UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DESENVOLVIMENTO E TESTES DE SISTEMA SISMOGRÁFICO DE ALTA RESOLUÇÃO

Fabio Taioli

Orientador: Prof. Dr. Nelson Ellert

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

SÃO PAULO
1992

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC
30900005770

DESENVOLVIMENTO E TESTES DE SISTEMA SISMOGRÁFICO DE ALTA RESOLUÇÃO

FABIO TAIOLI

Orientador: Prof. Dr. Nelson Ellert

Instituto de Geociências
BIBLIOTECA
+1099
U.S.P.

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências junto ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo

SÃO PAULO

1992

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DESENVOLVIMENTO E TESTES DE SISTEMA SISMOGRÁFICO DE ALTA RESOLUÇÃO

Fabio Taioli

Instituto de Geociências
BIBLIOTECA
T 1099
U. S. P.

Orientador: Prof. Dr. Nelson Ellert

TESE DE DOUTORAMENTO

COMISSÃO JULGADORA

	nome	ass.
Presidente:	Dr. N.Ellert	
Examinadores:	Dr. J.A.B.Gomez	
	Dr. F.Y.Hiodo	
	Dr. J.K.Yamamoto	
	Dr. J.M.B.Mendes	

São Paulo
1992

AGRADECIMENTOS

Este trabalho só foi possível graças à colaboração de várias pessoas e instituições, às quais desejo externar meu reconhecimento.

Ao Prof. Dr. Nelson Ellert, meu orientador, pelas suas sugestões, críticas e empenho em tornar este trabalho possível.

Ao Prof. Dr. John Greenhouse da University of Waterloo, Canadá, que desde o início acreditou na idéia do sistema proposto.

Ao Prof. Dr. José Eduardo Siqueira Farjallat, pelas críticas construtivas e estímulo.

Ao Prof. Dr. José Milton Benetti, pelas suas sugestões e críticas que muito auxiliaram na fase final deste estudo.

Ao Prof. Dr. Aldo da Cunha Rebouças, diretor do Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas - CEPAS, pelo seu empenho na concessão de recursos para a usinagem dos acelerômetros, e para os trabalhos de campo.

Ao Prof. Dr. Jorge Kazuo Yamamoto, pelo incentivo e valiosas sugestões no desenvolvimento do programa de controle e na interface com sistemas de processamento.

Ao Engº. Vilmondes Ribeiro, que implementou e acompanhou os testes dos circuitos de amplificadores, filtros, interfaces, etc., adotando uma postura essencialmente crítica em todas fases do trabalho, o que muito contribuiu para melhorar e valorizar o desempenho do sistema.

Ao colega João Carlos Dourado, pelo seu estímulo e participação nos testes iniciais e comparativos.

Ao colega Nicolau Palm, que, durante vários anos de trabalho em conjunto, compartilhou de muitas das idéias apresentadas nesta tese, e pela sua avaliação crítica do sistema.

Ao colega George Schneider, da University of Waterloo, pelas sugestões de "hardware" e pelo auxílio no processamento dos dados do trabalho efetuado em Mogi Guaçu.

Aos colegas Adalberto Aurélio Azevedo e Antonio Joaquim M. Sampaio pelo empenho em tornar possível o teste de campo em Mogi Guaçu.

Aos técnicos Joaquim Ireno e José Pedro Burato Júnior., que dedicadamente auxiliaram, em suas horas de descanso, na montagem e nos testes do sistema, participando também dos trabalhos de campo.

À colega Débora Fiuza de Figueiredo Orsi, pela revisão ortográfica e gramatical desta tese.

À CESP - Centrais Energéticas de São Paulo, pelo custeio das despesas de campo durante o trabalho em Mogi Guaçu.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, que me deu a oportunidade de desenvolver e aplicar, em inúmeros projetos, vários dos conceitos aqui utilizados.

A todos os amigos e colegas que direta ou indiretamente me encorajaram e auxiliaram para que este trabalho fosse realizado.

Finalmente, desejo expressar meus agradecimentos especiais a minha esposa, Maria Isabel, por todo o apoio, estímulo e dedicação, e a minha filha Juliana, pelo incentivo e disponibilidade, e por ter renunciado, nesse período, a inúmeras horas de maior convivência familiar.

SUMÁRIO

Página

1. INTRODUÇÃO
1.1 Generalidades 1
1.2 Apresentação do Problema 1
1.3 Objetivos do Trabalho 2
1.4 Estruturação da Tese 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E HISTÓRICO
2.1 Generalidades 4
2.2 Equipamentos Sismográficos 4
2.3 Sensores 7
2.4 Comentários e Conclusões 10

3. PROPOSTA DE UM NOVO EQUIPAMENTO
3.1 Generalidades 12
3.2 Arquitetura do Sistema Proposto 12
3.2.1 Sensor 12
3.2.2 Amplificador e filtros 17
3.2.3 Conversor analógico-digital 17
3.2.4 Microcomputador tipo IBM-PC 20
3.2.5 Cabo sismográfico 21
3.2.6 Programa de controle 21
3.3 Comentários e Conclusões 22

4. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO
4.1 Generalidades 23
4.2 Protótipo Desenvolvido 23
4.2.1 Sensor 24
4.2.2 Conversor analógico-digital 31
4.2.3 Microcomputador tipo IBM-PC 32
4.2.4 Amplificador e filtros 33
4.2.5 Cabo sismográfico 44
4.2.6 Programa de controle 52
4.3 Teste do Sistema 57
4.4 Comentários e Conclusões 57

5. TESTE DO SISTEMA EM CAMPO
5.1 Generalidades 58
5.2 Testes de Operacionalidade 58
5.3 Teste Comparativo 61
5.4 Trabalho de Campo 66
5.4.1 Situção geologicamente conhecida 66
5.4.2 Situação geologicamente desconhecida 71
5.5 Conclusões 79

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS
6.1 Generalidades 81
6.2 Conclusões 81
6.3 Sugestões Para Novas Pesquisas 82

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 83

ANEXO 1 87
ANEXO 2 98
ANEXO 3 107

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS Página

1 - Diagrama de blocos simplificado de sistema sismográfico digital convencional (p.e., Bison 5000). A linha interrompida delimita o sismógrafo propriamente dito. 8

2 - Diagrama de blocos simplificado de sistema sismográfico digital produzido pela Scintrex (ECHO S-2). A linha interrompida delimita o sismógrafo propriamente dito. 9

3 - Diagrama de blocos simplificado de sistema sismográfico proposto neste trabalho. A linha interrompida delimita o sismógrafo propriamente dito. 13

4 - Diagrama esquemático de um geofone típico (de bobina móvel). 14

5 - Diagrama esquemático de um típico acelerômetro (Brüel & Kjaer, 1978). 16

6 - Corte esquemático do acelerômetro piezoelétrico desenvolvido e utilizado neste trabalho. 25

7 - Diagrama elétrico esquemático do pré-amplificador utilizado internamente no acelerômetro piezoelétrico. 26

8 - Configuração experimental utilizada no desenvolvimento e testes do acelerômetro piezoelétrico. 27

9 - Resposta em freqüências de DC a 20 kHz do acelerômetro piezoelétrico desenvolvido e utilizado neste trabalho. 28

10 - Resposta em freqüências de DC a 5 kHz do acelerômetro piezoelétrico desenvolvido e utilizado neste trabalho. 29

11 - Resposta em freqüências de DC a 2 kHz do acelerômetro piezoelétrico desenvolvido e utilizado neste trabalho. 30

12 - Diagrama elétrico esquemático do filtro corta-baixas utilizado no protótipo desenvolvido. 34

13 - Diagrama elétrico esquemático do filtro corta-altas utilizado no protótipo desenvolvido. 35

14 - Diagrama elétrico esquemático do filtro "notch" desenvolvido e utilizado neste trabalho. 37

15 - Diagrama elétrico esquemático da fonte de alimentação do sistema (a superior de +8 V e a inferior de -8 V). 38

16 - Diagrama de blocos da montagem experimental utilizada para testes da resposta dinâmica dos amplificadores e filtros. 39

17 - Resposta em freqüência dos filtros 20 Hz e 1000 Hz. A parte superior mostra o sinal registrado no domínio do tempo, e a parte inferior seu conteúdo em freqüências. 40

18 - Resposta em freqüência dos filtros 20 Hz, "notch" e 1000 Hz. A parte superior mostra o sinal registrado no domínio do tempo, e a parte inferior seu conteúdo em freqüências. 41

19 - Resposta em freqüência dos filtros 200 Hz e 1000 Hz. A parte superior mostra o sinal registrado no domínio do tempo, e a parte inferior seu conteúdo em freqüências. 42

20 - Resposta em freqüência dos filtros 200 Hz, "notch" e 1000 Hz. A parte superior mostra o sinal registrado no domínio do tempo, e a parte inferior seu conteúdo em freqüências. 43

21 - Diagrama de blocos da montagem experimental utilizada para testes dos acelerômetros em conjunto com os amplificadores e filtros. 45

22 - Resposta em freqüência dos filtros 20 Hz e 1000 Hz em conjunto com acelerômetro. 46

23 - Detalhe da resposta em freqüência dos filtros 20 Hz e "notch" em conjunto com acelerômetro. 47

24 - Resposta em freqüência dos filtros 200 Hz e 1000 Hz em conjunto com acelerômetro. 48

25 - Diagrama de fase dos filtros 20 Hz e 1000 Hz em conjunto com acelerômetro. 49

26 - Diagrama de fase dos filtros 20 Hz, "notch" e 1000 Hz em conjunto com acelerômetro. 50

27 - Diagrama de fase dos filtros 200 Hz e 1000 Hz em conjunto com acelerômetro. 51

28 - Diagrama esquemático do cabo sismográfico desenvolvido e utilizado neste trabalho. 53

29 - Menu de opções apresentado pelo programa de controle na inicialização do sistema. 54
30 - Registro obtido em testes de campo efetuados na Cidade Universitária "Armando de Salles Oliveira". 60
31 - Registro obtido em testes de campo efetuados às margens da represa Guarapiranga - SP. 62
32 - Registro obtido com o sistema Bison durante os testes comparativos. 64
33 - Registro obtido com o sistema desenvolvido, durante os testes comparativos com sistema comercial. 65
34 - Mapa da Hidrogeologia do Campus "Armando de Salles Oliveira" (Iritani, 1989). 67
35 - Seção gravimétrica da área estudada. Adaptada de Ussami (1991). 68
36 - Esquema da cobertura em subsuperfície obtida na linha executada no "campus" da Cidade Universitária. 69
37 - Seção final, após o processamento, obtida no trabalho no Campus "Armando de Salles Oliveira". 70
38 - Seção geológica da área estudada no Campus "Armando de Salles Oliveira" baseada em dados sísmicos. 72
39 - Planta de situação da área estudada em Mogi Guaçu. 74
40 - Geologia da seção "E", transversal ao canal de fuga, baseada nos dados das sondagens realizadas. 75
41 - Registro típico obtido durante o trabalho de campo em Mogi Guaçu. 76
42 - Seção final, após o processamento, obtida no trabalho em Mogi Guaçu. 78
43 - Seção geológica da área estudada em Mogi Guaçu, baseada em dados sísmicos. 80
44 - Analogia mecânica comumente utilizada para demonstrar o funcionamento de um acelerômetro piezoelétrico. 100
45 - Circuito equivalente de um acelerômetro conectado a um pré-amplificador de voltagem. 103

