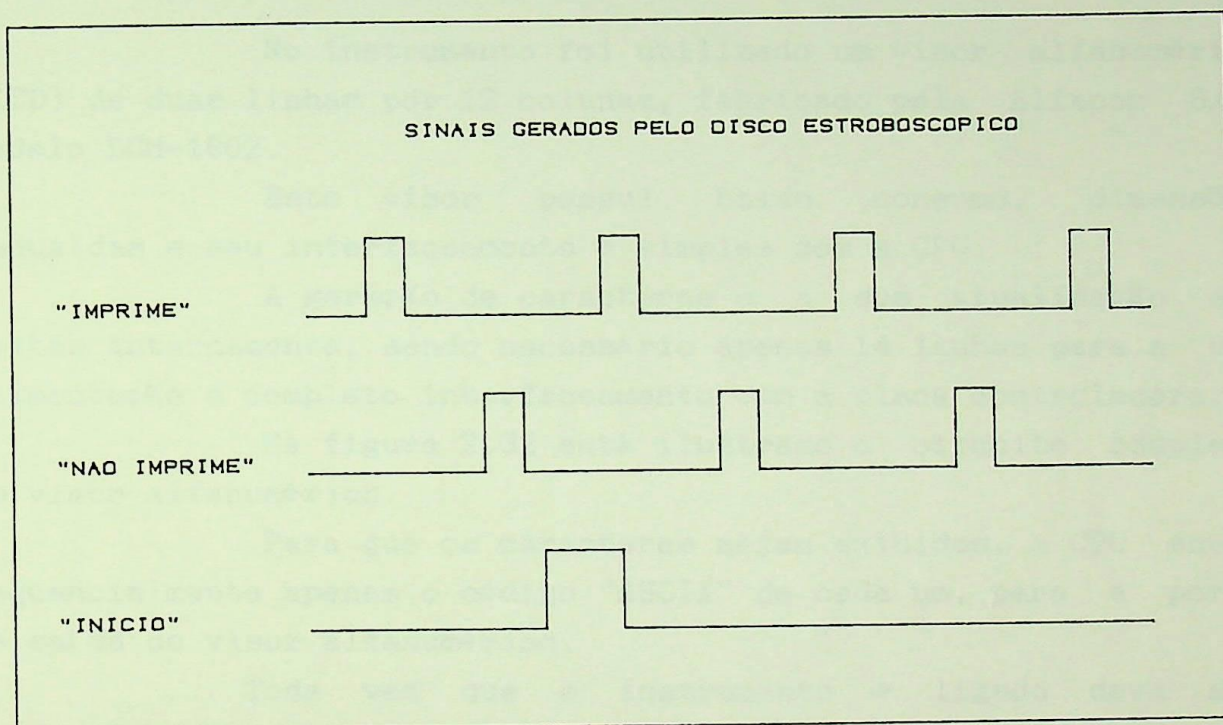


FIGURA 2.31. Sinais de disco estroboscópico.

"NÃO IMPRIME" também é gerado continuamente. É o sinal de "NÃO IMPRIME" ou "OFF" eletrônico que ocorre alternadamente com o sinal "IMPRIME". O sinal "INÍCIO" é produzido apenas no início do ciclo de impressão.

Quando a impressão se faz necessária a CPU dá partida ao motor de impressão. A CPU deve saber quando o grupo impressor está na posição correta para imprimir: Isso acontece quando o disco estroboscópico envia o sinal "INÍCIO". Após o sinal

"INICIO", a cada sinal "IMPRIME", a CPU alimenta as bobinas para produzir os pontos de caracteres a serem impressos por cada agulha e as desliga a cada sinal "NÃO IMPRIME".

Durante o ciclo de impressão, após o sinal "INICIO", a CPU conta 70 pulsos do sinal "IMPRIME". Na 71ª posição de ponto, a alimentação de motor é interrompida encerrando o ciclo de impressão.

2.7 - O VISOR ALFANUMÉRICO DE CRISTAL LÍQUIDO (LCD)

No instrumento foi utilizado um visor alfanumérico (LCD) de duas linhas por 12 colunas, fabricado pela Alfacom S/A, modelo LCM-1602.

Este visor possui baixo consumo, dimensões reduzidas e seu interfaceamento é simples com a CPU.

A geração de caracteres e a sua atualização são feitas internamente, sendo necessário apenas 14 linhas para a sua alimentação e completo interfaceamento com a placa controladora.

Na figura 2.32 está ilustrado o circuito completo do visor alfanumérico.

Para que os caracteres sejam exibidos, a CPU envia sequencialmente apenas o código "ASCII" de cada um, para a porta de saída do visor alfanumérico.

Toda vez que o instrumento é ligado deve ser executado o procedimento de inicialização do visor que consiste em lhe enviar um grupo inicial de quatro instruções para configurar o modo de operação, fixação de modo controle ativo/inativo do display e limpeza da tela.

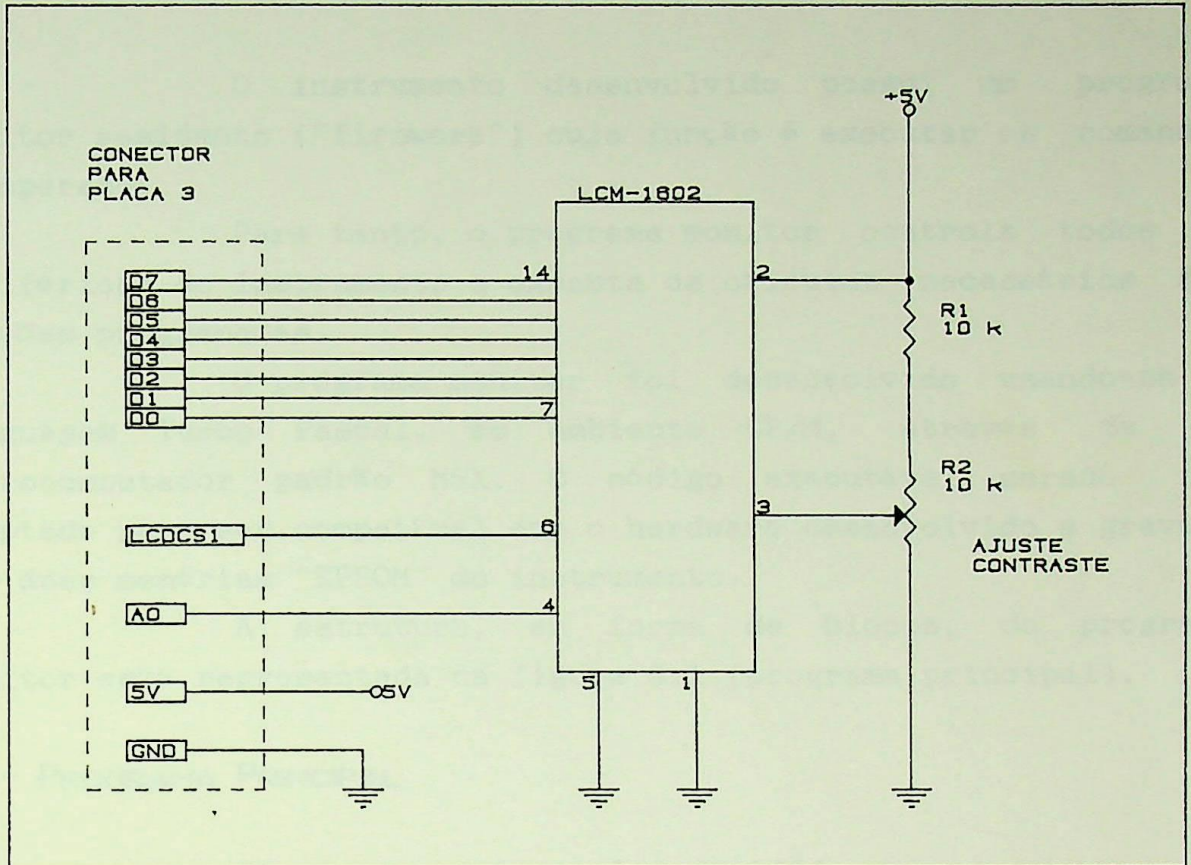


FIGURA 2.32. Circuito do visor alfanumérico.

3 - O SOFTWARE DO SISTEMA

O instrumento desenvolvido possui um programa monitor residente ("firmware") cuja função é executar os comandos do operador.

Para tanto, o programa monitor controla todos os periféricos do instrumento e executa os cálculos necessários das funções programadas.

O programa monitor foi desenvolvido usando-se a linguagem Turbo Pascal, em ambiente CP/M, através de um microcomputador padrão MSX. O código executável gerado foi adaptado para ser compatível com o hardware desenvolvido e gravado nas duas memórias "EPROM" do instrumento.

A estrutura, em forma de blocos, do programa monitor está representada na figura 3.1 (programa principal).

3.1 - PROGRAMA PRINCIPAL

O programa principal é dividido em:

1 - Inicialização dos periféricos:

Os periféricos que necessitam ser inicializados são:

"PPI", visor alfanumérico e o "USART". Na figura 3.4 está ilustrada a rotina de inicialização dos periféricos.

2 - Modo de funcionamento inicial ("Default")

Ao ser ligado o instrumento assume as seguintes condições:

- relação do transformador de potencial: RTP = 1
- relação do transformador de corrente: RTC = 1
- n° de harmônicos calculados: NHARM = 16
- impressora ligada
- modo de cálculo unitário

Estas condições iniciais podem ser alteradas, conforme será mostrado mais adiante na opção E.

3 - Atualização do relógio

Como o instrumento não possui bateria para o circuito do

relógio, é solicitado ao operador que atualize a hora e os minutos, passando então o instrumento a fazer a contagem correta de tempo.

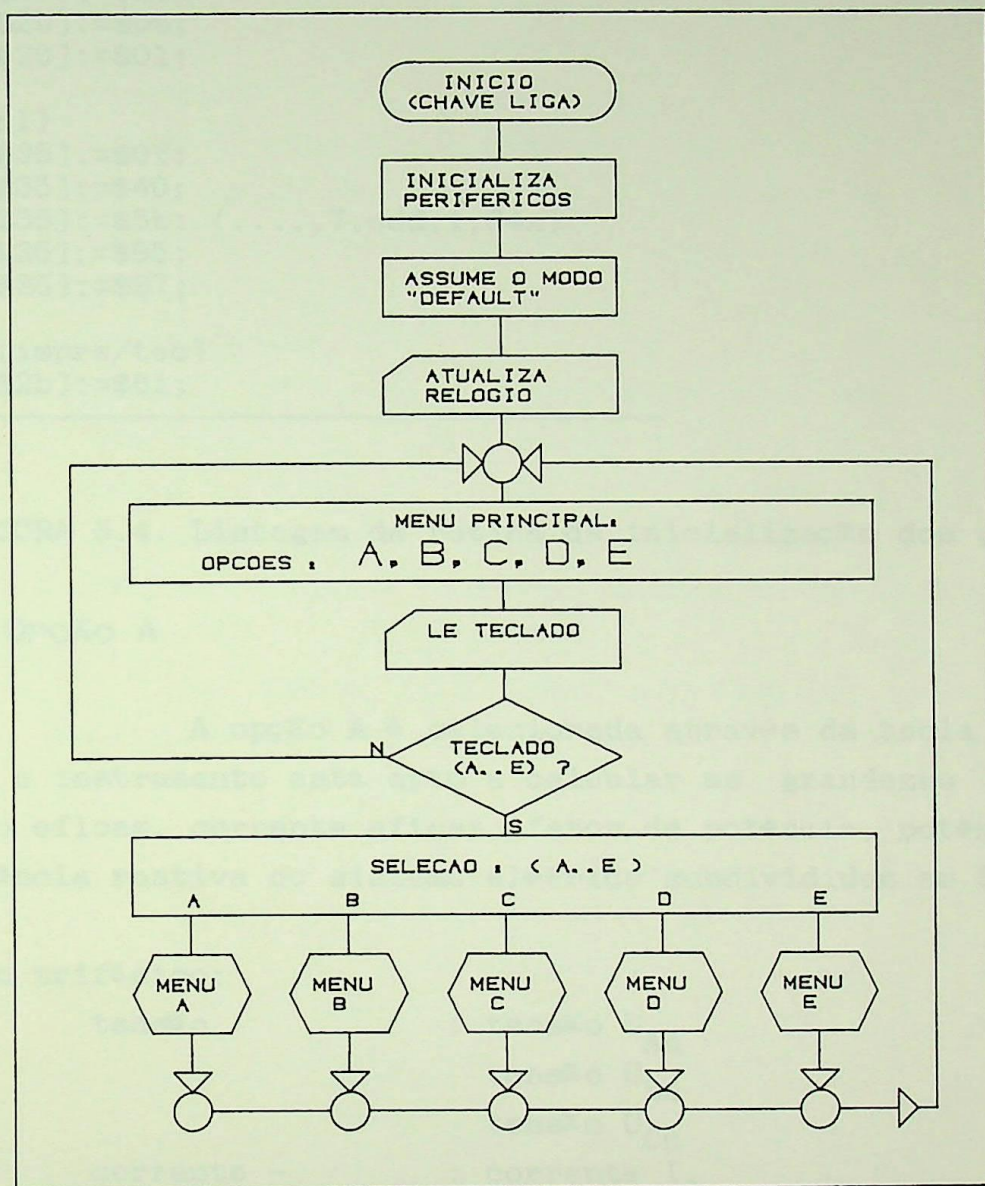


FIGURA 3.1. Fluxograma geral do programa monitor.

4 - Menu principal

Finalmente, no menu principal, o operador pode escolher, a função de cálculo desejada.

É dividido em 5 opções: A, B, C, D e E.

Após selecionada e executada a opção desejada o programa retorna ao menu principal.

```

procedure init_I0;
begin

{lcd}
port[$20]:=$38;
port[$20]:=$38;
port[$20]:=$06;
port[$20]:=$01;

{serial}
port[$35]:=$0f;
port[$35]:=$40;
port[$35]:=$5b; {.....,7,odd,1,64x}
port[$35]:=$95;
port[$35]:=$97;

{PPI (impre/tec}
port[$2b]:=$81;

```

FIGURA 3.4. Listagem da rotina de inicialização dos periféricos.

3.2 - Opção A

A opção A é selecionada através da tecla A. Nesta opção o instrumento está apto a calcular as grandezas elétricas; tensão eficaz, corrente eficaz, fator de potência, potência ativa e potência reativa do sistema elétrico subdivididos em 3 opções:

- Modo trifásico:

tensão	:	tensão U_{An}
		tensão U_{Bn}
		tensão U_{Cn}
corrente -	:	corrente I_A
		corrente I_B
		corrente I_C
fator de potência	:	$\cos\psi$ A
		$\cos\psi$ B
		$\cos\psi$ C
potência ativa	:	potência ativa A
		potência ativa B
		potência ativa C

potência reativa : potência reativa A
 potência reativa B
 potência reativa C

- Modo monofásico:

tensão : tensão U_{An}
 corrente : corrente I_A
 fator de potência : $\cos\psi_A$
 potência ativa : potência ativa A
 potência reativa : potência reativa A

- Modo média trifásica:

tensão : tensão média trifásica
 corrente : corrente média trifásica
 fator de potência : $\cos\psi$ médio trifásico
 potência ativa : potência ativa total
 potência reativa : potência reativa total

Na figura 3.5 está representado o fluxograma básico, usado pelo instrumento, na execução da opção A.

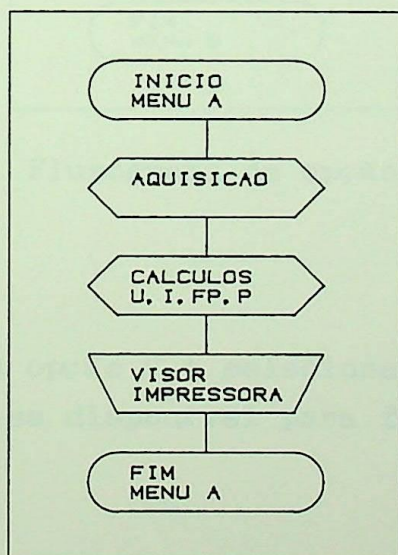


FIGURA 3.5. Fluxograma da opção A.