FOTOS página

1 - Detalhe do gabinete dos amplificadores, filtros, fontes de alimentação e bterias do sismógrafo desenvolvido. 88
2 - Detalhe dos "jumpers" de seleção dos filtros corta-baixas e "notch". 88
3 - Compartimento dos filtros e amplificadores com tampa para isolamento contra ruído elétrico. 89
4 - Aspecto do gabinete do sismógrafo em uso normal. 89
5 - Detalhe da tomada do cabo sismográfico para conexão do acelerômetro. 90
6 - Acelerômetro conectaado ao cabo sismográfico, ao lado da maleta de trnsporte dos acelerômetros. 90
7 - Detalhe do carregamento do "Buffalo gun" com cartucho calibre 12. 91
8 - "Buffalo gun" sendo introduzido no ponto de tiro. 91
9 - Detalhe do "Buffalo gun" sendo disparado. Observar a pastilha piezoelétrica, geradora do sinal de "trigger" na manopla. 92
10 - Caixa do amplificador do sinal de "trigger" proveniente da pastilha piezoelétrica da manopla do "Buffalo gun". 92
11 - Detalhe do sistema de alimentação utilizado para os trabalhos de campo. Composto de duas baterias ligadas em série e um conversor de 24 Volts DC para 110 Volts AC. 93
12 - Sistema sismográfico completo, pronto para trabalhos de campo. 93
13 - Sistema montado no porta bagagens de uma perua Kombi, durante os testes iniciais às margens da represa Guarapiranga. Pode-se observar também o sistema Bison sendo utilizado concomitantemente. 94
14 - Linha de sensores utilizados nos testes na represa da Guarapiranga. Pode-se observar os acelerômetros e os geofones convencionais. 94

15 - Detalhe de acelerômetro ao lado de geofone convencional durante testes comparativos com sistema comercial. 95

16 - Vista panorâmica da região estudada em Mogi Guaçu. Pode-se observar os matacões presentes, inclusive incrustados no talude. 96

17 - Detalhe de trator removendo matacãO na região estudada em Mogi Guaçu. 96

18 - Detalhe de matacão encontrado durante escavação na região estudada. 97

19 - Arranjo de geofones utilizado para o trabalho de Mogi Guaçu. 97

RESUMO

Este trabalho apresenta o projeto, desenvolvimento e testes, tanto de laboratório como de campo, de um sistema sismográfico para utilização em trabalhos de sísmica aplicada à engenharia, hidrogeologia e meio ambiente, baseado na eletrônica incorporada em um microcomputador tipo IBM-PC.

Desenvolveram-se, como sensores, acelerômetros piezoelétricos especiais para uso em sismografia, assim como amplificadores e filtros para atenderem às exigências impostas por aquelas aplicações. O interfaceamento com o microcomputador é feito por intermédio de uma placa de expansão conversora A/D (analógico-digital), e a velocidade necessária para a obtenção de altas freqüências foi conseguida utilizando-se o DMA ("direct memory access" - acesso direto à memória), disponível no microcomputador tipo IBM-PC. Para isto, foi desenvolvido um programa de controle que, além de se utilizar do DMA, emula as funções normais e o modo de operação de um sismógrafo digital convencional.

Foram efetuados diversos testes de laboratório em cada parte do sistema. O acelerômetro apresentou comportamento linear (dentro de ± 0,5 dB, entre 10 Hz e 2000 Hz). Os amplificadores e filtros acompanharam a mesma linearidade, entre 20 Hz e 1000 Hz.

Testes de campo mostraram a operacionalidade, enquanto testes comparativos com o sistema comercial evidenciaram a confiabilidade do sistema.

Dois trabalhos em situações geológicas distintas foram efetuados empregando-se o sistema desenvolvido. O primeiro consistiu na definição de suposta estrutura presente na Cidade Universitária "Armando de Salles Oliveira". O segundo trabalho objetivou a definição de matacões em meio a saprolito, na região da obra "Aproveitamento Múltiplo do Rio Mogi Guaçu". Em ambos os casos foi possível, utilizando-se os dados obtidos, resolver os problemas em questão.

Conclui-se que o sistema é factível, a relativo baixo custo, e atende às necessidades básicas para os trabalhos de sísmica aplicada à engenharia, hidrogeologia e meio ambiente. Sugere-se, como tema de pesquisa futura, que a mesma arquitetura seja adotada para outros instrumentos geofísicos.

ABSTRACT

This thesis presents the design and development of a prototype, as well as laboratory and field tests of a seismograph system aimed at working on seismic applied to engineering, hydrogeology and environmental problems. The system is based on the in board electronic of an IBM-PC type microcomputer.

The sensors developed are piezoelectric accelerometers specially designed to be used in seismography as well as the amplifiers and filters. The interfacing with the microcomputer is accomplished by an A/D (analog to digital) converter board. The acquisition velocity to record high frequencies was obtained by using the DMA (direct memory access) available in the microcomputer. Control software was developed to allow the use of the DMA, and to simulate the normal functions of a standard digital seismograph.

Several laboratory tests were carried out. The accelerometers showed a linear behavior (± 0.5 dB, between 10 Hz and 2000 Hz), and the amplifiers and filters the same linearity between 20 Hz and 1000 Hz.

Field tests comparing te system developed with commercial equipment presented good correlation.

Two studies on distinct geological situations were conducted and, based on the data acquired, was possible to solve both problems.

Finally, it can be concluded that the system proposed and developed is feasible, for a relatively low cost, and is suitable to attend the objectives of seismic work applied to engineering, hydrogeology and environmental problems. It can also be suggested that the same architecture is used in other geophysical instruments.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Generalidades

O termo "sismógrafo" é originado do grego (*seismós* + *grafo*), significando o instrumento que registra os tremores da Terra ou abalos sísmicos (Holanda Ferreira, 1975). A utilização de sismógrafos para o registro de terremotos é bastante antiga, podendo-se encontrar referências de seu uso pelos chineses em 132 DC. (in Shayani, 1979).

Durante o século passado, um grande desenvolvimento desses instrumentos permitiu melhor observação dos fenômenos sísmicos, tornando possível a determinação da estrutura interna da Terra, baseada na diferença de velocidade e no modo de propagação de diferentes ondas sísmicas (Wolff and Mercanti, 1974).

No início do presente século, iniciou-se a utilização do método sísmico com o objetivo da exploração mineral (Born, 1960). De maneira muito rudimentar, pode-se explicar o método como sendo o registro de sismogramas obtidos a partir de um sismo artificial, o qual é gerado normalmente por uma súbita liberação de energia. A onda sísmica provocada por esta liberação de energia propaga-se pelo interior da terra, sendo refletida e refratada, dependendo das características físicas das rochas presentes; e a energia que retorna à superfície é registrada por sensores chamados de geofones. A análise desses registros permite a determinação do tempo de percurso da onda sísmica desde o ponto de sua geração até que chegue aos geofones. Com um conhecimento geológico e estratigráfico prévio, torna-se possível a determinação da profundidade dos horizontes refletores ou refratores e, conseqüentemente, a presença de estruturas geológicas em subsuperfície.

A maior utilização dos métodos sísmicos (principalmente a reflexão) tem sido na prospecção de hidrocarbonetos.

1.2 Apresentação do Problema

Os sistemas sismográficos comercializados atualmente carregam uma grande complexidade tecnológica e, devido à sua alta especialização e relativa pequena demanda, apresentam custo

elevado (variando de US$ 20.000,00 a US$ 300.000,00).

Nota-se, atualmente, uma grande possibilidade de utilização de métodos sísmicos em projetos de pequena envergadura, tanto no setor de exploração mineral como no apoio a obras de engenharia civil, mineira e problemas de meio ambiente. No entanto, a utilização das técnicas sismográficas a esses tipos de problemas ainda é tímida, podendo ser apontada como uma das causas a necessidade de imobilização de grande capital em um equipamento que terá utilização eventual. Acrescente-se a este fator a necessidade que o sistema seja de alta resolução (para trabalhos em engenharia e geotecnia, ou em casos de contaminação do meio ambiente), sendo capaz de manipular freqüências de até 1000 Hz. Isto faz com que, além do sistema de aquisição de dados propriamente dito, os sensores sejam especiais e, conseqüentemente, de custo maior.

1.3 Objetivos do Trabalho

O objetivo primeiro deste trabalho é demonstrar a viabilidade de um novo sistema sismográfico destinado à propecção mineral, aplicações em engenharia civil e mineira e hidrogeologia, operando com alta resolução e relativo baixo custo. Este sistema, diferentemente de outros disponíveis no mercado, é baseado completamente na eletrônica incorporada de um microcomputador tipo IBM-PC para o sistema de aquisição de dados e registro, e em acelerômetros piezoelétricos como sensores.

Para isto são apresentados a arquitetura do sistema proposto, os resultados dos testes de laboratório e campo avaliando um protótipo desenvolvido, e as conclusões.

1.4 Estruturação da Tese

O Capítulo 2 traz um histórico do desenvolvimento dos equipamentos sismográficos e dos tipos de sensores normalmente utilizados em trabalhos de sísmica exploratória. No Capítulo 3 é mostrada a arquitetura do sistema sismográfico proposto. O Capítulo 4 descreve o protótipo desenvolvido, suas principais características e os resultados e discussão dos testes realizados em laboratório, enquanto o Capítulo 5 apresenta os resultados dos

testes efetuados no campo, tanto comparando seu desempenho com sistemas consagrados, como na solução de dois problemas concretos em duas áreas de geologia distintas. Finalmente, o Capítulo 6 inclui uma discussão objetiva sobre os resultados obtidos neste trabalho, e as conclusões; inclui também recomendações para novas pesquisas.

O Anexo 1 apresenta uma documentação fotográfica do protótipo desenvolvido e das diversas fases do trabalho. O Anexo 2 traz um resumo da teoria envolvida na montagem do acelerômetro piezoelétrico, enquanto o Anexo 3 descreve, por meio de um fluxograma, as funções e opções oferecidas pelo programa de controle.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E HISTÓRICO

2.1 Generalidades

Os métodos de prospecção sísmica foram desenvolvidos no final do século passado e início do presente século, sendo hoje técnicas consagradas na exploração mineral e de hidrocarbonetos.

Os princípios básicos do método não serão abordados nesta Tese, uma vez que extensa bibliografia cobre com profundidade os detalhes teóricos e práticos envolvidos em sua aplicação. Pode-se citar Heiland (1942?), Jakoski (1950), Dobrin (1960), Parasnis (1970), Seguin (1971), Anstey (1976), Borm (1978), Coffeen (1978), Sheriff (1978), Al-Sadi (1980), Neidell (1982) , Dourado (1984) e Sharma (1986).

Se, por um lado, a literatura abordando a metodologia sísmica é abundante, não é possível dizer o mesmo sobre literatura a respeito de equipamentos sismográficos. Isto porque os próprios fabricantes de equipamentos procuram mascarar a tecnologia que utilizam para alcançar determinados progressos técnicos, fazendo com que os concorrentes levem mais tempo para lançar um produto mais evoluído.

Apresenta-se, neste capítulo, um levantamento histórico do desenvolvimento do instrumental utilizado para prospecção sísmica, o qual foi praticamente baseado só em anúncios encontrados em revistas técnicas especializadas.

2.2 Equipamentos Sismográficos

Apesar de haver algumas referências sobre a utilização do método sísmico no final do século passado e início do presente, os métodos sísmicos só vieram a se desenvolver após o surgimendo do amplificador a válvulas, o que ocorreu em torno de 1925 (Born, 1960). Keppner (1991) atribui a Ludger Mintrop (1880 - 1956) a primeira utilização de sísmica com sucesso na definição de reserva petrolífera, que teria ocorrido em 1925. Nessa época foi possível desenvolver uma instrumentação adequada, utilizando sensores elétricos, amplificador a válvulas e sistema de registro por galvanômetros e película fotográfica. A partir daí, grandes aperfeiçoamentos foram feitos mas esta tecnologia básica perdurou até meados da década de 60. Todos estes equipamentos eram de registro analógico, e o aperfeiçoamento ocorreu na direção de miniaturizar as válvulas e posteriormente substituí-las por

transistores.

Os primeiros instrumentos operavam com dois canais, porém em 1940 o padrão da indústria já era a utilização de 12 canais, sendo que logo em seguida passaram a operar com 24 canais.

Durante a Segunda Guerra Mundial, um rápido progresso ocorreu na tecnologia de registro em fitas magnéticas, de forma que no final da década de 40 algumas companhias dispunham de equipamento com registro magnético para seu próprio uso, porém o primeiro modelo disponível comercialmente surgiu em 1954. Sem dúvida este foi um aprimoramento notável, pois permitia o armazenamento e reprodução dos registros sísmicos.

A introdução de registros magnéticos também permitiu o surgimento de outras técnicas de geração de energia. Algumas delas se baseavam na queda de um peso no terreno. Apesar da energia liberada dessa forma ser menor do que se utilizando dinamite, tornou-se possível fazer o "stacking" ou somatória de vários registros do mesmo ponto, tendo-se, desta forma, amplificação dos sinais coerentes e atenuação dos ruídos aleatórios. Essas técnicas passaram a ser utilizadas em regiões onde o uso de dinamite era impossível por razões de segurança.

Na década de 50 também foi introduzido o processamento de dados por computador, o que abreviou o tempo de tratamento dos dados, dinamizando também a interpretação dos dados.

A introdução do método "Vibroseis" (patente da Continental Oil Company) foi, sem dúvida, inovação revolucionária e digna de nota. Este método se utiliza de uma fonte de energia de freqüência variável (vibradores) ao longo do tempo, ou seja, não se trata de uma fonte impulsiva. O sinal recebido pelo geofone é registrado, e então é efetuada uma correlacão cruzada com o sinal emitido pelos vibradores. O resultado final é um registro igual àquele gerado por uma fonte impulsiva. Esta técnica tem uma vantagem adicional por ser ecologicamente "limpa", uma vez que não utiliza explosivos.

No entanto, a maior mudança tecnológica nos instrumentos geofísicos em geral e nos sísmicos em particular ocorreu em 1963, com o surgimento no mercado de instrumentação digital, onde o registro dos sinais não é mais feito de maneira contínua, mas de forma discreta (numérica). Isto trouxe maior capacidade de processamento, uma vez que o registro efetuado no campo já tinha o

formato necessário para sua utilização nos computadores. Evidentemente, isso foi possível graças ao contínuo aumento da escala de integração de componentes e à disponibilidade no mercado de conversores analógico-digitais rápidos, precisos e confiáveis.

No início dos anos 70, graças à disponibilidade de instrumentos de grande número de canais (96) e grande capacidade de processamento com os novos computadores, iniciaram-se os levantamentos sísmicos em 3D (três dimensões), que trouxeram um poder muito maior à capacidade de interpretação dos dados.

Por volta de 1975 surgiram também os sismógrafos de exploração telemétricos, onde a informação sísmica (já digitalizada) é enviada via rádio para a unidade central de registro. Isto tornou possível a execução de levantamentos sísmicos em regiões antes inacessíveis.

No final da década de 70 surgiu uma técnica até certo ponto revolucionária, conhecida como "sign bit". Esta técnica utiliza-se de um sismógrafo que admite enorme número de canais (1024), já que, em vez de digitalizar a informação sísmica com grande precisão (16 bits), faz uso apenas do bit de sinal, sendo que um grande "stacking" permite a recuperação da informação sísmica (Allen, 1984). A utilização do "sign bit" mostrou-se apropriada em regiões de relação sinal-ruído extremamente desfavoráveis (O'Brien et alli, 1982).

Na década de 80, devido ao grande progresso na tecnologia de semicondutores, foi possível o desenvolvimento de sistemas sismográficos com maior resposta em freqüência. Iniciou-se, então, a utilização da técnica sísmica para trabalhos onde uma alta resolução era desejada (p.e., levantamentos em regiões produtoras de carvão) (Knapp and Steeples, 1986a e 1986b).

Atualmente, um sistema bastante popular é o de aquisição descentralizada, que permite operar com grande número de canais com cabos sismográficos de poucos condutores, uma vez que se utiliza de condutores de fibra óptica para o envio das informações sísmicas, já digitalizadas, à unidade de registro.

Até aqui tem-se falado sobre a instrumentação sísmica utilizada na indústria de petróleo (responsável por mais de 90% dos gastos em levantamentos geofísicos realizados no mundo). Existem, no entanto, outros tipos de instrumentos sismográficos, mais econômicos e também bastante poderosos para a finalidade a

que se destinam. Dentro deste grupo, podem-se citar os sismógrafos para refração e reflexão rasas e os sismógrafos para engenharia. Ambos os tipos incorporam basicamente as mesmas características dos sistemas maiores e mais complexos, porém tratam-se de sistemas bem menores (normalmente até 24 canais) e de operação mais simplificada.

Atualmente, tais sistemas têm procurado se utilizar da popularidade dos microcomputadores tipo IBM-PC e têm incorporado portas para conexão com esses microcomputadores, ou mesmo gravam arquivos em discos magnéticos com formato compatível a eles. Dentre este grupo pode-se citar o Mark 3 (fabricado pela ABEM Terraloc), o Bison Series 5000 (fabricado pela BISON Instruments Inc.), o ES-2401 (fabricado pela EG&G Geometrics) e o McSeis 16000 (fabricado pela OYO Corporation). O diagrama de blocos simplificado destes instrumentos é apresentado na Figura 1.

Recentemente foi lançado no mercado o sismógrafo que mais se utiliza do microcomputador tipo IBM-PC. Trata-se do ECHO S-2 (fabricado pela Scintrex). Este instrumento grava os dados em sua memória interna e, por meio da porta serial (RS-232), transfere os dados ao microcomputador. A diferença com relação aos outros sistemas reside no fato do ECHO S-2 não dispor de registrador ou monitor, pois se utiliza do monitor do microcomputador e de um programa especial para apresentar os dados. A Figura 2 apresenta o diagrama de blocos simplificado deste equipamento.

2.3 Sensores

Os primeiros sensores (geofones) usados em prospecção consistiam em uma bobina móvel suspensa por meio de molas em torno de um núcleo magnético, exatamente do mesmo princípio que os utilizados atualmente, mas a grande diferença é que aqueles pesavam em torno de 5 a 6 kg (10 Hz de freqüência natural), e possuíam amortecimento por óleo (Born, 1960). Com a adoção de técnicas de exploração mais complexas (p.e. CDP e filtros espaciais) e com o acréscimo de canais por instrumento, surgiu a necessidade de miniaturização dos geofones, o que foi possível com a introdução de ímãs mais fortes e de amortecimento elétrico (resistivo). Na década de 40, o aprimoramento da qualidade das válvulas disponíveis no mercado também permitiu que se trabalhasse

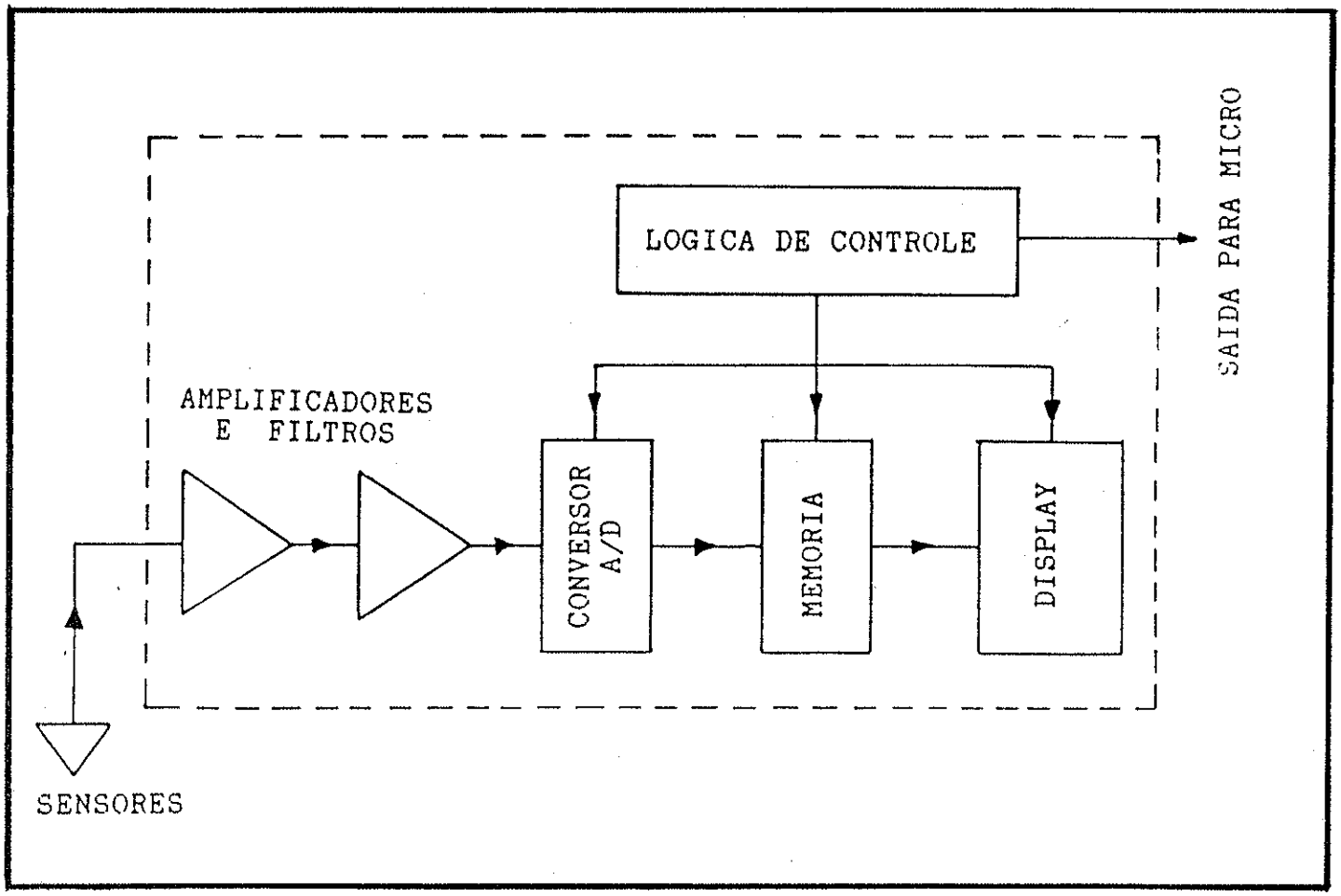


Figura 1 - Diagrama de blocos simplificado de sistema sismográfico digital convencional (p.e., Bison 5000). A linha interrompida delimita o sismógrafo propriamente dito.