3.3 - OPÇÃO B

Estando o instrumento no menu principal, a opção B é selecionada através da tecla B. Nesta opção, o instrumento transforma-se em um analisador de espectro harmônico.

A análise dos harmônicos consiste em submeter as 128 amostras, aquisitadas do canal de interesse, ao algoritmo da FFT (Fast Fourier Transform). Por meio do teclado, seleciona-se os canais que se deseja analisar e o número de harmônicos (16 ou 32) a decompor.

Na figura 3.6 está representado o fluxograma básico usado na execução da opção B.

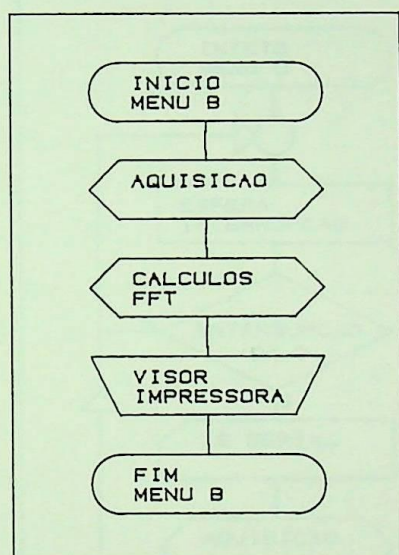


FIGURA 3.6. Fluxograma da opção B.

3.4 - OPÇÃO C

A opção C é selecionada através da tecla C. Esta função encontra-se disponível para futuras aplicações.

3.5 - OPÇÃO D

A opção D, selecionada através da tecla D, coloca o instrumento no modo remoto "remote".

Neste modo de operação, todo o controle é feito através de um computador, conectado ao instrumento, pela interface serial.

O computador envia o código da função desejada, o equipamento interpreta, executa e devolve os resultados da funções solicitada.

A figura 3.7 ilustra, em forma de blocos, a execução da opção D.



FIGURA 3.7. Fluxograma da opção D.

Os códigos implementados, a serem enviados do computador ao instrumento, são:

TMO : retorna a hora atual no formato "STRING [5]"

CTO : retorna 15 valores reais, no formato "8:2", correspondentes a:
 U_{An} , U_{Bn} , U_{Cn} , I_A , I_B , I_C , FP_A , FP_B , FP_C , P_A , P_B , P_C , Q_A , Q_B , Q_C

CMO : retorna 5 valores reais no formato "8:2", correspondentes a:
 U_{An} , I_A , FP_A , P_A , Q_A

HDO,CANAL: retorna 34 valores reais do canal selecionado, correspondentes aos harmônicos de ordem 0 a 16, com amplitude e fase, no formato: amplitude "8:2"
 fase "8:1"

HTO,CANAL: idêntico ao comando anterior só que retorna do 0 ao 32^o harmônico.

VTO,CANAL: retorna o vetor de 128 pontos do canal selecionado, no formato "8:2"

VIO,CANAL: retorna o vetor de 128 pontos inteiros lidos pelo conversor, do canal selecionado, no formato "4".

KTO : retorna as 6 constantes de calibração, uma de cada canal, no formato "8:3"

VRO : retorna com a versão do instrumento no formato "STRING[20]".

3.6 - Opção E

A opção E, selecionada pela tecla E apresenta as seguintes funções gerais:

1 - Calibração

O instrumento possui calibração dinâmica por software que consiste em conectar o equipamento em fontes de tensão e corrente, monitoradas por instrumentos de precisão e através de teclado, digitar os valores reais de tensão e corrente. Desta forma, o instrumento desenvolvido, calcula e armazena, de forma permanente, as constantes de calibração.

2 - Ajuste do relógio

Nesta opção, o operador pode atualizar a hora e os minutos.

3 - Relação TP e TC

O instrumento ao ser ligado assume $RTP = 1$ e $RTC = 1$, se o operador desejar relações diferentes destas deverá mudá-las nesta opção.

4 - Impressora (ligada/desligada)

Nesta opção o operador pode ligar ou desligar a impressora.

5 - Modo de operação

O instrumento possui dois modos distintos de operação chamados de unitário e contínuo. No modo unitário, após um certo cálculo ser executado, o programa retorna ao menu principal, ou seja, a função selecionada é executada uma única vez.

Ao ser selecionado o modo contínuo, o instrumento pede ao operador que digite o intervalo de tempo de espera (de 1 a 99 minutos).

Neste modo, após um certo cálculo ser executado, o programa fica esperando decorrer o intervalo de tempo de espera selecionado. Após este tempo, o cálculo é executado novamente. Este processo se repete indefinidamente até que o operador o interrompa.

6 - Estado atual ("Status")

Esta função permite ao operador saber como o instrumento está selecionado.

Na figura 3.8 está representado o diagrama de blocos da opção E.

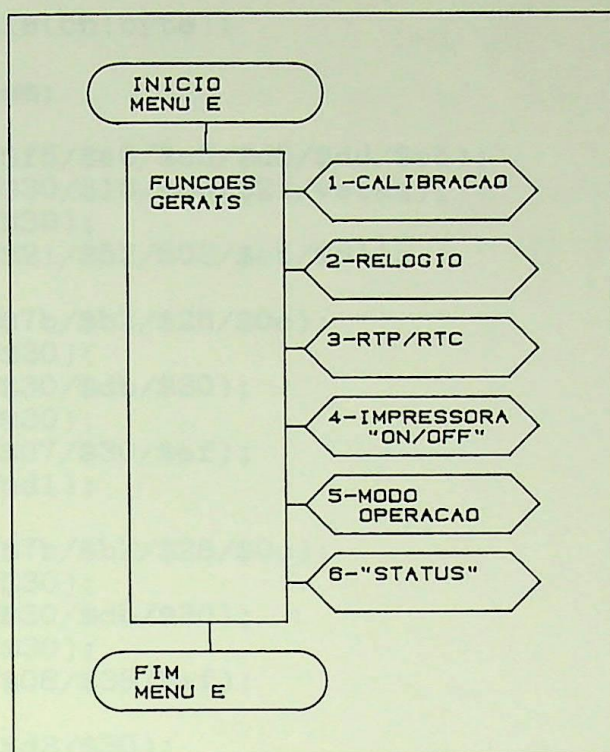


FIGURA 3.8. Fluxograma da opção E.

3.7 - SUBROTINAS IMPORTANTES

As principais subrotinas desenvolvidas são aquelas que controlam os periféricos de entrada e saída e calculam as grandezas elétricas.

Estas subrotinas são descritas a seguir.

3.7.1 - SUBROTINA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Na listagem abaixo está a subrotina de aquisição de dados desenvolvida (leitura do conversor A/D).

```

procedure aquis(cn:byte);

procedure aqasm;
begin
  inline($f3/$f5/$e5/$c5/$d5/$dd/$e5);
  inline($0e/$30/$16/$80/$21/vetaq);
  inline($d3/$30);
  inline($d9/$21/$52/$03/$e5/$d1);
  {lab1:}
  inline($1b/$7b/$b2/$28/$0e);
  inline($d3/$30);
  inline($db/$30/$db/$30);
  inline($d3/$30);
  inline($fe/$07/$30/$ef);
  inline($e5/$d1);
  {lab2:}
  inline($1b/$7b/$b2/$28/$0c);
  inline($d3/$30);
  inline($db/$30/$db/$30);
  inline($d3/$30);
  inline($fe/$08/$38/$ef);
  {lab3:}
  inline($d9/$d3/$30);
  {lab4:}
  inline($af/$d3/$29);

  inline($ed/$a2/$ed/$a2);
  inline($ed/$a2/$ed/$a2);
  inline($ed/$a2/$ed/$a2);
  inline($ed/$a2/$ed/$a2);
  inline($ed/$a2/$ed/$a2);
  inline($ed/$a2/$ed/$a2);
  inline($ed/$a2/$ed/$a2);
  inline(0/0/0/0/0/0/$dd/$2b);
  inline($15/$20/$dd);

  inline($f6/$80/$d3/$29);
  inline($dd/$e1/$d1/$c1/$e1/$f1/$fb);
end;

begin
  if cn in[1..6] then
    begin
      if cn=1 then aqasm;
      for i:=1 to 128 do
        vetreal[i]:=(vetaq[i][cn]-erro[cn])*cte[cn];
      end;
    end;
end;

```

LISTAGEM 1. Subrotina de aquisição de dados.

O "loop" de leitura dos conversores foi desenvolvido diretamente em assembler, devido a alta velocidade exigida nesta operação

Na listagem 2, está ilustrado o programa "assembly" do "loop" de leitura e na figura 3.9 o seu respectivo diagrama de blocos.

```

DI
PUSH    AF
PUSH    HL
PUSH    BC
PUSH    DE
PUSH    IX
LD      C,30H
LD      D,80H
LD      HL,VETAQ
OUT     (30H),A
EXX
LD      HL,0352H
PUSH    HL
POP     DE
LAB1:   DEC    DE
LD      A,E
OR      D
JR      Z,LAB2
OUT     (30H),A
IN      A,(30H)
IN      A,(30H)
OUT     (30H),A
CP      NC,LAB1
PUSH    HL
POP     DE
LAB2:   DEC    DE
LD      A,E
OR      D
JR      Z,LAB3
OUT     (30H),A
IN      A,(30H)
IN      A,(30H)
OUT     (30H),A
CP      08H
JR      C,LAB2
LAB3:   EXX
OUT     (30H),A
XOR     A
OUT     (29H),A
LAB4:   INI

```



```

INI
INI
INI
INI
INI
INI
INI
INI
INI
INI
INI
NOP
NOP
NOP
NOP
NOP
DEC      IX
DEC      D
JR      NZ, LAB4
OR      80H
OUT     (29H), A
POP     IX
POP     DE
POP     BC
POP     HL
POP     AF
EI
RET

```

LISTAGEM 2. Listagem "assembly" do programa utilizado na aquisição de dados.

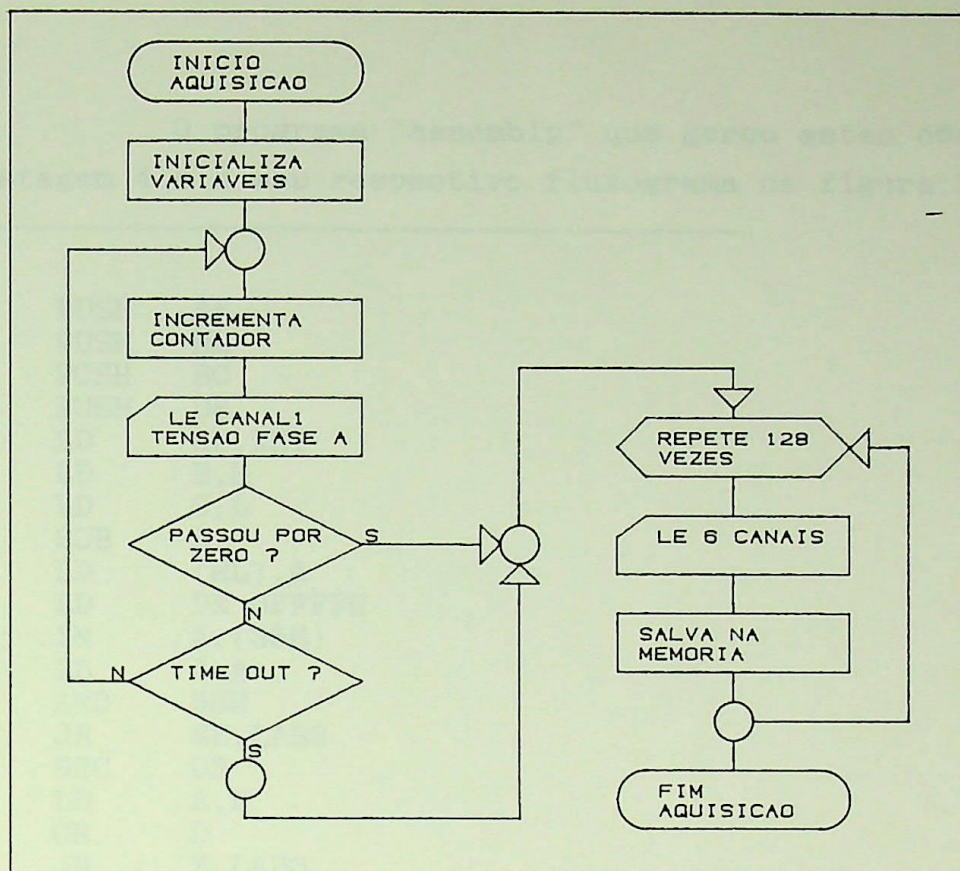


FIGURA 3.9. Fluxograma do programa de aquisição de dados.

3.7.2 - SUBROTINA DE LEITURA DA PORTA SERIAL

Esta subrotina é executada quando há um pedido de interrupção, pela interface de comunicação serial.

Foi feita totalmente em assembler, e os códigos gerados estão ilustrados na listagem 3.

```

procedure inter;
begin
  inline($f5/$e5/$c5/$d5/$21/key);
  inline($44/$4d/$97/$77/$11/$ff/$ff);
  inline($db/$35/$ed/$47/$e6/$38);
  inline($20/$22/$1b/$7b/$b2/$28/$1d);
  inline($ed/$57/$e6/$02/$28/$ed);
  inline($db/$34/$fe/$0d/$28/$e7);
  inline($fe/$0a/$28/$17/$c6/$9f);
  inline($30/$02/$d6/$20/$d6/$9f);
  inline($34/$03/$02/$18/$d6/$97);
  inline($77/$3e/$95/$d3/$35/$db/$34);
  inline($db/$34/$d1/$c1/$e1/$f1/$fb/$ed/$4d);
end;
  
```

LISTAGEM 3. Códigos da rotina de leitura da porta serial.

O programa "assembly" que gerou estes códigos está na listagem 4 e o seu respectivo fluxograma na figura 3.10.

```

      PUSH    AF
      PUSH    HL
      PUSH    BC
      PUSH    DE
      LD      HL,KEY
      LD      B,H
      LD      C,L
      SUB     A
      LD      (HL),A
      LD      DE,0FFFFH
LAB1:  IN      A,(35H)
      LD      I,A
      AND     38H
      JR      NZ,LAB3
      DEC     DE
      LD      A,E
      OR      D
      JR      Z,LAB3
      LD      A,I
      AND     02H
      JR      Z,LAB1
      IN      A,(34H)
      CP      0DH
      JR      Z,LAB1
      CP      0AH
      JR      Z,LAB4
      ADD     A,9FH
      JR      NC,LAB2
LAB2:  SUB     20H
      SUB     9FH
      INC     (HL)
      INC     BC
      LD      (BC),A
      JR      LAB1
LAB3:  SUB     A
      LD      (HL),A
      LD      A,95H
      OUT     (35H),A
LAB4:  POP     DE
      POP     BC
      POP     HL
      POP     AF
      EI
      RETI

```

LISTAGEM 4. Programa "assembly" da rotina de leitura da porta serial.

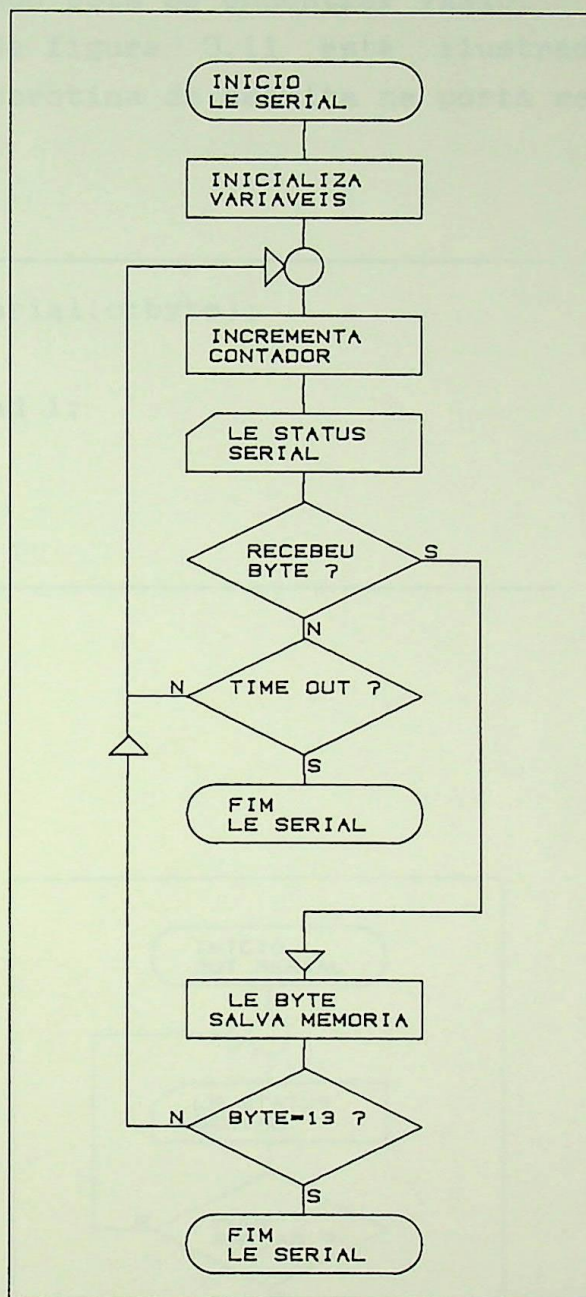


FIGURA 3.10. Fluxograma da rotina de leitura da porta serial.

3.7.3 - SUBROTINA DE ESCRITA NA PORTA SERIAL

Esta subrotina é chamada quando é necessário enviar dados através da comunicação serial.

Inicialmente é testado, através da leitura do byte de "status", o estado do buffer de transmissão, só ocorrendo a transmissão quando este se encontrar vazio.

Na figura 3.11 está ilustrada a listagem e o fluxograma da subrotina de escrita na porta serial.

```

procedure out_serial(c:byte);
begin
repeat
  a:=port[$35] and 1;
  until a=1;
port[$34]:=c;
delay(1);
end;
  
```

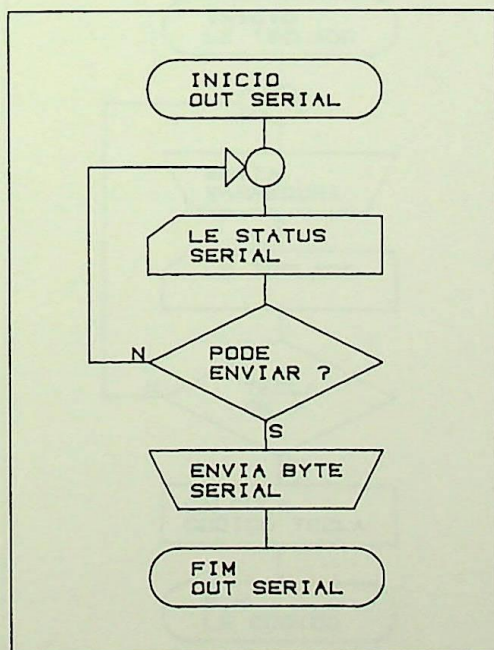


FIGURA 3.11. Listagem e fluxograma da subrotina de escrita na porta serial.

3.7.4 - SUBROTINA DE LEITURA DO TECLADO

Esta subrotina envia a varredura às colunas e lê o estado das linhas do teclado. Se alguma tecla for pressionada retorna o código ASCII correspondente.

A sua listagem e o respectivo fluxograma está ilustrado na figura 3.12.

```

function in_tec :byte;
begin
repeat
  for i:=0 to 4 do
    begin
      j:=(i+1) shl 4;
      port[$2a]:=j;
      j:=not(port[$2a]) and 7;
      if j<>0 then k:=tabtec[i*4+j];
    end;
until k<>0 ;
in_tec:=k;
end;

```

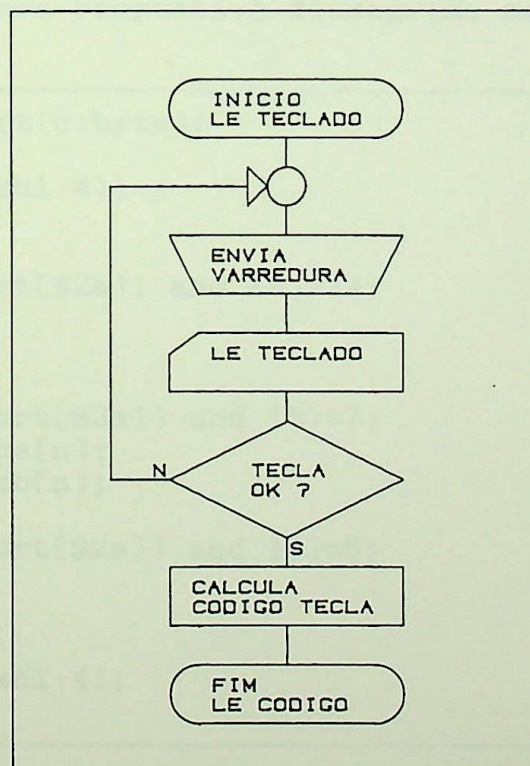


FIGURA 3.12. Listagem e fluxograma da subrotina de leitura de teclado.

3.7.5 - SUBROTINA DE ESCRITA NO VISOR ALFANUMÉRICO

Esta subrotina consiste simplesmente em enviar o código "ASCII", de carácter desejado, ao visor alfanumérico. Na Listagem 5 está ilustrado este procedimento.

```
procedure out_con(c:byte);
begin
  port[$21]:=c;
end;
```

LISTAGEM 5. Subrotina de escrita no visor alfanumérico.

3.7.6 - SUBROTINA DA IMPRESSORA

Esta subrotina é responsável pelo funcionamento do conjunto impressor que consiste em ligar o motor da impressora, monitorar os sinais de controle, e comandar o disparo das agulhas.

A listagem desta subrotina está ilustrada na Listagem 6 e o seu respectivo fluxograma na figura 3.13.

```
procedure out_lst(c:byte);
begin
  port[$2a]:=(7 shl 4);
  n:=0;
  repeat
    until (not(port[$2a]) and 15)=14;
  repeat
    n:=succ(n);
    repeat
      until (not(port[$2a]) and 15)=7;
    port[$28]:=coda[n];
    port[$29]:=codb[n];
    repeat
      until (not(port[$2a]) and 15)=6;
    port[$28]:=0;
    port[$29]:=0;
  until n=70;
  port[$2a]:=(6 shl 4);
end;
```

LISTAGEM 6. Subrotina de controle da impressora.

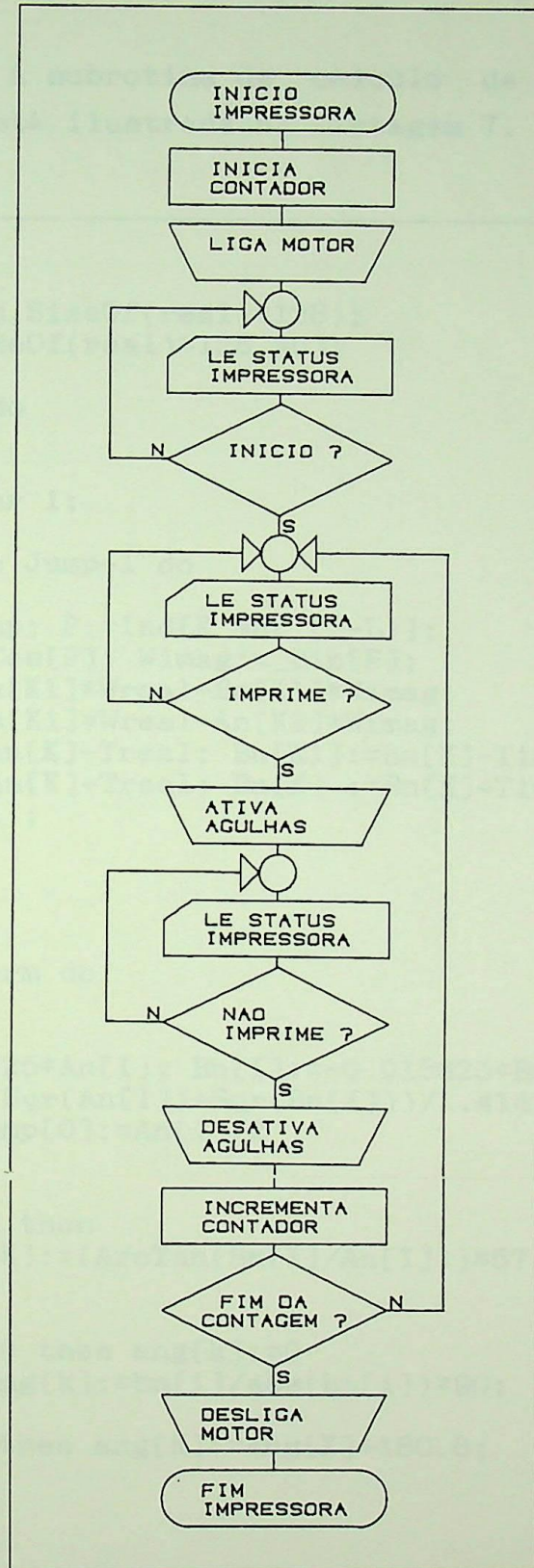


FIGURA 3.13. Fluxograma da subrotina de controle da impressora

3.7.7 - SUBROTINA DA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT)

A subrotina de cálculo da FFT, implementada no instrumento, está ilustrada na Listagem 7.

```

procedure FFT;
begin
Move(vetreal,An,SizeOf(real)*128);
FillChar(Bn,SizeOf(real)*128,#0);
Jump:=128;
for L:=1 to 7 do
begin
K:=0;
Jump:=Jump shr 1;
repeat
for I:=0 to Jump-1 do
begin
K1:=K+Jump; P:=Ind[K shr (7-L)];
Wreal:=_Cos[P]; Wimag:=_Sin[P];
Treal:=An[K1]*Wreal+Bn[K1]*Wimag;
Timag:=Bn[K1]*Wreal-An[K1]*Wimag;
An[K1]:=An[K]-Treal; Bn[K1]:=Bn[K]-Timag;
An[K] :=An[K]+Treal; Bn[K] :=Bn[K]+Timag;
k:=succ(K);
end;
K:=K+Jump;
until K>127;
end;
for K:=0 to nharm do
begin
I:=Ind[K];
An[I]:=0.015625*An[I]; Bn[I]:=-0.015625*Bn[I];
amp[K]:=Sqrt(Sqr(An[I])+Sqr(Bn[I]))/1.4142135;
if k=0 then amp[0]:=An[I]/2
else
begin
if An[I]<>0 then
ang[K]:=(ArcTan(Bn[I]/An[I]))*57.2957795
else
begin
if bn[i]=0 then ang[k]:=0
else ang[k]:=bn[i]/abs(bn[i])*90;
end;
if An[I]<0 then ang[K]:=ang[K]+180.0;
end;
end;
end;
end;
end;

```

LISTAGEM 7. Subrotina de cálculo da FFT.

3.7.8 - SUBROTINA DE CÁLCULO DO VALOR RMS

A subrotina implementada para o cálculo dos valores RMS de tensão e corrente está ilustrada na Listagem 8.

```
function RMS:real;
begin
  s:=0;
  for k:=1 to 128 do
    s:=s+sqr(vetreal[k]);
  RMS:=sqr(s/128);
end;
```

LISTAGEM 8. Subrotina de cálculo do valor RMS.

3.7.9 - SUBROTINA DE CÁLCULO DA POTÊNCIA ATIVA

A subrotina implementada para o cálculo da potência ativa está ilustrada na Listagem 9.

```
function POT:real;
begin
  s:=0;
  for k:=1 to 128 do
    s:=s+vetant[k]*vetreal[k];
  POT:=s/128;
end;
```

LISTAGEM 9. Subrotina para o cálculo da potência ativa.

4 - PRECISÃO DO INSTRUMENTO

Os ensaios realizados para determinar a precisão do instrumento foram feitos comparativamente, com outros equipamentos de precisão, visando medir os erros cometidos nas medições de tensão, corrente, fator de potência, potência ativa e no espectro harmônico.

Os equipamentos utilizados nestas medições foram:

- 1 - 3468A " Multimeter Hewlett Packard "
- 2 - 7090A " Measurement Plotting System Hewlett Packard "
- 3 - 3582A " Spectrum Analyser Hewlett Packard "
- 4 - Computador " IBM PS/2 Model 30286 "

Para garantir medições simultâneas, os equipamentos utilizados na comparação foram sincronizados com o instrumento desenvolvido, de tal forma que as leituras efetuadas correspondem ao mesmo ciclo elétrico.

Para garantir a validade dos dados medidos, todos os equipamentos da "HP" foram conectados ao microcomputador através da interface "GPIB" e o instrumento desenvolvido através da comunicação serial.

Para o ensaio de precisão, foi feita a montagem ilustrada na figura 4.1.

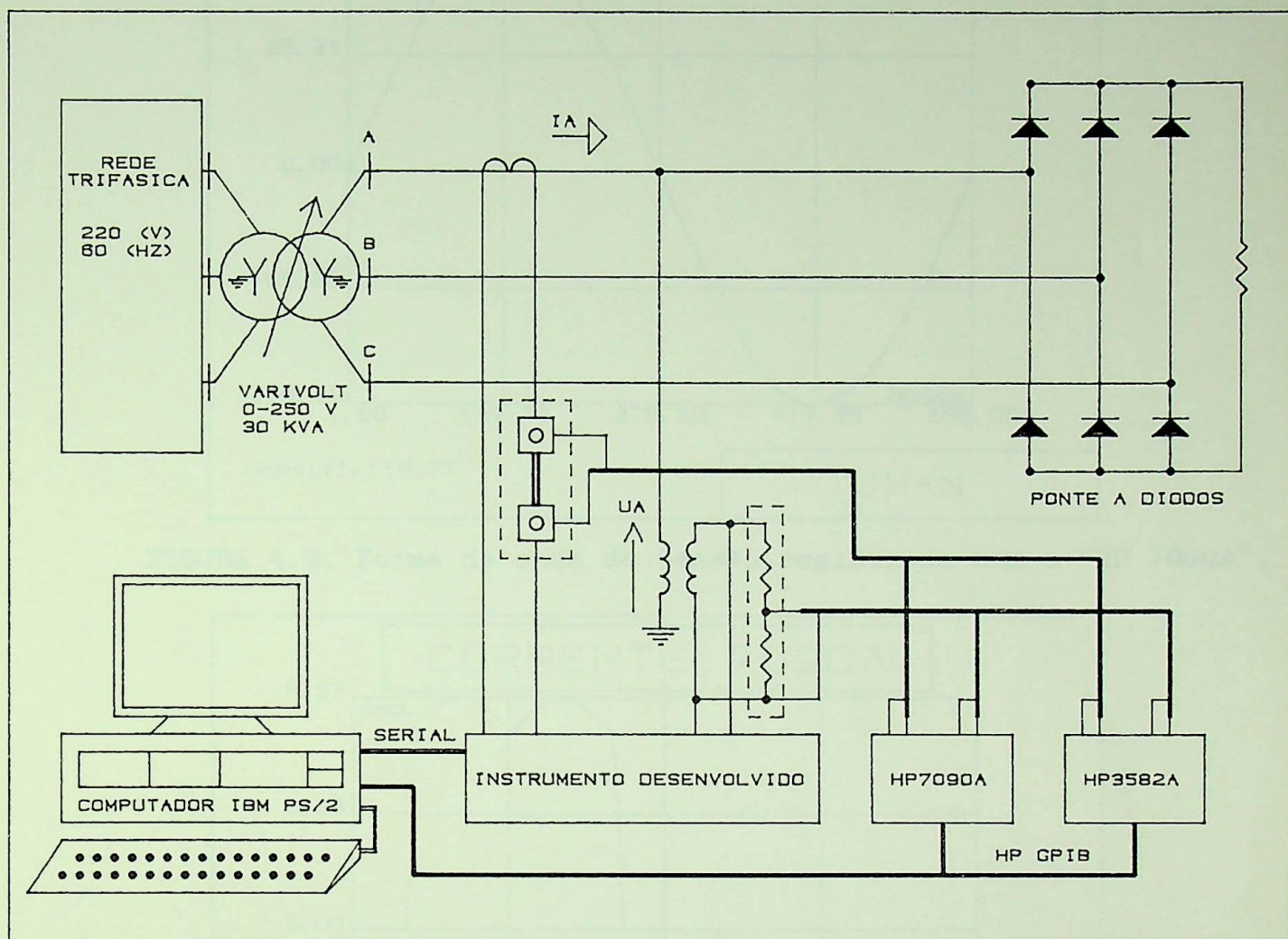


FIGURA 4.1. Sistema utilizado no ensaio de precisão.