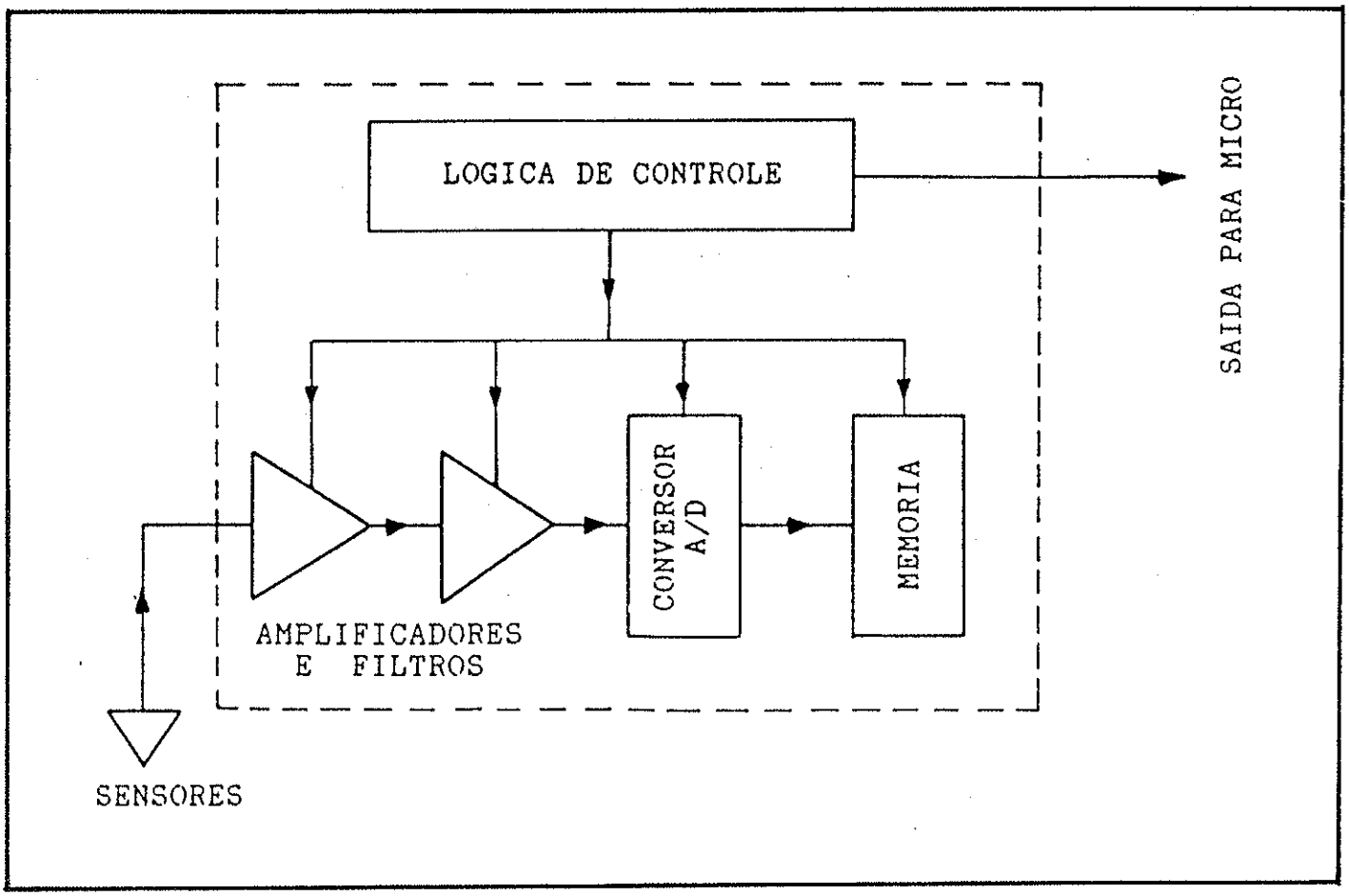


Figura 2 - Diagrama de blocos simplificado de sistema sismográfico produzido pela Scintrex (ECHO S-2). A linha interrompida delimita o sismógrafo propriamente dito.

com sensores menos sensíveis, e portanto menores, sem que isto comprometesse a qualidade final do registro.

Com a introdução da tecnologia digital e o aumento acentuado da faixa dinâmica dos instrumentos, foi necessário novamente melhorar a qualidade dos sensores, o que se conseguiu utilizando-se imãs de ligas especiais.

O incremento na utilização de levantamentos sísmicos de alta resolução levou os fabricantes a desenvolverem e produzirem também sensores com resposta em freqüência mais ampla, visto que os convencionais são utilizáveis somente até uma freqüência de 500 Hz (Washburn and Wiley, 1941), (Fail et al., 1962), (Lamer, 1970) e (Lepper, 1981), apesar de serem lineares até freqüências mais baixas (Lepper, 1981).

Klassen e Peppen (1983) desenvolveram um geofone eletromagnético mais apropriado para trabalhos de resolução maior, valendo-se da sensibilidade à aceleração do sensor e de um circuito eletrônico interno, no corpo do geofone. Segundo os autores, estes geofones mantêm sua linearidade até a freqüência de 500 Hz.

Apesar das limitações, os sensores eletromagnéticos são ainda hoje os mais comumente utilizados pela sua versatilidade, portabilidade, bom desempenho, robustez e relativo baixo custo.

Paralelamente ao desenvolvimento e aprimoramento dos sensores eletromagnéticos, os sensores piezoelétricos também apresentaram acentuado aperfeiçoamento, tornando-se pequenos e robustos graças à utilização de pastilhas sintéticas de acentuadas propriedades piezoelétricas. Estes sensores são mais apropriados a trabalhos com alta freqüência (Lepper, 1981) e trazem também a vantagem de poderem ser utilizados omnidirecionalmente. No entanto, o seu alto custo tem feito com que sua aplicação se limite a projetos especiais, quando o registro de alta freqüência é imperioso.

2.4 Comentários e Conclusões

O levantamento bibliográfico do desenvolvimento da instrumentação sísmica é uma tarefa extremamente difícil. Além de serem raros os trabalhos que apresentam tal histórico, as grandes inovações tecnológicas são "escondidas" pelos fabricantes a fim de manterem uma exclusividade por mais tempo, e, com isso,

resguardarem o mercado para si.

Por outro lado, a partir dos trabalhos de Born (1960) de Wolff and Mercanti (1974) e de Keppner (1991), torna-se possível identificar alguns grandes marcos tecnológicos, os quais trouxeram progressos notáveis à instrumentação geofísica em geral e à sísmica em particular. O primeiro ocorreu por volta de 1920, com a utilização da eletricidade (e amplificadores a válvula) nos instrumentos de campo. O segundo se deu durante a Segunda Guerra Mundial, com a introdução dos registradores magnéticos. Um terceiro grande marco se verificou na década de 1960, com a introdução de técnicas digitais de aquisição de dados e processamento por computador.

O mais recente marco foi, sem dúvida, o surgimento do microcomputador pessoal, possibilitando o processamento de dados "on desk", de maneira iterativa e com sistemas poderosos e de relativo baixo custo.

3. PROPOSTA DE UM NOVO EQUIPAMENTO

3.1 Generalidades

Como foi visto no Capítulo anterior, diversos equipamentos sismográficos dedicados à sísmica aplicada à engenharia e ao meio ambiente são atualmente encontrados no mercado mundial. Em adição, alguns deles têm a facilidade de se comunicar com microcomputadores da linha IBM-PC. No entanto, não se encontra algum que se utilize de toda a eletrônica incorporada no microcomputador, que tem apresentado cada vez mais recursos a um custo menor. Não se encontra no mercado também nenhum sistema dedicado à sísmica exploratória terrestre que se utilize primariamente de acelerômetros piezoelétricos como sensores.

3.2 Arquitetura do Sistema Proposto

O sistema sismográfico proposto nesta Tese baseia-se primordialmente na eletrônica incorporada em um microcomputador tipo IBM-PC, que é utilizado como sistema de aquisição de dados e de registro, e de sensores constituídos por acelerômetros especialmente desenvolvidos para uso em sismografia exploratória. A conjunção destes dois elementos básicos e alguma eletrônica periférica deve permitir a aquisição de dados sismográficos de alta resolução, grande confiabilidade e relativo baixo custo.

A arquitetura do sistema é apresentada na Figura 3, e consiste em sensores (acelerômetros piezoelétricos) especialmente desenvolvidos para uso sismográfico, amplificadores e filtros, um conversor analógico-digital (facilmente encontrado no mercado nacional e internacional), compatível ao microcomputador tipo IBM-PC, ao qual ele é conectado. Todo o comando das operações deverá ser executado por um programa de controle especialmente desenvolvido para esse fim, e que deve emular todas as operações que normalmente são executadas pelos sismógrafos digitais convencionais.

A seguir é discutido cada um dos componentes do sistema:

3.2.1 Sensor

Os sensores normalmente utilizados em trabalhos sismográficos (chamados de geofones) consistem em sistemas eletromagnéticos onde uma bobina suspensa por meio de molas é colocada em torno de um núcleo magnético fixo. A Figura 4

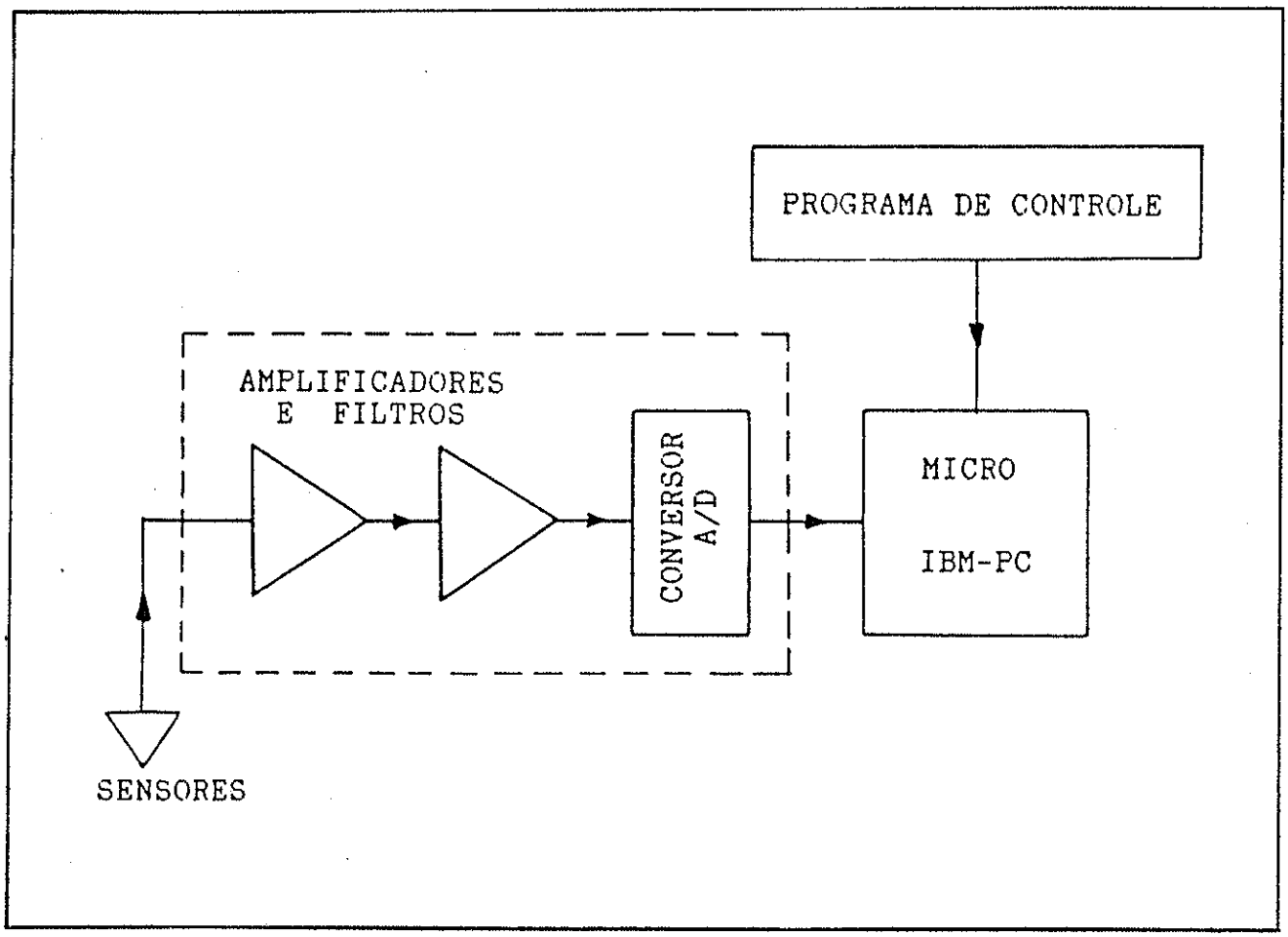


Figura 3 - Diagrama de blocos simplificado de sistema sismográfico proposto neste trabalho.
A linha interrompida delimita o sismógrafo propriamente dito.

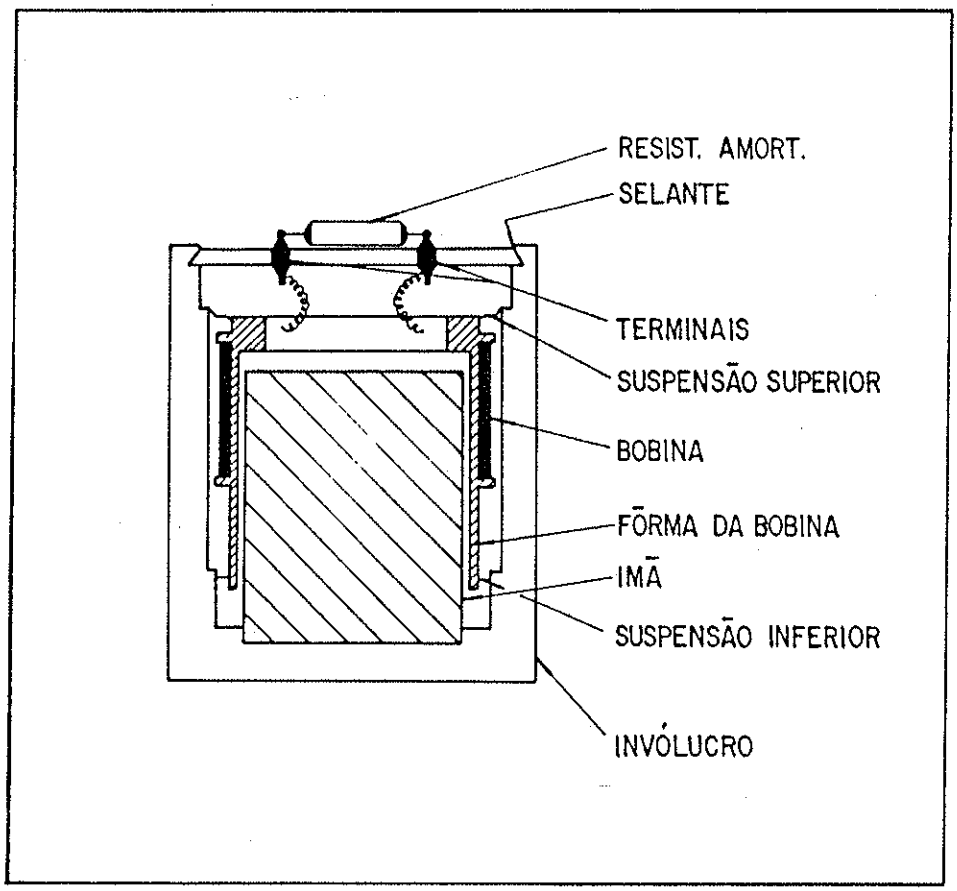


Figura 4 - Diagrama esquemático de um geofone típico (de bobina móvel).

apresenta um diagrama esquemático de um geofone típico. O movimento relativo entre estes dois elementos, a bobina e o imã, gera uma corrente na bobina proporcional à velocidade do movimento. A resposta em freqüência deste tipo de sensor é função da constante elástica das molas e da massa da bobina, enquanto a amplitude do sinal de saída é função das características da bobina e das grandezas magnéticas do imã. Sua fabricação torna-se difícil devido à necessidade de materiais especiais e molas que apresentem grande estabilidade, sensibilidade e robustez.

O acelerômetro convencional, cujo diagrama esquemático é apresentado na Figura 5, consiste em um sistema onde um cristal com propriedades piezoelétricas é colocado sobre uma base rígida, e sobre o cristal é assentada uma massa (chamada de massa sísmica). O movimento do conjunto faz com que o cristal gere uma corrente proporcional à sua aceleração. A resposta em freqüência deste tipo de sensor é dependente da massa do cristal e da massa sísmica (quanto menores as massas, maior a freqüência de ressonância), enquanto a amplitude do sinal gerado também depende da massa do cristal e da massa sísmica (quanto maiores as massas, maior o sinal). Portanto torna-se necessária compatibilização entre o tamanho do cristal e o tamanho da massa sísmica, com a faixa de freqüências desejada, assim como com o nível de amplitude do sinal esperado.

Um problema a ser considerado quando da utilização de acelerômetros piezoelétricos diz respeito à impedância do sinal gerado, que é extremamente elevada (ou seja, o sinal, apesar de apresentar uma amplitude razoável, tem baixa potência, o que impossibilita sua transmissão a longas distâncias).

Sugere-se que no presente trabalho se desenvolva e se utilize um acelerômetro piezoelétrico que alie uma grande sensibilidade à resposta em freqüências de até 2.000 Hz com um desvio não maior do que 1 dB. A fim de possibilitar a utilização de cabos sismográficos longos, deve-se colocar um pré-amplificador interno, dentro do corpo do acelerômetro. Este pré-amplificador terá a função de baixar a impedância do sinal de saída e possibilitar a variação de ganho, de forma a permitir um intercâmbio dos acelerômetros no sistema.

Deve-se ressaltar que acelerômetros com características semelhantes às propostas foram desenvolvidos e vêm sendo

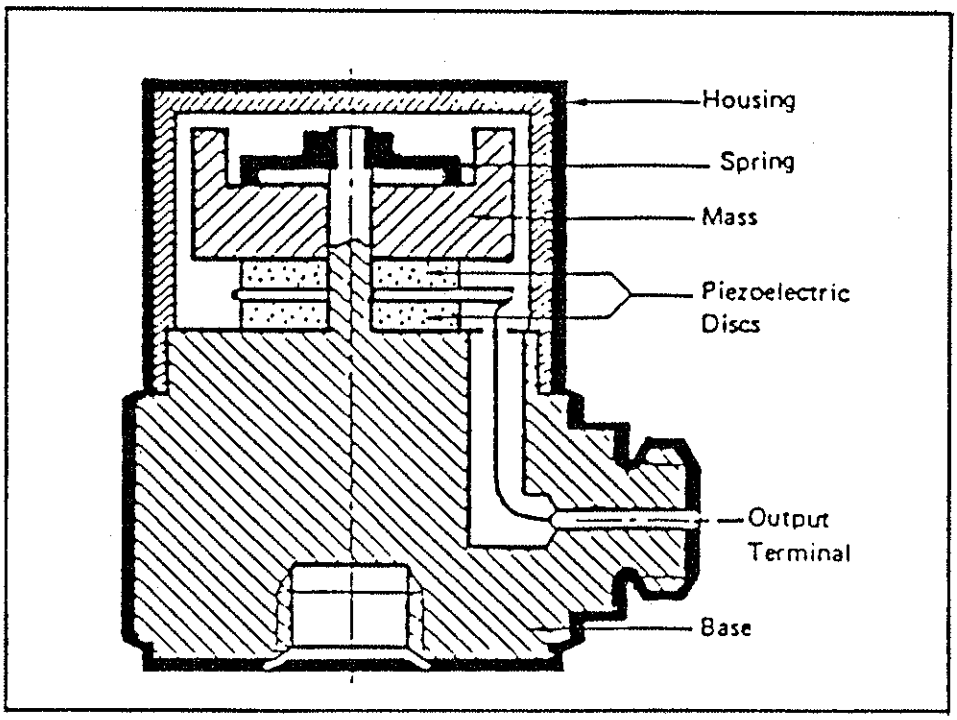


Figura 5 - Diagrama esquemático de um típico acelerômetro (Brüel & Kjaer, 1978).

utilizados com sucesso pela Divisão de Geologia de Engenharia e Mecânica de Rochas - DIGEM, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, há cerca de 15 anos.