4.1 - ENSAIO DE TENSÃO, CORRENTE, FATOR DE POTÊNCIA E POTÊNCIA ATIVA

Os ensaios foram feitos apenas para a fase A, para as demais fases os resultados esperados são os mesmos.

As formas de onda de tensão e corrente representadas com 556 pontos cada uma, registradas com o "HP 7090A", estão ilustradas nas figuras 4.2 e 4.3.

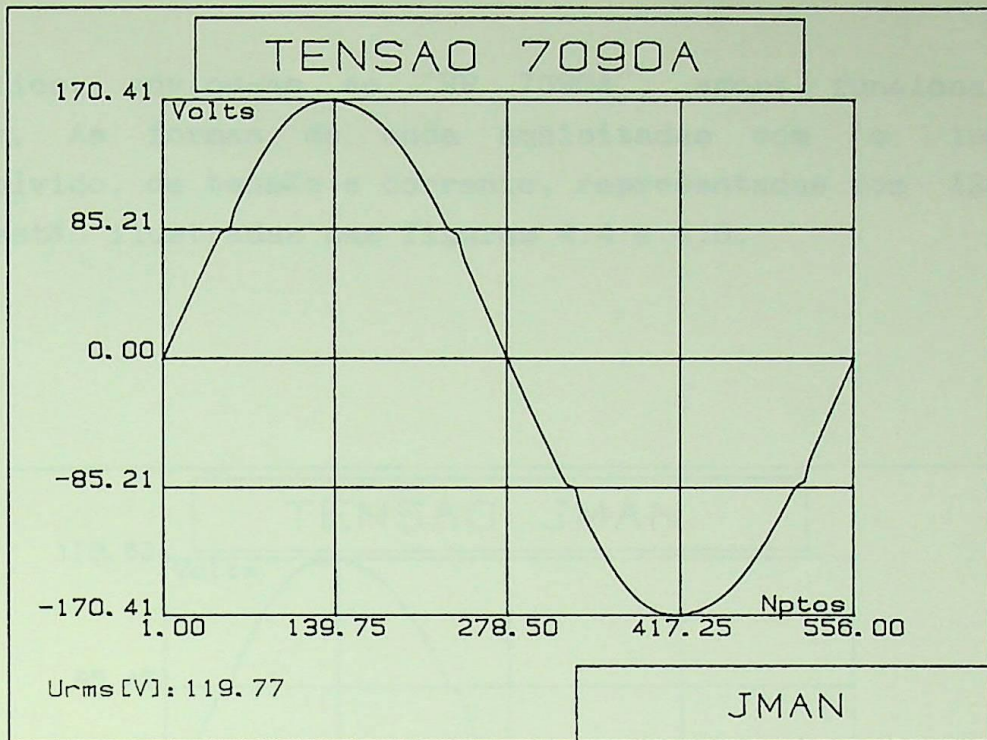


FIGURA 4.2. Forma de onda de tensão registrada com o "HP 7090A".

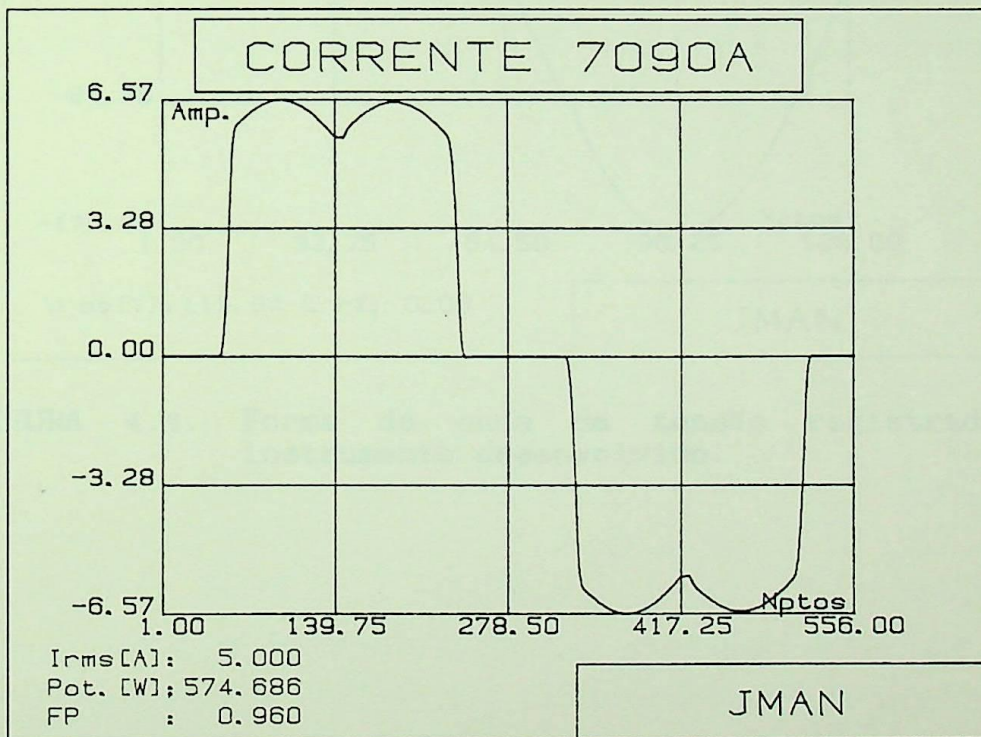


FIGURA 4.3. Forma de onda de corrente registrada com o "HP 7090A"

As formas de onda, do mesmo ciclo, registradas com o instrumento desenvolvido foram enviadas ao microcomputador através da comunicação serial e este, através de software

específico, enviou-as ao "HP 7090A", agora funcionando como plotter. As formas de onda adquiridas com o instrumento desenvolvido, de tensão e corrente, representadas com 128 pontos cada, estão ilustradas nas figuras 4.4 e 4.5.

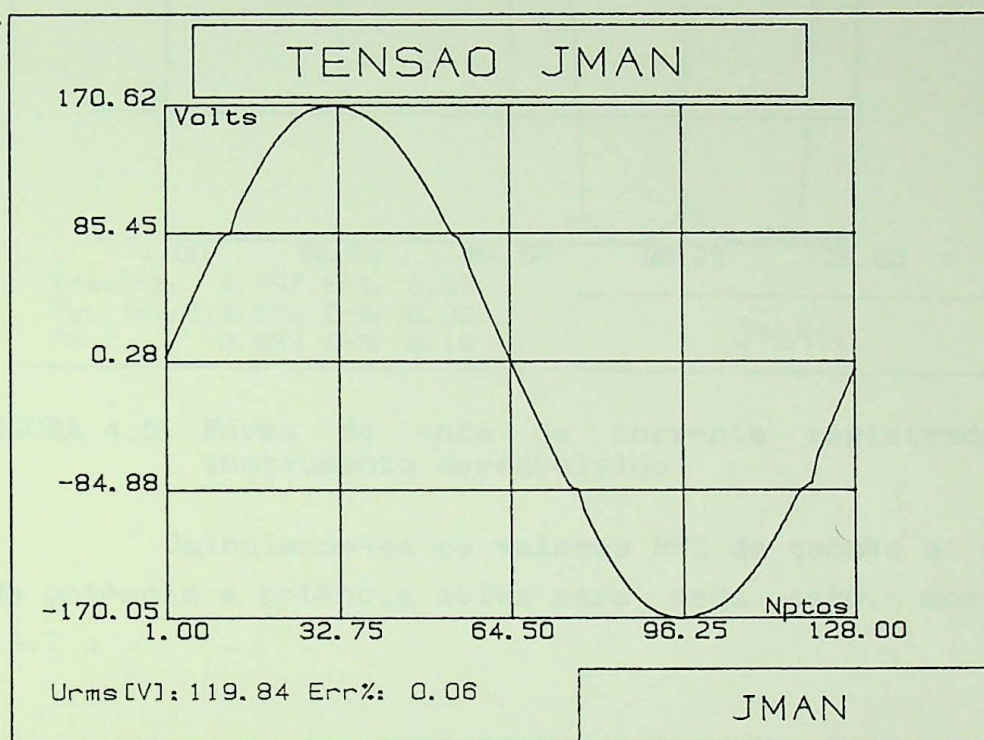


FIGURA 4.4. Forma de onda da tensão registrada com o instrumento desenvolvido.

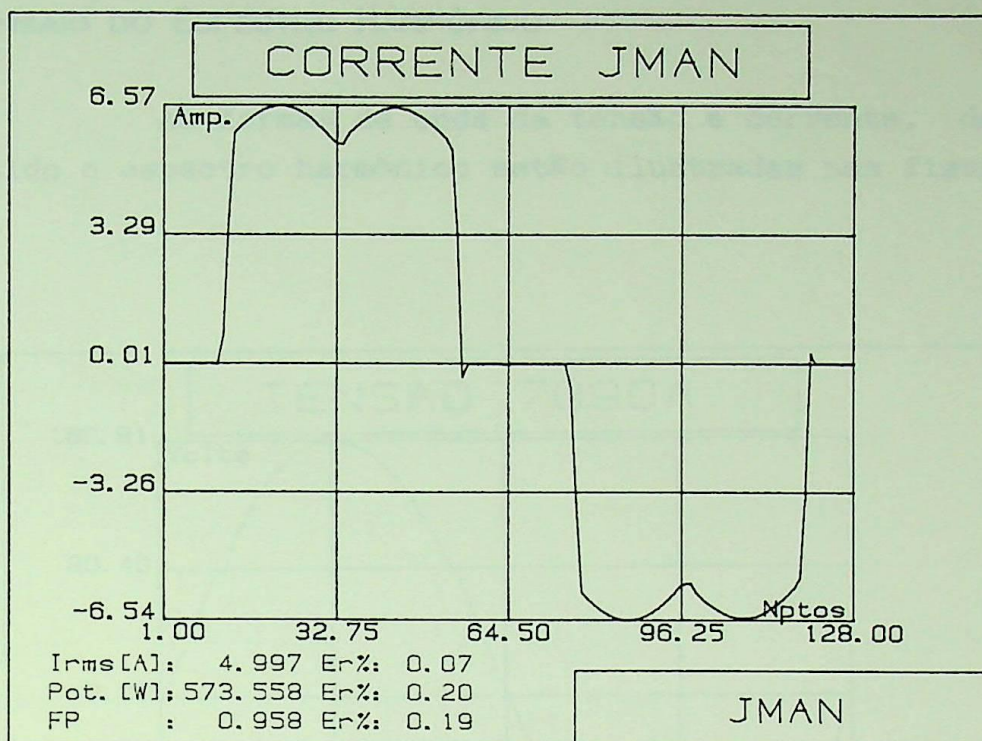


FIGURA 4.5. Forma de onda da corrente registrada com o instrumento desenvolvido.

Calculando-se os valores RMS de tensão e corrente, fator de potência e potência ativa para cada caso, montou-se a tabela 4.1 :

	"HP 7090A"	PROTÓTIPO	ERRO [%]
Tensão RMS	119,77 [V]	119,84 [V]	0,06
Corrente RMS	5,000 [A]	4,997 [A]	0,06
Fator de potência	0,960	0,958	0,20
Potência ativa	574,69 [W]	573,56 [W]	0,20

Tabela 4.1. Comparação entre as medidas realizadas com o "HP 7090A" e o instrumento desenvolvido.

Analisando-se a tabela 4.1, conclui-se que o erro máximo cometido em relação ao "HP 7090A", e de 0,2% na medição da potência ativa.

4.2 - ENSAIO DO ESPECTRO HARMÔNICO

As formas de onda de tensão e corrente, das quais foi obtido o espectro harmônico estão ilustradas nas figuras 4.6 e 4.7.

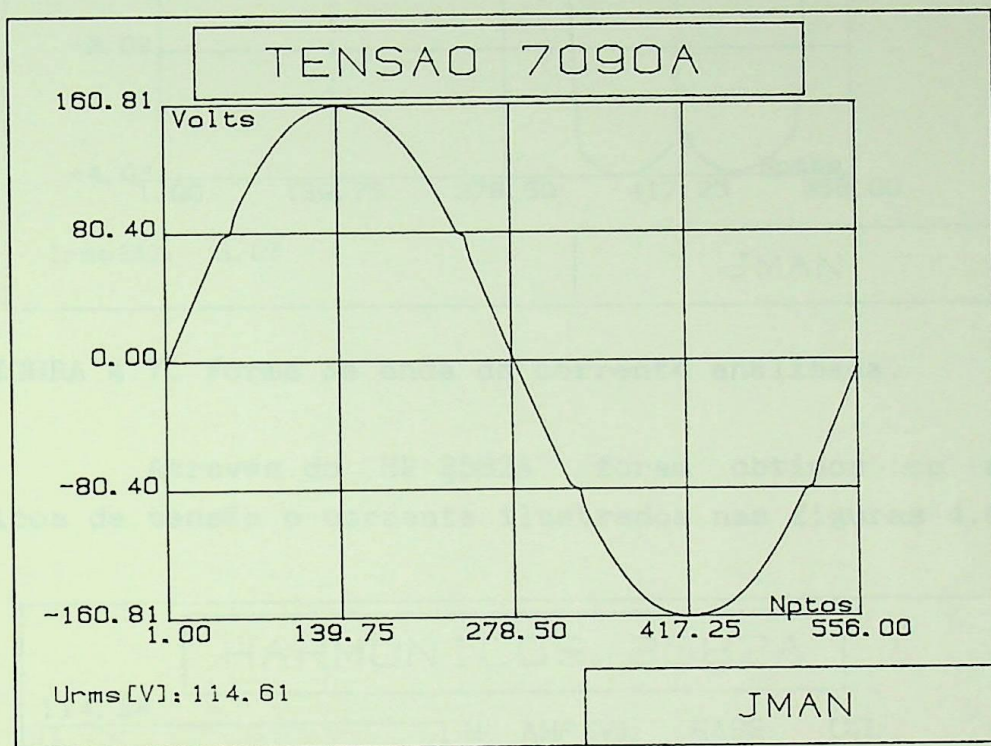


FIGURA 4.6. Forma de onda de tensão analisada.

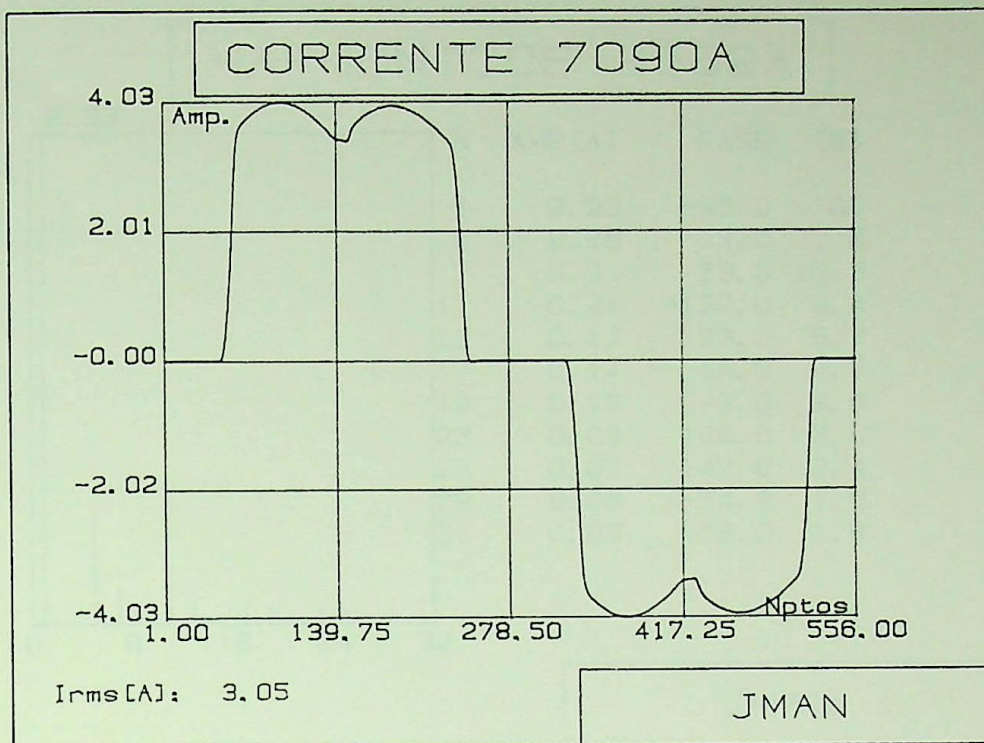


FIGURA 4.7. Forma de onda da corrente analisada.