3.2.2 Amplificador e filtros

No termo amplificador estão concentradas na realidade várias funções. O amplificador sísmico traz a amplitude do sinal a níveis mais confortáveis de serem manipulados eletronicamente. Outra função que o amplificador exerce é a de filtrar as freqüências indesejáveis. Estas freqüências são definidas pelo tipo de trabalho que se deseja efetuar, pela profundidade dos estratos alvos e pelos geofones disponíveis. Como neste ponto do instrumento se dispõe ainda de sinais analógicos, são necessários tantos amplificadores quanto o número de canais que se está usando.

O ganho do amplificador será função da amplitude do sinal proveniente do sensor e da faixa de trabalho do estágio seguinte: o conversor analógico-digital. As freqüências de corte dos filtros corta-baixas serão selecionadas considerando-se as freqüências normalmente utilizadas em trabalhos de sísmica de refração e de sísmica de alta resolução. Como valores típicos pode-se considerar 20 Hz para trabalhos de refração rasa e 200 Hz para trabalhos de reflexão e alta resolução. Deve ser implementado também um filtro "notch" de freqüência de corte de 60 Hz para atenuar interferências provocadas pela rede de energia elétrica, invariavelmente presente em trabalhos próximos a regiões urbanas. Quanto ao filtro corta-altas, este deve ter sua freqüência de corte sintonizada de acordo com o conversor analógico-digital a ser utilizado, porém com uma rampa de corte mais abrupta, pois ele terá também a função de filtro anti-Alias.

3.2.3 Conversor analógico-digital

O conversor analógico-digital (A/D) consiste em um circuito que aceita voltagens e as converte em números binários. Em outras palavras, o conversor analógico-digital recebe um sinal elétrico analógico (contínuo), e o transforma em um sinal digital (numérico), discretizando o sinal em diversas "amostras" tomadas em intervalos de tempo regulares. Apesar de haver várias maneiras de se efetuar tal conversão, os conversores A/D utilizados em

instrumentação sísmica se utilizam do método de aproximação sucessiva.

O método de aproximação sucessiva pode ser descrito como sendo análogo a uma balança de comparação. O objeto que se deseja pesar é colocado em um dos pratos da balança e os pesos padrões no outro. Assume-se que o maior peso é aproximadamente igual à soma de todos os outros, e cada peso seguinte tem a metade do peso do anterior. Inicia-se colocando o maior peso e comparando o resultado, sempre trocando ou adicionando os pesos do maior para o menor. Sabe-se que quanto maior o número de pesos que se tiver disponível, maior será a precisão da pesagem. A analogia com o conversor A/D consiste em que no lugar de pesos se trabalha com voltagens, e em vez dos pratos da balança dispõe-se de um circuito comparador. Os "pesos" padrões são conseguidos por meio de circuitos que fornecem voltagens de referência. A unidade de "peso" no conversor A/D é chamada de "bit" e, teoricamente, quanto maior o número de bits possuir o A/D, maior será a precisão na digitalização. Na prática, porém, isto não ocorre sempre, pois deve-se levar em consideração o ruído instrumental de todo o sistema, que limita a precisão nas pequenas amplitudes.

Um aspecto importante no conversor A/D é o de que se deseja uma amostragem referenciada no tempo, de tal forma que se consiga recuperar o sinal original tanto em amplitude como em freqüência. Para isto o conversor A/D dispõe normalmente de um circuito oscilador, que se baseia na freqüência de ressonância de um cristal de quartzo de alta precisão. Esta freqüência é o "relógio" do sistema.

Outro cuidado que deve ser tomado na escolha do conversor A/D é com relação à sua freqüência de amostragem. Isto vem do fato que um número finito de amostras é tomado para representar um sinal que na realidade é contínuo. Uma vez que a amostragem é feita em intervalos fixos e não se tem controle sobre o sinal entre os pontos de amostragem, é óbvio que o sinal é confiavelmente reconstruído somente nestes pontos amostrados. É também conhecido que quanto mais amostras forem tomadas, mais confiável torna-se a reconstrução do sinal original. Portanto, quanto mais altas freqüências estiverem contidas no sinal, menor deve ser o intervalo entre as amostras, ou maior a freqüência de amostragem, a fim de manter a precisão desejada. Por outro lado,

quanto mais amostras forem tomadas, maior será o volume de memória, ou registro magnético necessário para armazenar a informação. Percebe-se aqui que um compromisso tem que ser obtido entre precisão e volume de equipamento.

O "teorema de amostragem", proposto inicialmente por C.E. Shannon em 1949, diz: "Se uma função do tempo é formada somente por componentes em freqüência abaixo de *F* ciclos por segundo, *2F* amostras por segundo é suficiente para representá-la perfeitamente, assim como para permitir uma perfeita recuperação." Em outras palavras, se a maior freqüência desejada é 500 Hz, uma freqüência de amostragem de 1000 amostras/segundo (uma amostra a cada 1 milisegundo) é teoricamente suficiente. Uma amostragem insuficiente pode causar o fenômeno de "Alias" no sinal, que vem a ser a recuperação de uma freqüência inferior à original, e portanto irreal. Pelo mesmo motivo, deve-se ter o cuidado de filtrar freqüências maiores das que se deseja registrar.

Uma discussão muito comum entre os geofísicos de exploração diz respeito à quantidade de bits necessária para se digitalizar o sinal sísmico e recuperá-lo de maneira aceitável. Enquanto os instrumentos dedicados à exploração de hidrocarbonetos operam com 16 ou mesmo 20 bits, os sismógrafos para refração, reflexão rasa e engenharia se utilizam de 8 a 12 bits, sendo que somente alguns modelos usam 16 bits. Taioli e Yamamoto (1984) mostram que, em trabalhos de sísmica de reflexão para prospecção de hidrocarbonetos, a relação entre o número de bits (acima de 8) e a melhoria na qualidade das seções sísmicas finais (após o processamento) é questionável, dependendo do "empilhamento" utilizado. Deve ser lembrado também que o aumento no número de bits no conversor A/D só se justifica se incrementada a precisão de todos os demais componentes do sistema, o que pode ocasionar um acréscimo sensível no custo final do instrumento, além de exigir mais dos sistemas de processamento posteriores. Portanto, um conversor A/D de 12 bits tem sido utilizado para o tipo de trabalho proposto, pois trata-se de uma boa relação custo/benefício. A freqüência máxima necessária, devido à atenuação que as altas freqüências sofrem na sua propagação em solos ou rochas, é da ordem de 2.000 Hz, o que faz com que seja necessário um conversor A/D capaz de operar a uma freqüência de amostragem de 4.000 Hz, vezes o número de canais a ser utilizado.

Uma vez que é possível encontrar no mercado diversas placas de expansão conversoras A/D, compatíveis com o microcomputador tipo IBM-PC, que operam a freqüências de 60.000 Hz, torna-se possível implementar um equipamento com até 15 canais.

3.2.4 Microcomputador tipo IBM-PC

O microcomputador conhecido como PC ("Personal Computer") foi desenvolvido pela International Business Machines Corporation (IBM), e tem-se mostrado como um padrão da indústria de microcomputadores praticamente desde o seu lançamento, em agosto de 1981. Por se tratar de um sistema "aberto", ou seja, toda a sua arquitetura e protocolos de comunicação são disponíveis em literatura, torna-se simples criar periféricos que operem utilizando o seu microprocessador e memórias (Eggebrecht, 1986). Esta característica fez com que surgissem no mercado inúmeros "clones" ou cópias, que, por sua vez, criaram tal competitividade no mercado que o preço vem caindo a cada ano, ao mesmo tempo que a capacidade de processamento é incrementada (Norton, 1986).

O microcomputador tipo IBM-PC consiste basicamente em uma unidade central de processamento (UCP), um teclado, uma ou mais unidades de disco flexível ou rígido e um monitor. A UCP é baseada em um microprocessador da série 80X86 fabricado pela INTEL, que, dependendo da versão, opera com palavras de 16 ou 32 bits, e com velocidade variando de 4,77 MHz a 50 MHz. O teclado é bastante similar ao de uma máquina de escrever convencional. As unidades de disco servem para armazenar arquivos ou programas e possuem diversas capacidades, variando de 360 Kbytes a 1,44 Mbytes para os discos flexíveis e de 5 Mbytes a mais de 200 Mbytes para os discos rígidos. O monitor consiste em um vídeo cuja resolução (número de pontos luminosos) também vem crescendo, sendo que hoje os principais padrões são o CGA (640 pontos na horizontal e 200 na vertical), o EGA (640 pontos na horizontal por 350 na vertical), o VGA (640 por 480) e o SVGA (1024 por 768).

Fisicamente, a parte principal do microcomputador consiste na "placa mãe", que contém o microprocessador, um soquete para um coprocessador aritmético (opcional), a memória ROM ("read only memory" - memórias só de leitura), as memórias RAM ("random access memory" - memórias de acesso aleatório), e diversos conectores para colocação de placas de circuito impresso de

expansão). São exatamente esses conectores disponíveis que tornam o sistema "aberto".

Atualmente, existem versões do PC bastante portáteis que funcionam a baterias e possuem o monitor de cristal líquido, e que têm basicamente a mesma capacidade dos sistemas convencionais ("de mesa"). Estas versões, ideais para trabalho de campo, são conhecidas no mercado como os "laptops", "notebooks" e mais recentemente o "palmtop". A diferença fundamental destes para os sistemas convencionais, além do tamanho, é a disponibilidade dos conectores de expansão, que alguns modelos não possuem, e outros têm apenas um conector.

3.2.5 Cabo sismográfico

Para a conexão dos sensores aos respectivos circuitos de amplificação e filtros, deverá ser desenvolvido um cabo sismográfico especial que fornecerá alimentação aos pré-amplificadores dos acelerômetros e conduzirá os sinais aos amplificadores e filtros. O seu comprimento deverá ser compatível com a resolução desejada e com a profundidade dos estratos alvos.

3.2.6 Programa de controle

O programa para executar o controle da operação de todo o sistema deverá ser desenvolvido no ambiente MS-DOS procurando utilizar uma arquitetura que simule a operação dos sismógrafos digitais convencionais. Isto torna-se interessante para evitar um choque do usuário e para minimizar o tempo de aprendizagem do operador.

As operações básicas que este sistema deve compreender consistem na possibilidade de entrar os dados dos parâmetros de trabalho, possibilidade de, além de adquirir um registro sísmico, gravá-lo em disco rígido ou flexível: e de recuperar posteriormente esse registro.

Após o processo de aquisição de um registro, o programa deve ser capaz de apresentar os dados de maneira gráfica no monitor do computador, de maneira semelhante aos sismógrafos convencionais. Em adição, deve oferecer ao usuário a possibilidade de amplificar os traços, de imprimir o registro da mesma forma que aparece no monitor, e de efetuar somatória de registros para efeito de "empilhamento".