Através do "HP 3582A" foram obtidos os espectros harmônicos de tensão e corrente ilustrados nas figuras 4.8 e 4.9.

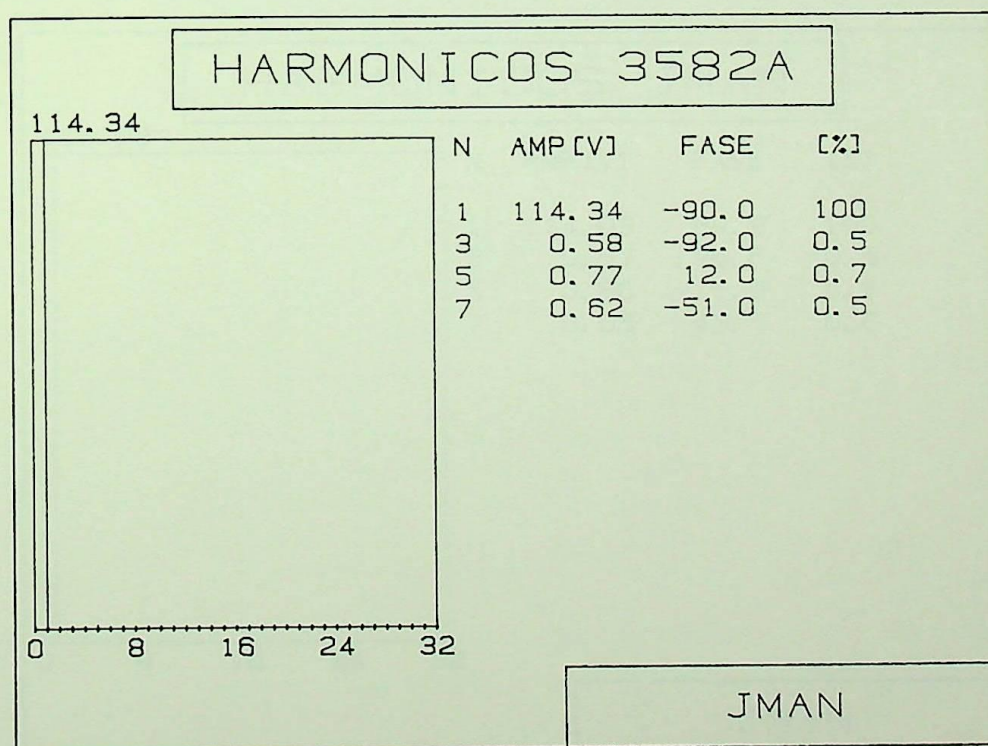


FIGURA 4.8. Espectro de tensão obtido com o "HP 3582A".

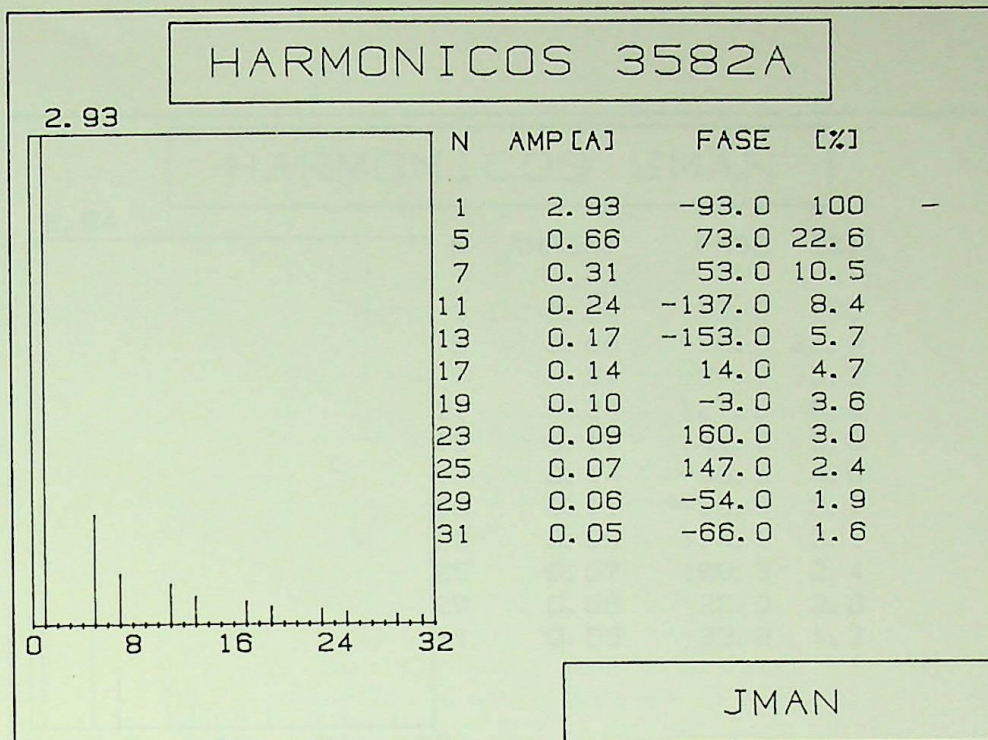


FIGURA 4.9. Espectro de corrente obtido com o "HP 8235A".

Simultaneamente, através do instrumento desenvolvido, foram obtidos os respectivos espectros, de tensão e corrente, ilustrados nas figuras 4.10 e 4.11.

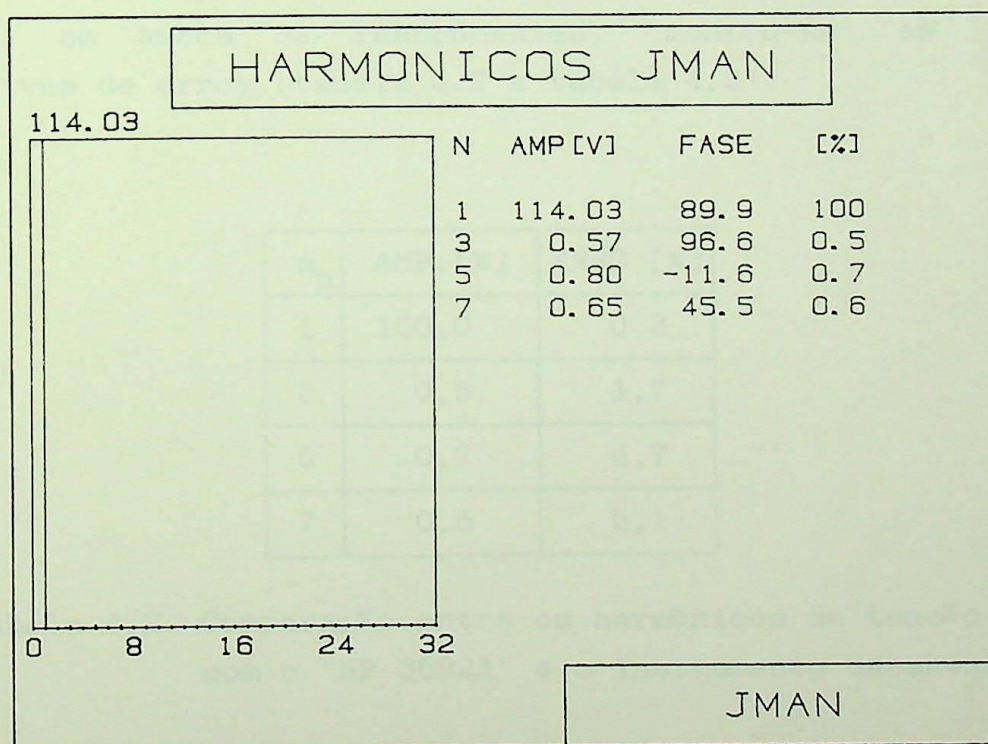


FIGURA 4.10. Espectro de tensão obtido com o instrumento desenvolvido.

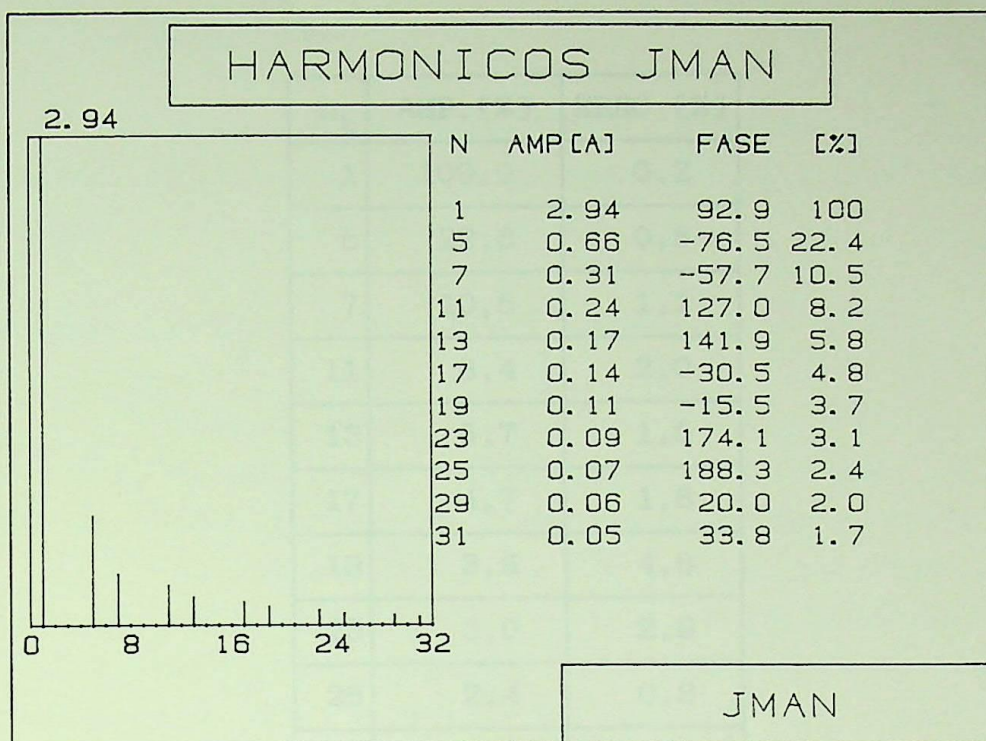


FIGURA 4.11. Espectro de corrente obtido com o instrumento desenvolvido.

Comparando-se as amplitudes harmônicas de tensão e corrente, em ambos os instrumentos, montou-se as tabelas comparativas de erros (tabela 4.2 e tabela 4.3).

n_h	AMP. [%]	ERRO [%]
1	100,0	0,3
3	0,5	1,7
5	0,7	4,7
7	0,5	5,1

Tabela 4.2. Comparação entre os harmônicos de tensão medidos com o "HP 3582A" e o instrumento desenvolvido.

n_h	AMP. [%]	ERRO [%]
1	100,0	0,2
5	22,6	0,5
7	10,5	1,1
11	8,4	2,0
13	5,7	1,5
17	4,7	1,8
19	3,6	4,8
23	3,0	2,9
25	2,4	0,8
29	1,9	5,9
31	1,6	9,3

Tabela 4.3. Comparação entre os harmônicos de corrente medidos com o "HP 3582A" e o instrumento desenvolvido.

Pela análise da tabelas pôde-se concluir que ocorrem erros superiores a 5 [%] apenas nas frequências mais elevadas e naquelas cuja amplitude em relação à amplitude da frequência fundamental é inferior a 2 [%].

5 - MEDIÇÕES REALIZADAS

Foram realizados dois ensaios (medições) em laboratório, para ilustrar os resultados obtidos com o equipamento desenvolvido, com cargas não lineares.

5.1 - MEDIÇÃO EM PONTE RETIFICADORA TRIFÁSICA

O equipamento desenvolvido foi conectado no lado AC da alimentação de uma ponte retificadora a 6 diodos, alimentando uma carga de corrente contínua conforme mostrado na figura 5.1.

As figuras 5.2, 5.3 e 5.4 foram obtidas através da impressora do equipamento desenvolvido e os gráficos das tensões e correntes das três fases (figuras 5.5 e 5.6) foram obtidos através da transferência dos respectivos vetores de pontos, pela comunicação serial, para um computador IBM PS2 e traçado em um plotter "HP 7090A".

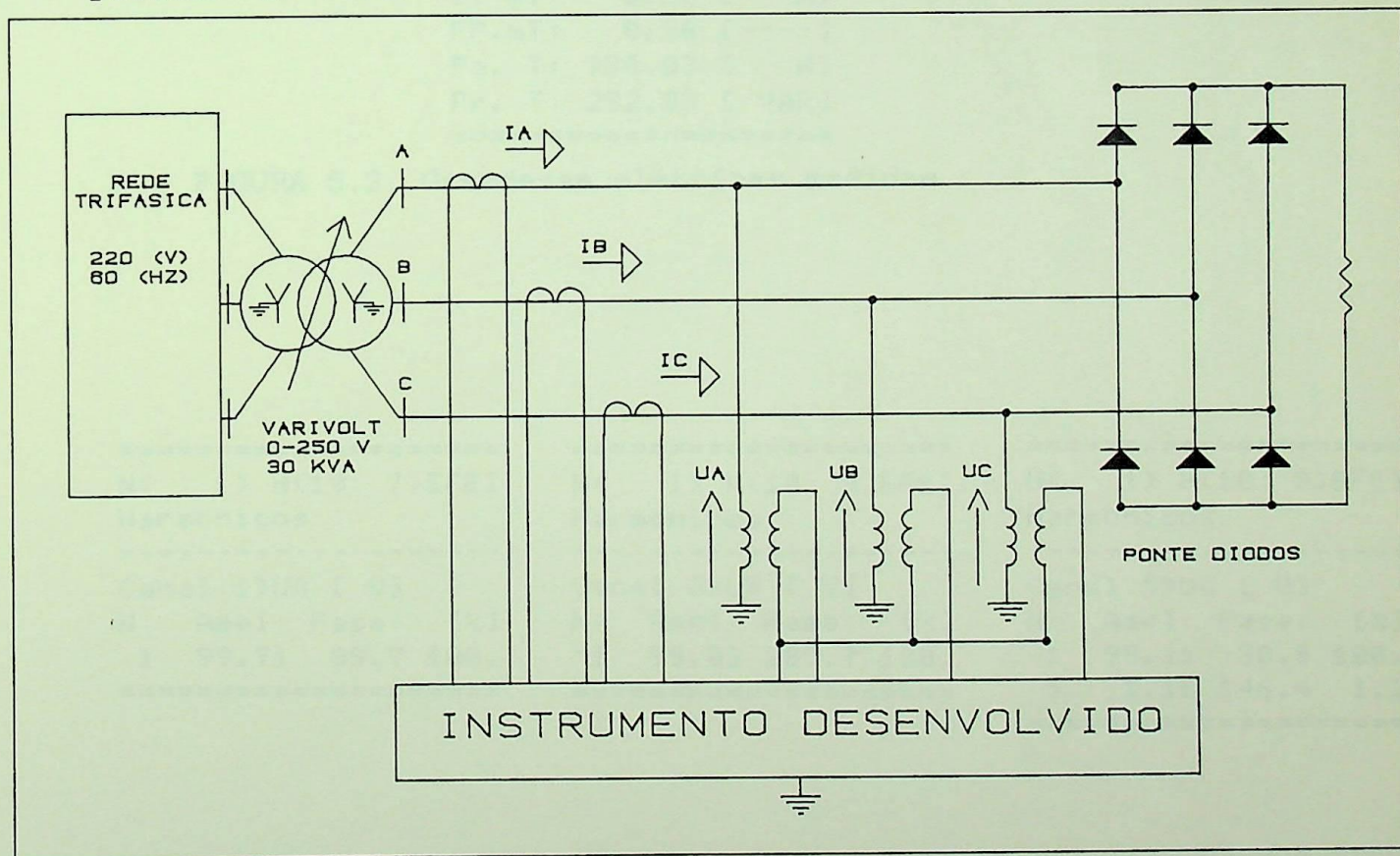


FIGURA 5.1. Sistema em análise.


```

=====
N( 1) H(10: 5)EFEI
U-I-FP-Pa-Pr :
-----
U. An: 99.38 [ V]
U. Bn: 99.58 [ V]
U. Cn: 97.76 [ V]
I. A: 3.25 [ A]
I. B: 3.32 [ A]
I. C: 3.25 [ A]
FP. A: 0.96 [----]
FP. B: 0.96 [----]
FP. C: 0.96 [----]
Pa. A: 309.31 [ W]
Pa. B: 316.29 [ W]
Pa. C: 304.42 [ W]
Pr. A: 94.07 [ VAR]
Pr. B: 96.18 [ VAR]
Pr. C: 92.57 [ VAR]
-----
U. mT: 171.31 [ V]
I. mT: 3.28 [ A]
FP.mT: 0.96 [----]
Pa. T: 930.03 [ W]
Pr. T: 282.82 [ VAR]
=====

```

FIGURA 5.2. Grandezas elétricas medidas.