O formato a ser utilizado para a gravação dos dados em disco deverá obedecer a um padrão que apresente compatibilidade a algum sistema de processamento sísmico usual e facilmente encontrado no mercado.

3.3 Comentários e Conclusões

O sistema (mecânica, eletrônica e programa de controle) como proposto aqui, foi idealizado para que, ao mesmo tempo que fosse o mais econômico possível, atendesse às necessidades comuns da maioria dos geofísicos envolvidos em trabalhos sísmicos aplicados à engenharia, meio ambiente e hidrogeologia. Esta arquitetura do sistema deverá permitir alterações e aperfeiçoamentos posteriores, em cada bloco ou módulo independentemente, sem necessidade de que se modifique o sistema como um todo.

4. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

4.1 Generalidades

Quando se pensa em desenvolver qualquer equipamento, a primeira pergunta que surge diz respeito às especificações que tal equipamento deve compreender. Para o caso de sistemas sismográficos, apesar de não existirem especificações definidas, algumas diretrizes podem ser encontradas na literatura, principalmente nos trabalhos de Anstey (1976) e Pieuchot (1978). No entanto, estes cobrem apenas os sismógrafos dedicados à prospecção de hidrocarbonetos, os quais trabalham numa faixa de freqüências baixa (normalmente até 100 Hz) e grande número de canais (normalmente 96). Para o caso de sismógrafos aplicados à engenharia, meio ambiente e hidrogeologia, uma verificação das especificações constantes de prospectos e manuais de equipamentos disponíveis no mercado mostra que não há ainda o que possa ser considerado como o "padrão" da indústria.

Um protótipo do equipamento proposto foi desenvolvido neste trabalho. Procurou-se compreender, neste protótipo, as principais características dos equipamentos similares, as quais são apresentadas e discutidas neste Capítulo.

4.2 Protótipo Desenvolvido

Para a consecução do trabalho proposto foi desenvolvido um protótipo do sistema, conforme apresentado no Capítulo anterior, e com a arquitetura mostrada na Figura 3. Alguns critérios gerais foram observados no seu desenvolvimento e, evidentemente, definiram muitos dos conceitos utilizados no projeto. Um deles foi, sem dúvida, a disponibilidade e facilidade de se encontrarem, no mercado nacional, os componentes eletrônicos e mecânicos utilizados. O custo de cada parte e do conjunto foi analisado cuidadosamente para a tomada de qualquer decisão. Porém, não se deve esquecer que aqui entra uma consideração a respeito da escala de fabricação, ou seja, algumas soluções artesanais só se justificam por ter sido montado apenas um exemplar.

A seguir, é apresentado cada um dos componentes do sistema, e seu respectivo desempenho em testes de laboratório.

4.2.1. Sensor

O sensor utilizado neste trabalho é um acelerômetro piezoelétrico formado por uma base de latão sobre a qual é colada uma pastilha de material piezoelétrico (zirconato titanato de chumbo e bário). Sobre a pastilha é colada uma massa sísmica também de latão e de diâmetro igual, porém de altura correspondente ao dobro da altura da pastilha. Os terminais elétricos são o próprio corpo da base (terminal negativo) e a massa sísmica (terminal positivo). A fim de possibilitar a utilização de cabos sismográficos longos, colocou-se um pré-amplificador interno, dentro do corpo do acelerômetro, fixado na base por meio de parafusos. Este pré-amplificador tem a função de baixar a impedância do sinal de saída e possibilitar o ajuste de ganho, de forma a permitir um intercâmbio dos acelerômetros no sistema. O ganho utilizado na calibração dos acelerômetros foi ajustado por meio de um potenciômetro até se atingir um sinal de saída de 1 Volt/g (±1%) a 300 Hz em cada acelerômetro. A alimentação do pré-amplificador é fornecida por meio do cabo sismográfico. O esquema deste acelerômetro é apresentado na Figura 6. A Figura 7 mostra o diagrama elétrico esquemático do pré-amplificador utilizado internamente no acelerômetro. A teoria de funcionamento e cálculo das características do acelerômetro podem ser encontradas em detalhe em Serridge and Licht (1986) e, para o caso específico deste trabalho, no Anexo 2.

O levantamento das características dinâmicas do acelerômetro foi efetuado pelo autor, utilizando a configuração experimental, conforme esquematizado na Figura 8, até a definição de uma boa solução mecânica e eletrônica. Em seguida foi enviado um exemplar do acelerômetro ao Laboratório de Ensaios Dinâmicos da Divisão de Engenharia Mecânica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, onde se efetuou um ensaio comparativo com padrões internacionais disponíveis naquele Laboratório. Os resultados ali obtidos estão apresentados nas Figuras 9, 10 e 11.

A análise destes resultados permite concluir que o acelerômetro apresenta uma resposta plana, dentro de ± 1 dB, na faixa de freqüências de 10 Hz a 2.000 Hz. O sinal de saída é da ordem de 1 Volt/g.

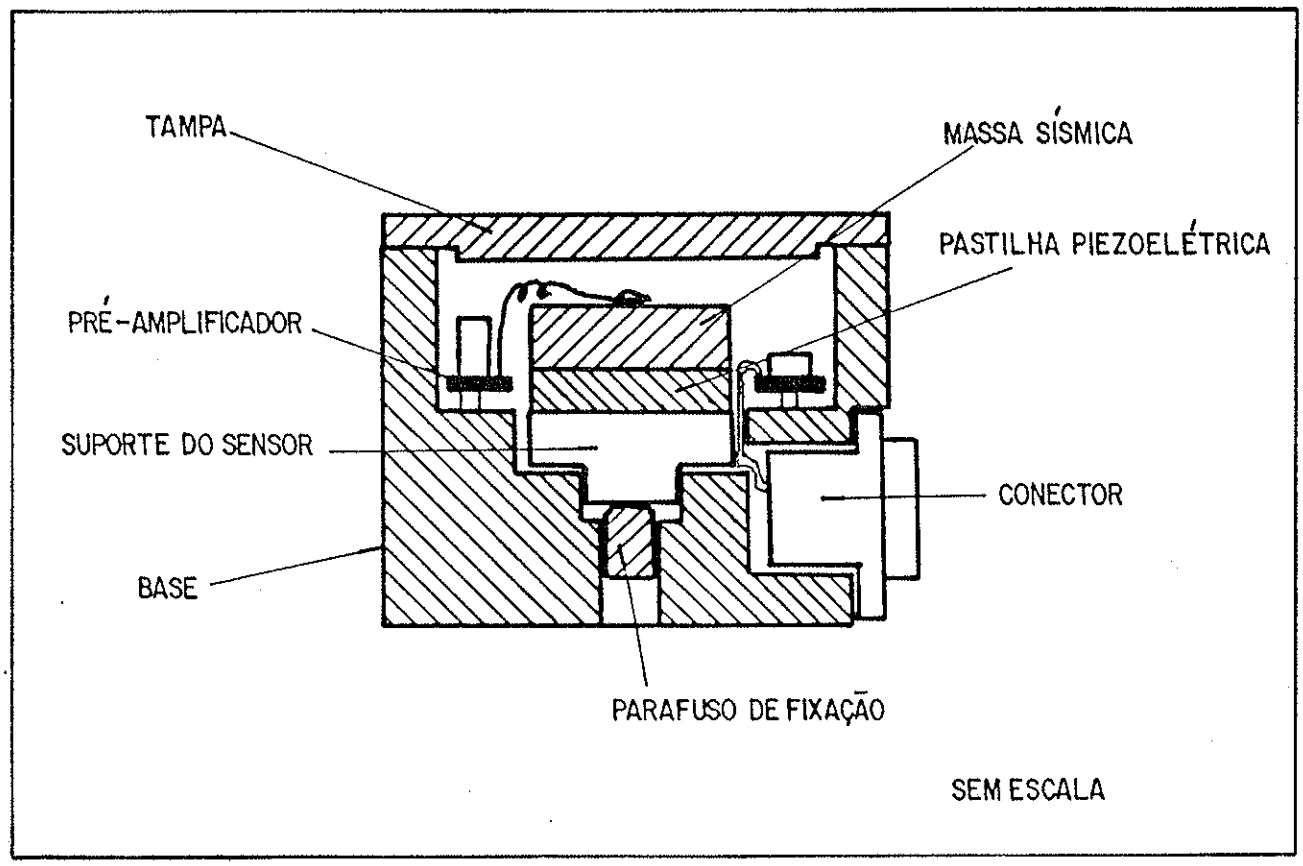


Figura 6 - Corte esquemático do acelerômetro piezoelétrico desenvolvido e utilizado neste trabalho.

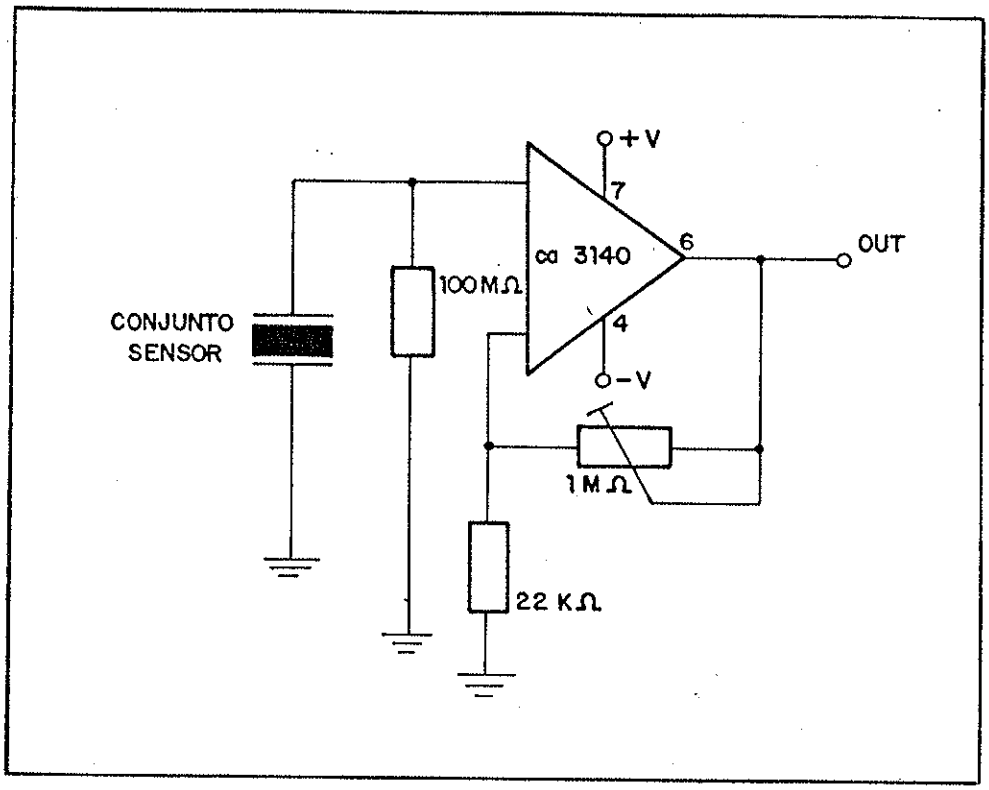


Figura 7 - Diagrama elétrico esquemático do pré-amplificador utilizado internamente no acelerômetro piezoelétrico.

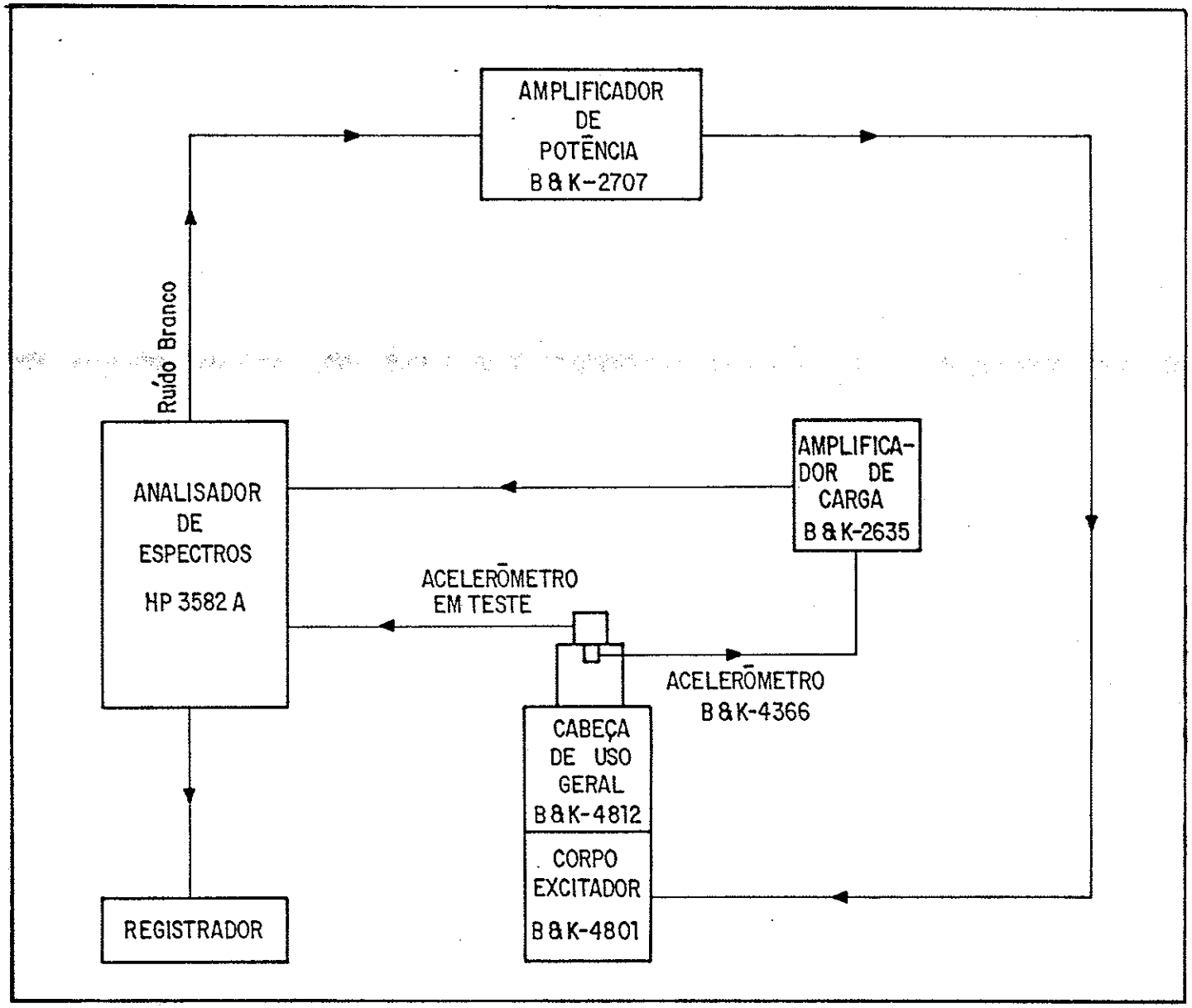


Figura 8 - Configuração experimental utilizada no desenvolvimento e testes do acelerômetro piezoelétrico

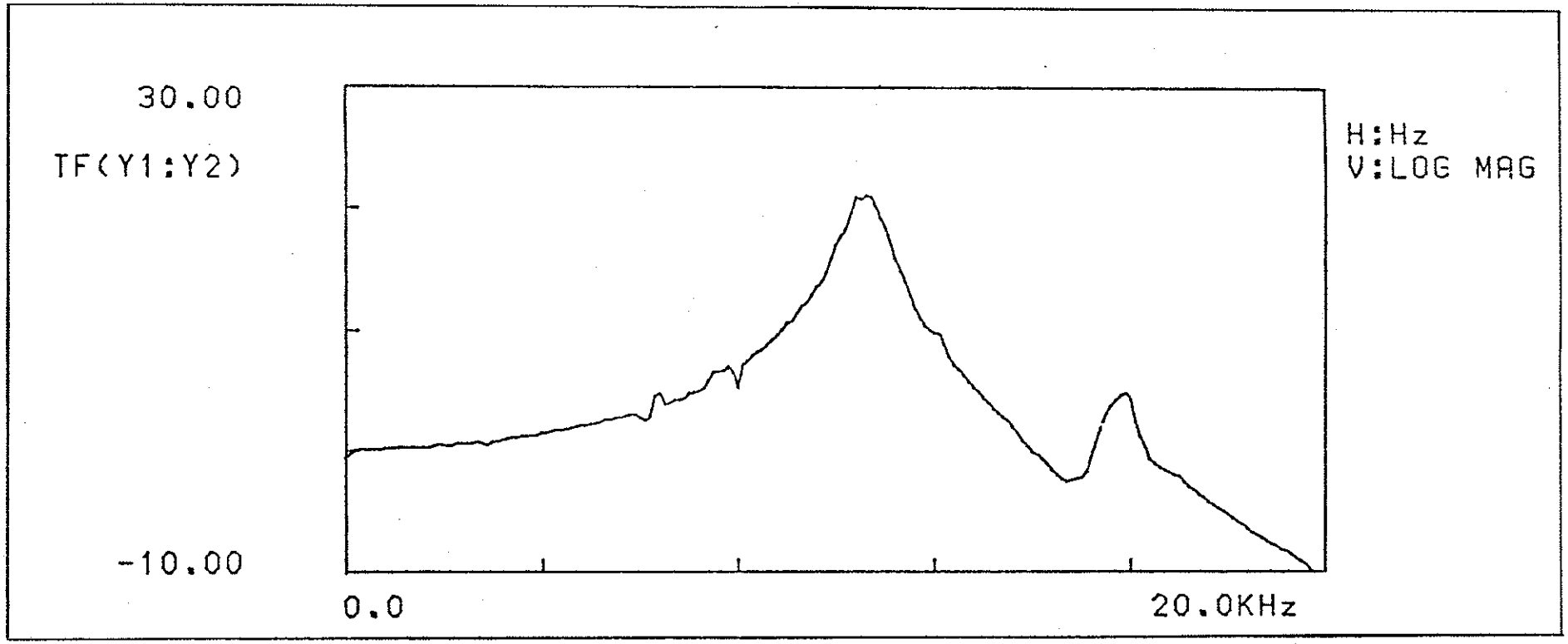


Figura 9 - Resposta em freqüências de DC a 20 kHz do acelerômetro piezoelétrico desenvolvido e utilizado neste trabalho

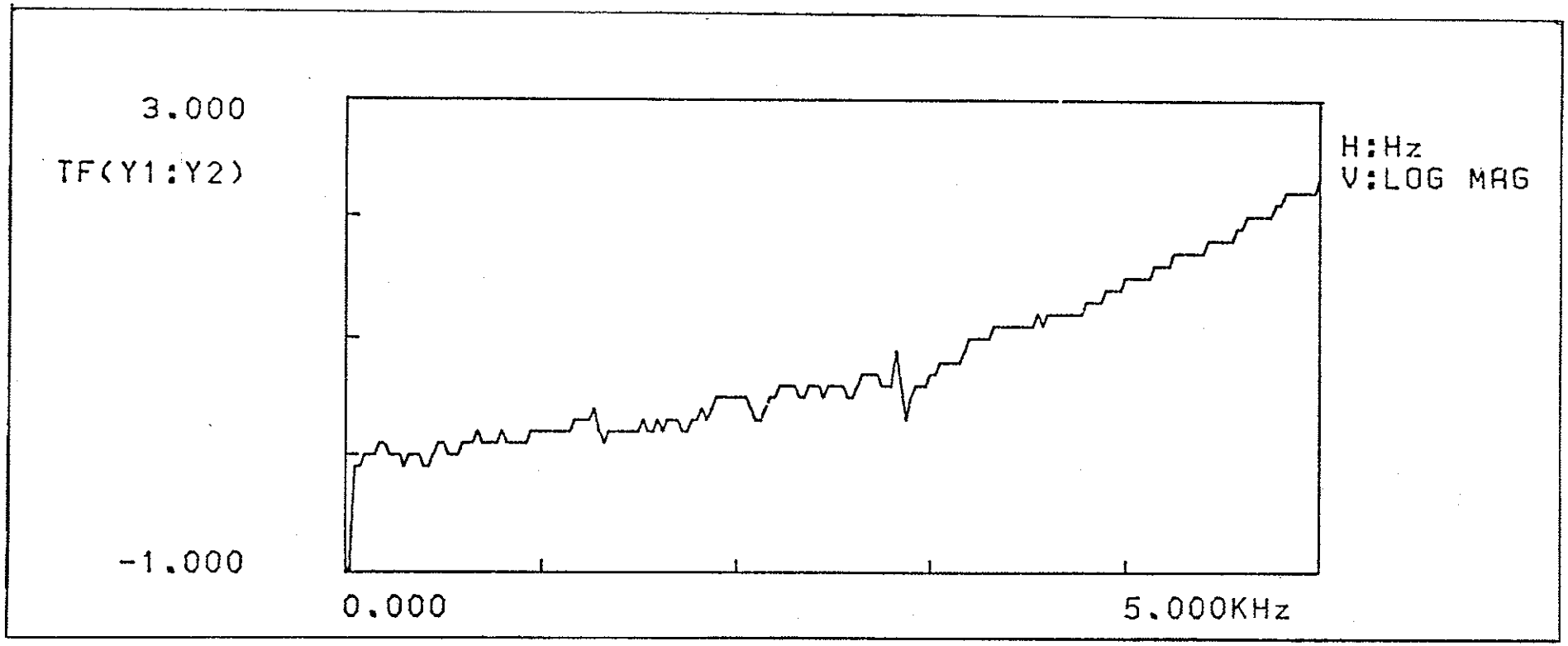


Figura 10 - Resposta em freqüências de DC a 5 kHz do acelerômetro piezoelétrico desenvolvido e utilizado neste trabalho