=====	=====	=====
N(1) H(10: 7)EFEI	N(1) H(10: 8)EFEI	N(1) H(10: 9)EFEI
Harmonicos :	Harmonicos :	Harmonicos :
-----	-----	-----
Canal:1>UA [V]	Canal:3>UB [V]	Canal:5>UC [V]
N: Ampl: Fase: [%]	N: Ampl: Fase: [%]	N: Ampl: Fase: [%]
1 99.71 89.7 100.	1 99.03 209.7 100.	1 98.11 -30.9 100.
=====	=====	=====
		5 1.16 146.4 1.2
		=====

FIGURA 5.3. Espectro harmônico de tensão (fase A,B e C).

=====	=====	=====
N(1) H(10: 8)EFEI	N(1) H(10: 9)EFEI	N(1) H(10: 9)EFEI
Harmonicos :	Harmonicos :	Harmonicos :
-----	-----	-----
Canal:2>IA [A]	Canal:4>IB [A]	Canal:6>IC [A]
N: Ampl: Fase: [%]	N: Ampl: Fase: [%]	N: Ampl: Fase: [%]
1 3.12 91.5 100.	1 3.17 212.5 100.	1 3.12 -28.0 100.
5 0.70 -83.4 22.5	3 0.03 89.5 1.1	5 0.71 38.2 22.6
7 0.34 -78.4 10.9	5 0.69 157.6 21.9	7 0.35 163.7 11.1
11 0.28 105.8 9.0	7 0.37 41.9 11.5	11 0.28 227.9 9.1
13 0.19 111.8 6.0	11 0.26 -12.4 8.3	13 0.19 -4.1 6.2
=====	=====	=====

FIGURA 5.4. Espectro harmônico de corrente (fase A,B e C).

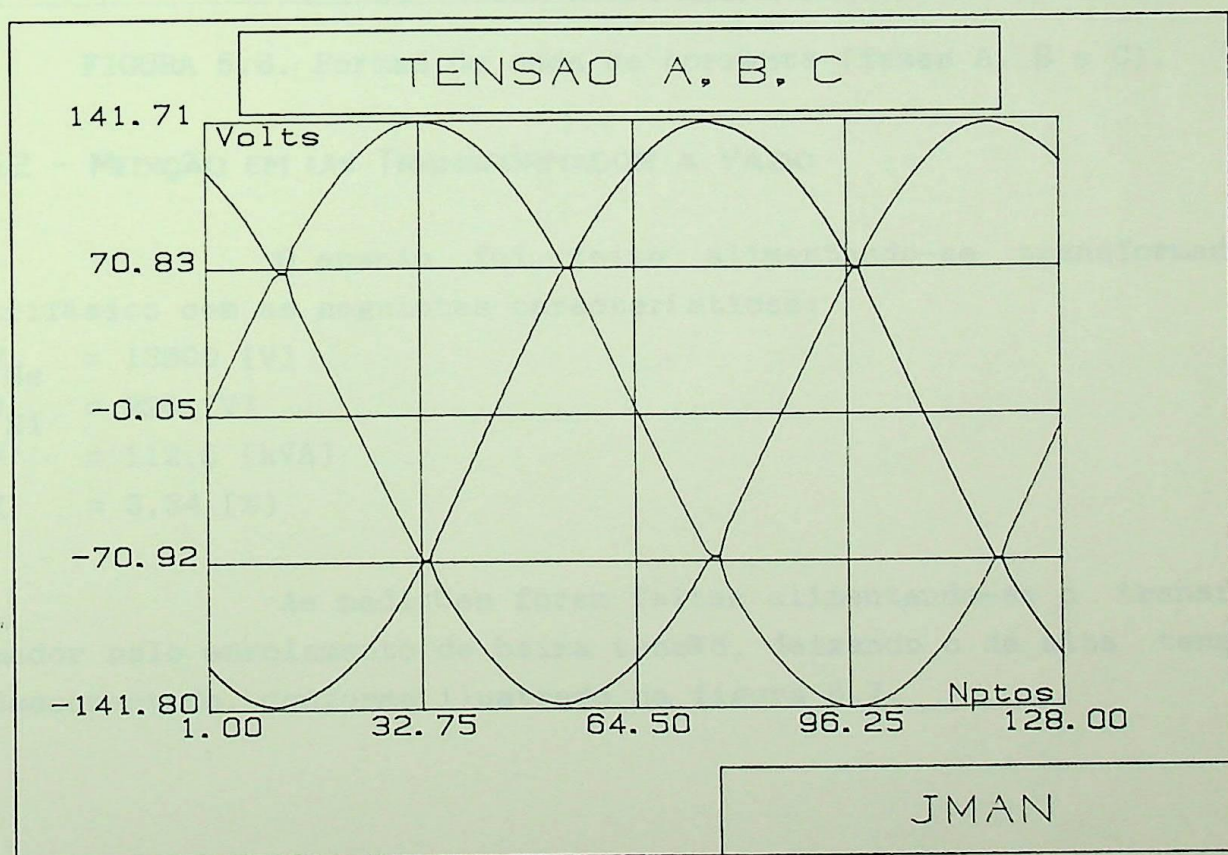


FIGURA 5.5. Formas de onda de tensão (fases A, B e C).

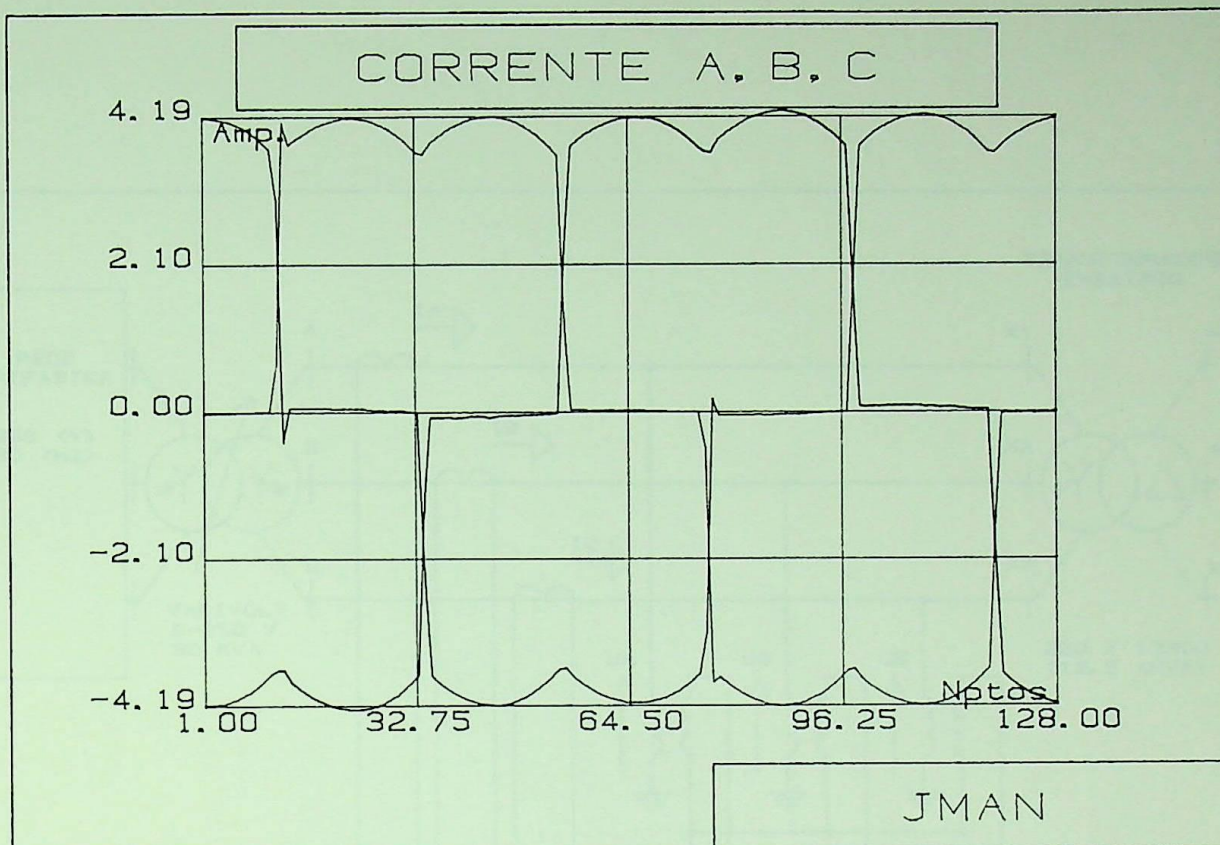


FIGURA 5.6. Formas de onda de corrente (fases A, B e C).

5.2 - MEDIÇÃO EM UM TRANSFORMADOR A VAZIO

O ensaio foi feito alimentando-se transformador trifásico com as seguintes características:

U_{Ns} = 13800 [V]
 U_{Ni} = 220 [V]
 P = 112,5 [kVA]
 X = 3,34 [%]

As medições foram feitas alimentando-se o transformador pelo enrolamento de baixa tensão, deixando o de alta tensão desconectado, conforme ilustrado na figura 5.7.

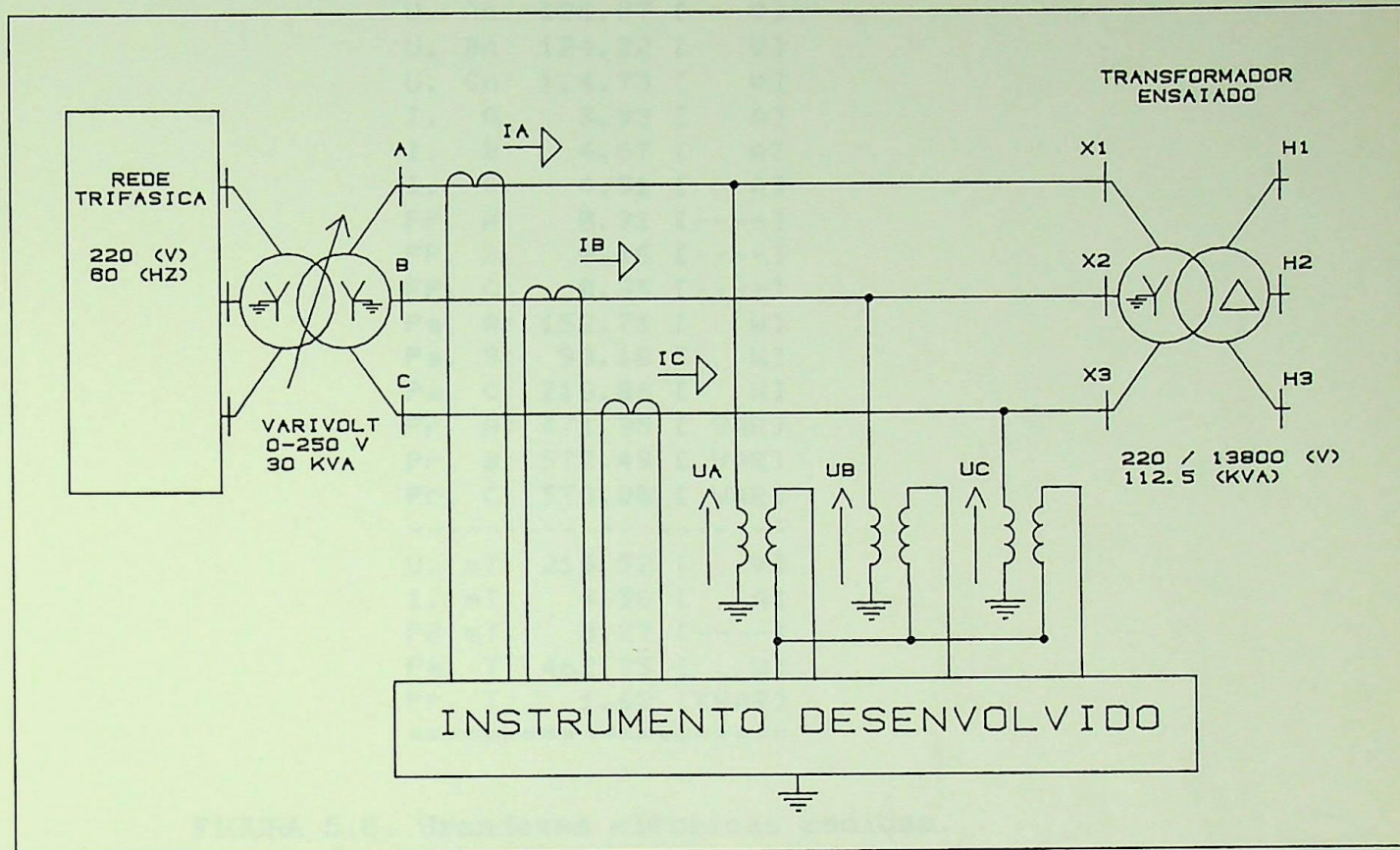


FIGURA 5.7. Sistema em análise.

O resultado das medições obtido com o instrumento desenvolvido, está ilustrado nas figuras 5.8 e 5.9 e as formas de onda obtidas, pela interface serial, nas figuras 5.10 e 5.11.


```

=====
NC  1) H(15:14)EFEI
U-I-FP-Pa-Pr :
-----
U. An: 126.07 [  V]
U. Bn: 124.22 [  V]
U. Cn: 124.73 [  V]
I.  A:   3.93 [  A]
I.  B:   4.67 [  A]
I.  C:   4.91 [  A]
FP. A:   0.31 [----]
FP. B:   0.16 [----]
FP. C:   0.35 [----]
Pa. A: 152.71 [  W]
Pa. B:  93.18 [  W]
Pa. C: 216.86 [  W]
Pr. A: 471.35 [ VAR]
Pr. B: 572.49 [ VAR]
Pr. C: 573.00 [ VAR]
-----
U. mT: 216.52 [  V]
I. mT:   4.50 [  A]
FP.mT:   0.27 [----]
Pa. T: 462.75 [  W]
Pr. T:   1.62 [KVAR]
=====

```

FIGURA 5.8. Grandezas eléctricas medidas.


```

=====
N( 1) H(15:12)EFEI
Harmonicos :
-----
Canal:1>UA [ V]
N:  Ampl: Fase:  [%]
  1 125.54  89.6 100.
-----
Canal:2>IA [ A]
N:  Ampl: Fase:  [%]
  1   3.76 160.9 100.
  3   0.55 -19.8 14.8
  5   0.66 169.3 17.5
  7   0.04 124.5  1.1
  9   0.04 -30.3  1.2
 11   0.05 175.2  1.2
-----
Canal:3>UB [ V]
N:  Ampl: Fase:  [%]
  1 124.08 -30.4 100.
-----
Canal:4>IB [ A]
N:  Ampl: Fase:  [%]
  1   4.55  50.1 100.
  3   0.06 -21.7  1.4
  5   0.69 -83.4 15.1
  7   0.10  61.3  2.3
 11   0.05 -66.3  1.1
-----
Canal:5>UC [ V]
N:  Ampl: Fase:  [%]
  1 124.42 209.5 100.
  3   1.43  37.4  1.1
-----
Canal:6>IC [ A]
N:  Ampl: Fase:  [%]
  1   4.74 -81.9 100.
  3   0.62 160.6 13.1
  5   0.79  44.3 16.7
  7   0.13 259.6  2.7
=====

```

FIGURA 5.9. Espectro harmónico medido.

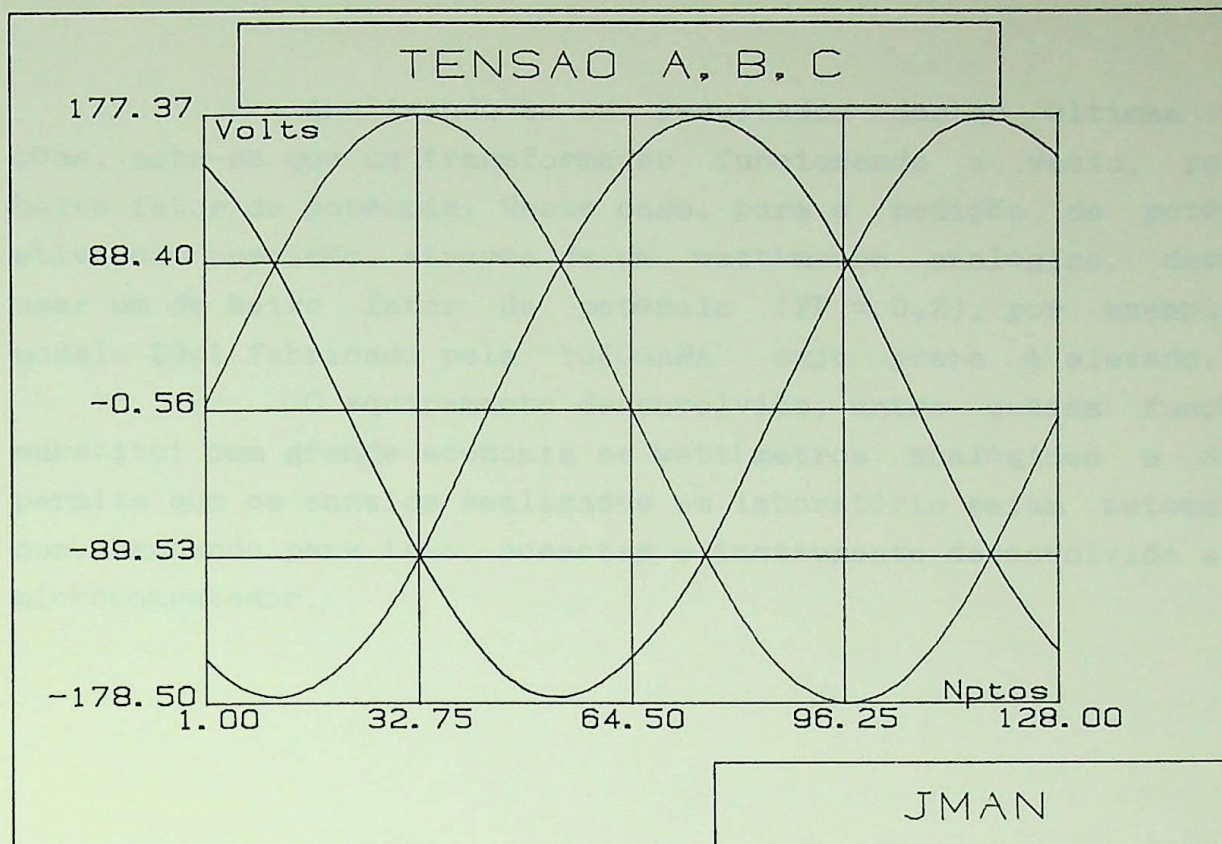


FIGURA 5.10. Formas de onda de tensão (fases A, B e C).

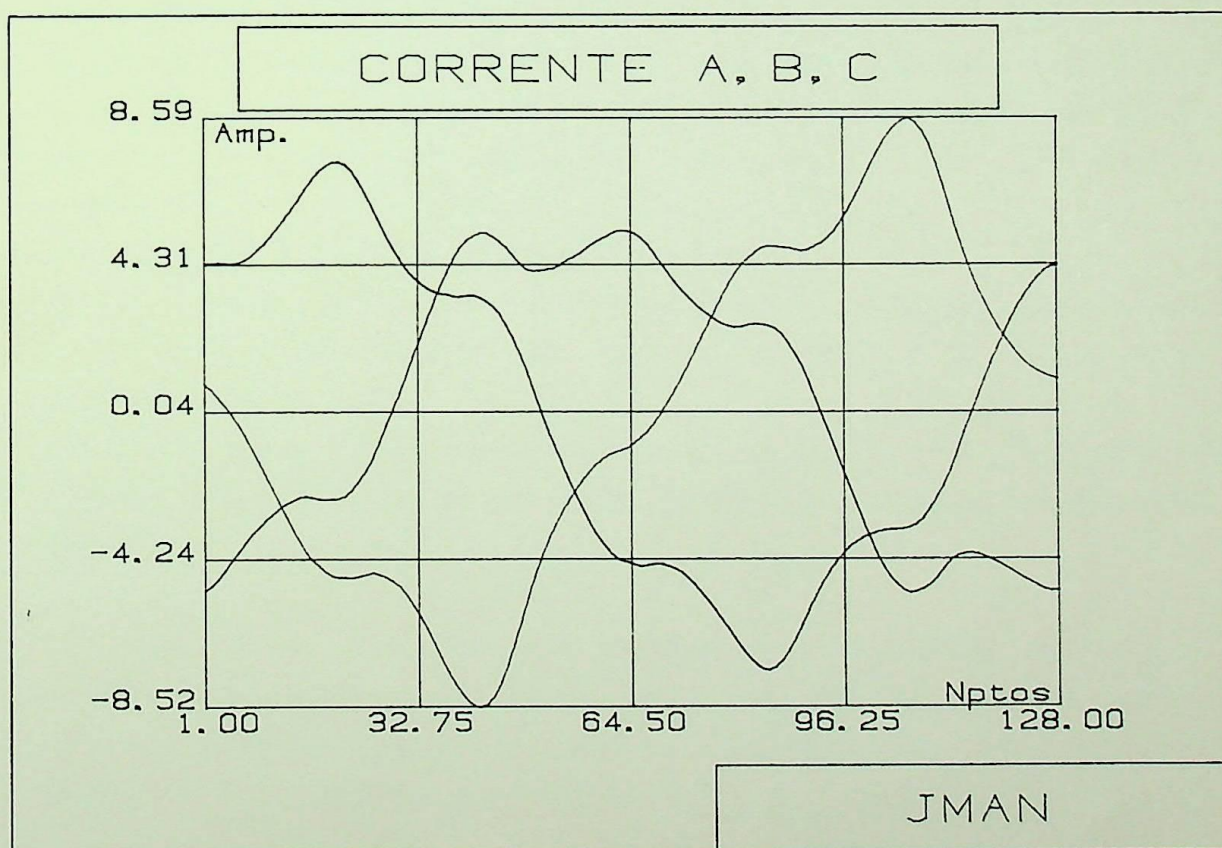


FIGURA 5.11. Formas de onda de corrente (fases A, B e C).

Analisando-se os resultados destas últimas medições, nota-se que um transformador funcionando a vazio, possui baixo fator de potência. Neste caso, para a medição de potência ativa com precisão, através de um wattímetro analógico, deve-se usar um de baixo fator de potência ($FP = 0,2$), por exemplo o modelo 2041 fabricado pela "YOKOGAWA" cujo preço é elevado.

O equipamento desenvolvido, entre outras funções, substitui com grande economia os wattímetros analógicos e ainda permite que os ensaios realizados em laboratório sejam automatizados, bastando para isso, conectar o instrumento desenvolvido a um microcomputador.

6 - CONCLUSÕES

Após extensivos ensaios, utilizando o instrumento em laboratório, conseguiu-se aprimorar tanto a parte de circuitos ("hardware") quanto a de programa ("software"), de forma a alcançar os objetivos iniciais do projeto, ou seja, um instrumento de fácil manuseio, de pequenas dimensões, de baixo custo e que reforça os equipamentos nacionais para análise de sistemas elétricos com formas de onda distorcidas.

O instrumento é ideal para ser usado em campo, pelo engenheiro ou técnico em medições de sistemas elétricos. Também substitui, com grande vantagem, os instrumentos analógicos usados em laboratório, nos ensaios de transformadores, motores de indução e conversores estáticos.

Como sugestão, o instrumento pode ser aperfeiçoado nos seguintes pontos:

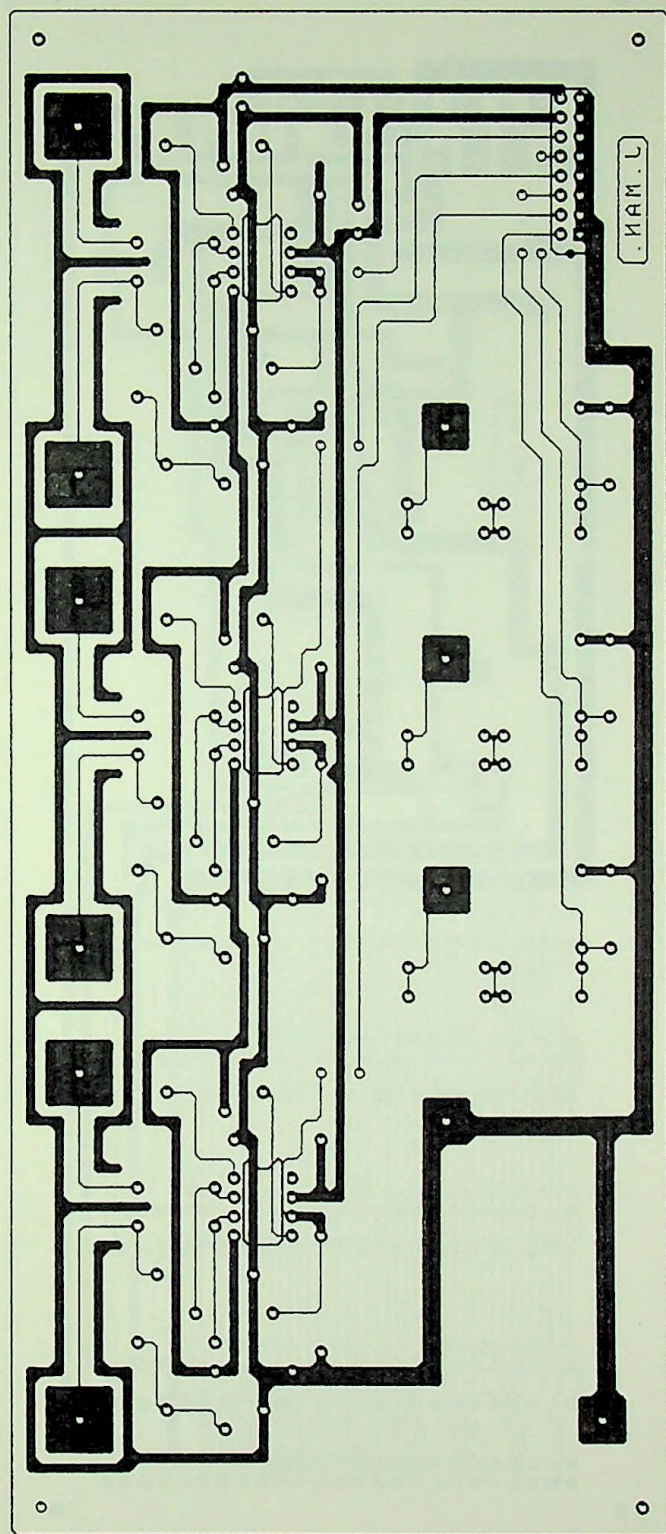
- troca da CPU Z80A pela Z80H e aumento da velocidade de sincronismo ("clock") para 8[MHz];
- troca do conversor A/D AD7572/12 com tempo de conversão de 12[μ s] pelo conversor A/D AD7572/05 com tempo de conversão de 5[μ s];
- aumento do número de amostras, por ciclo, de 128 para 256 pontos;
- cálculo até o harmônico de 64^a ordem;
- troca do visor alfanumérico por um visor gráfico, possibilitando a análise das formas de onda de tensão e corrente no instrumento;
- desenvolvimento de novas funções de cálculo como, por exemplo, a medição da corrente de partida em função do tempo em motores de indução.

Como o instrumento possui um conector ("slot") de expansão disponível, pode ser desenvolvida mais uma placa de circuito impresso, possibilitando ao instrumento fazer o comando e a proteção em máquinas elétricas.

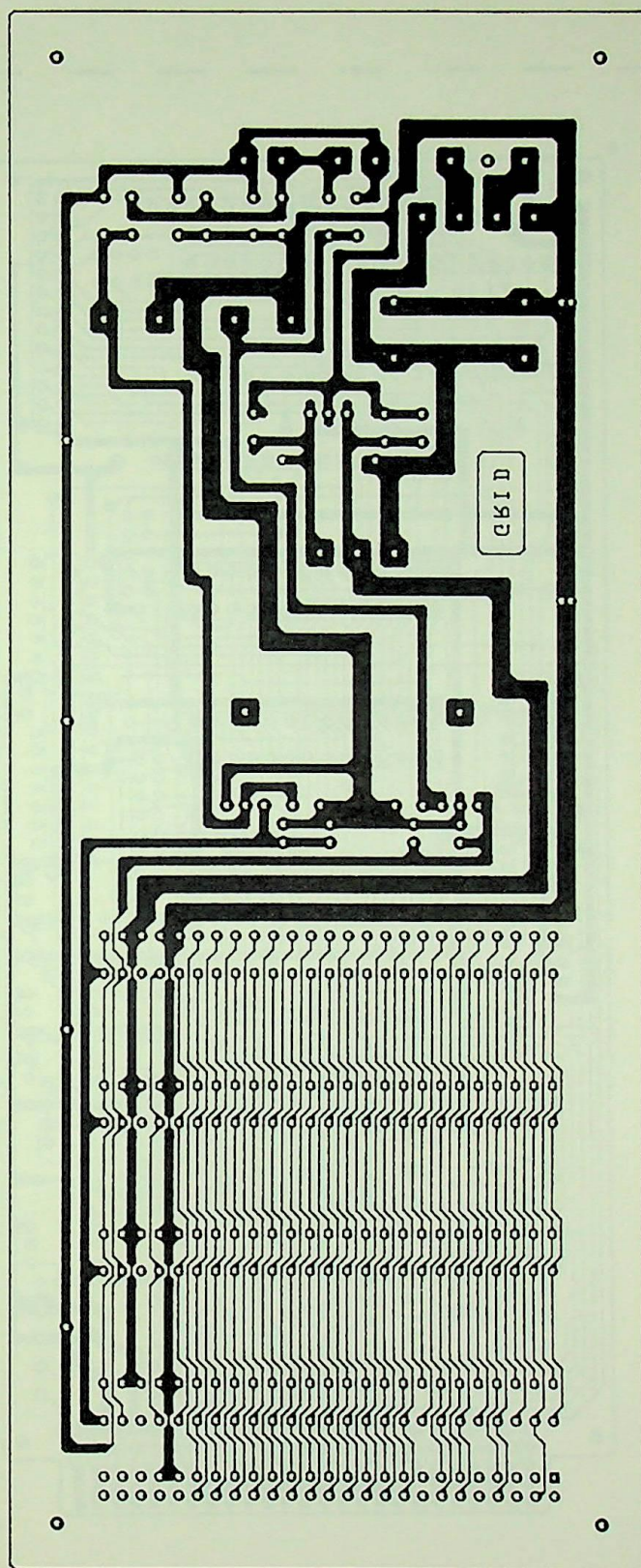
7 - BIBLIOGRAFIA

- [1] Hill, J.; Alderson, W.E.: Design of a Microprocessor-Based Digital Wattmeter. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. IECI-28, No. 3, August 1981, pp. 180-184.
- [2] Corney, A.C.; Pullman, R.T.: Digital Sampling Laboratory Wattmeter. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. IM-36, No. 1, March 1987, pp. 54-59.
- [3] Turgel, R.S.: Digital Wattmeter Using a Sampling Method. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. IM-23, No. 4, December 1974, pp. 337-341.
- [4] Stenbakken, G.N.: A Wideband Sampling Wattmeter. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 10, October 1984, pp. 2919-2926.
- [5] Ciarcia, S.: Construa o seu Próprio Computador Usando o MP-Z80. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1984.
- [6] TTL - Databook - Texas Instruments - 1988.
- [7] CMOS - Databook - Texas Instruments - 1988.
- [8] Data Conversion Products Databook - Analog Devices - 1988.
- [9] Brigham, E.O.; Marrow, R.E.: The Fast Fourier Transform, IEEE Spectrum, December 1967.
- [10] Cooley, J.W.; Tukey, J.W.: An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series, Math Computation, vol. 19, pp. 297-301, April, 1965.
- [11] Cypriano, L.B.; Cardinali, P.R.: Microprocessador Z80, Hardware, Vol. 1, 4^a Edição, Editora Érica, São Paulo, 1983.
- [12] Cypriano, L.B.: Z80 Software, Vol. II, Editora Érica, São Paulo, 1983-1984.
- [13] Filho, S.M.: Fundamentos de Medidas Elétricas, 2^a Edição, Guanabara, 1968, Rio de Janeiro.
- [14] Filipski, P.S.; Ansenean, R.: Definition and Measurement of Apparent Power Under Distorted Waveform Conditions. Proceedings of the 3rd International Conference on Harmonics in Power Systems, 28/09 a 01/10/89, Nashville, Indiana, USA.

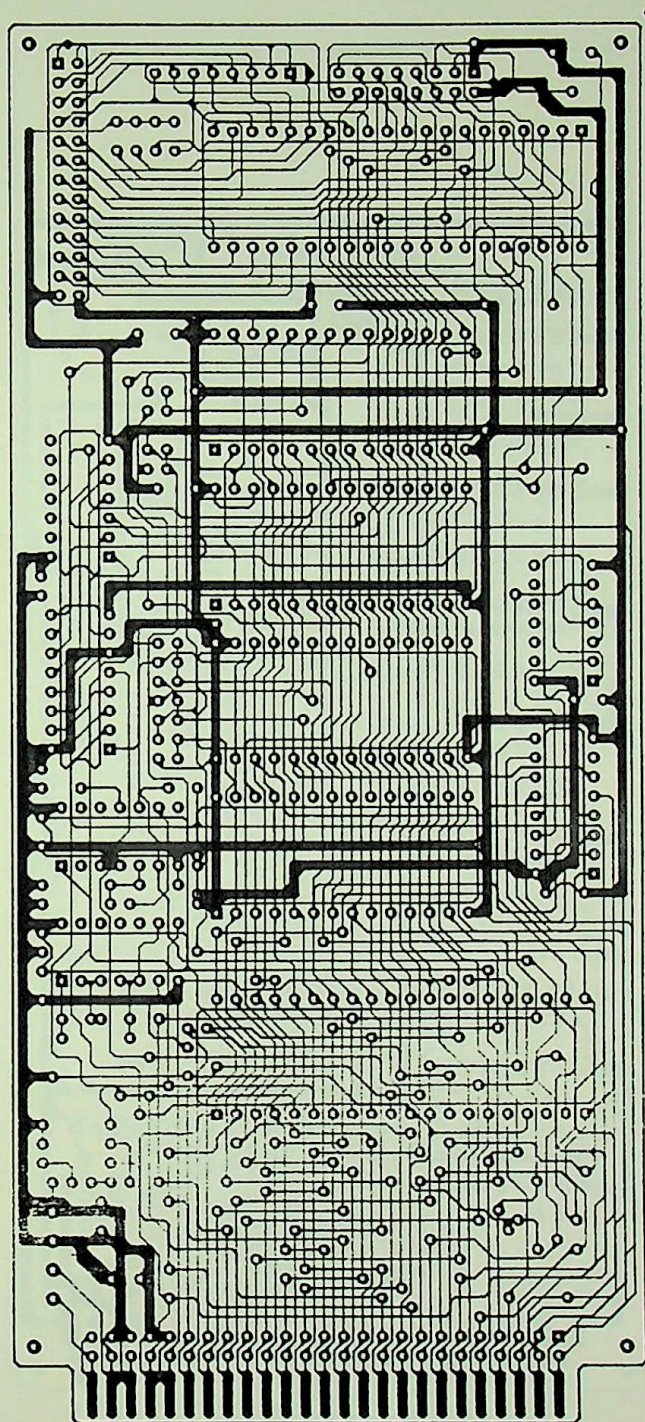
ANEXO A
"LAY-OUT" DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO



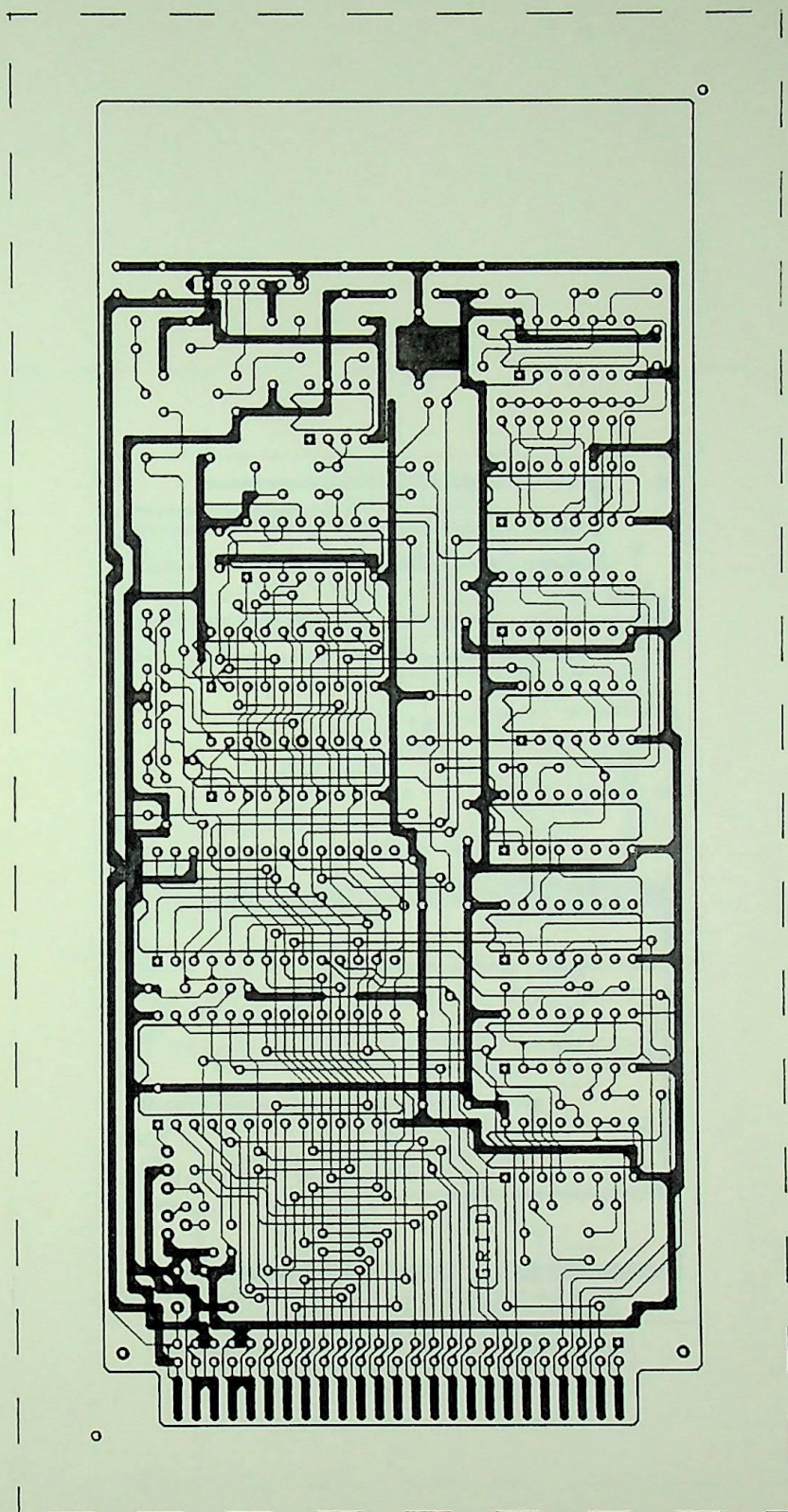
"Lay-out" da placa 1 de circuito impresso



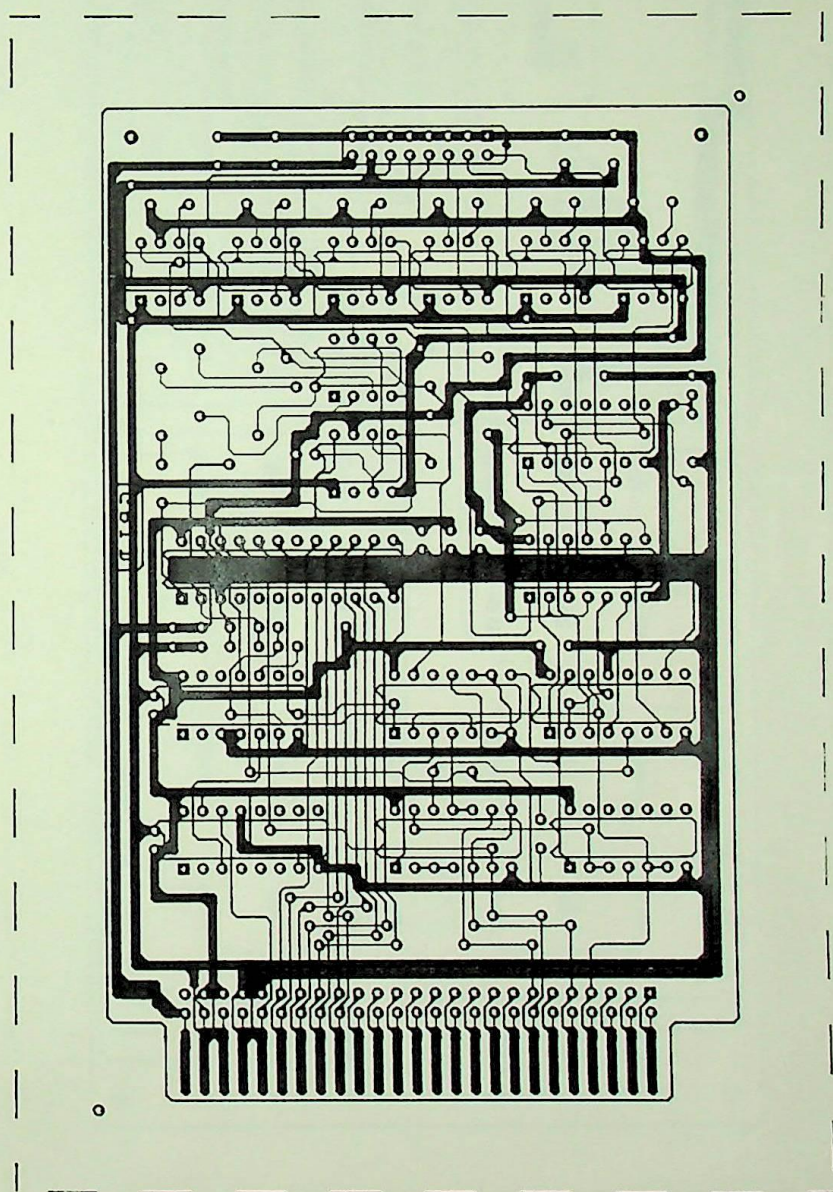
"Lay-out" da placa 2 de circuito impresso



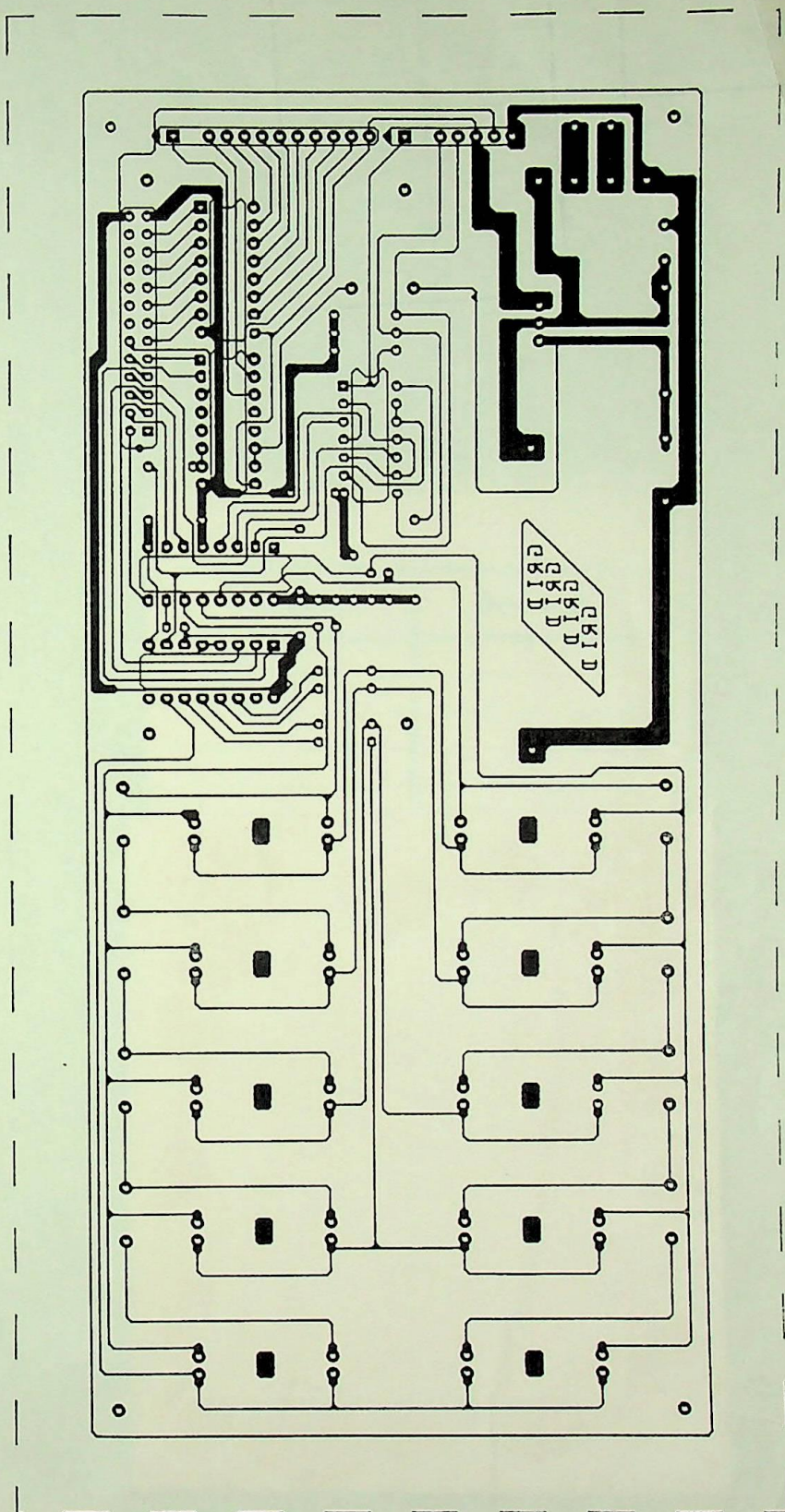
"Lay-out" da placa 3 de circuito impresso



"Lay-out" da placa 4 de circuito impresso



"Lay-out" da placa 5 de circuito impresso



"Lay-out" da placa 6 de circuito impresso

DATA	/	/19
PROC.		
PED.		
LIV.		
RS		

I V M O BIB - EFEI	
DATA	Rubrica

Tombo 662

621.317.71621.3.049.77(043.2)

EFEI / Biblioteca Mauá

Vicente, J: M. E. V632d

Desenvolvimento de um
instrumento ^{digital} para medição
de grandezas eletricas...

da	N.º Registro	Data Devo
Ricardo Mollins		15

EFEI

BIBLIOTECA MAUÁ

Esta publicação deverá ser devolvida
dentro do prazo estipulado.

O leitor é responsável pela publicação
em seu poder.

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ

8200662



NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA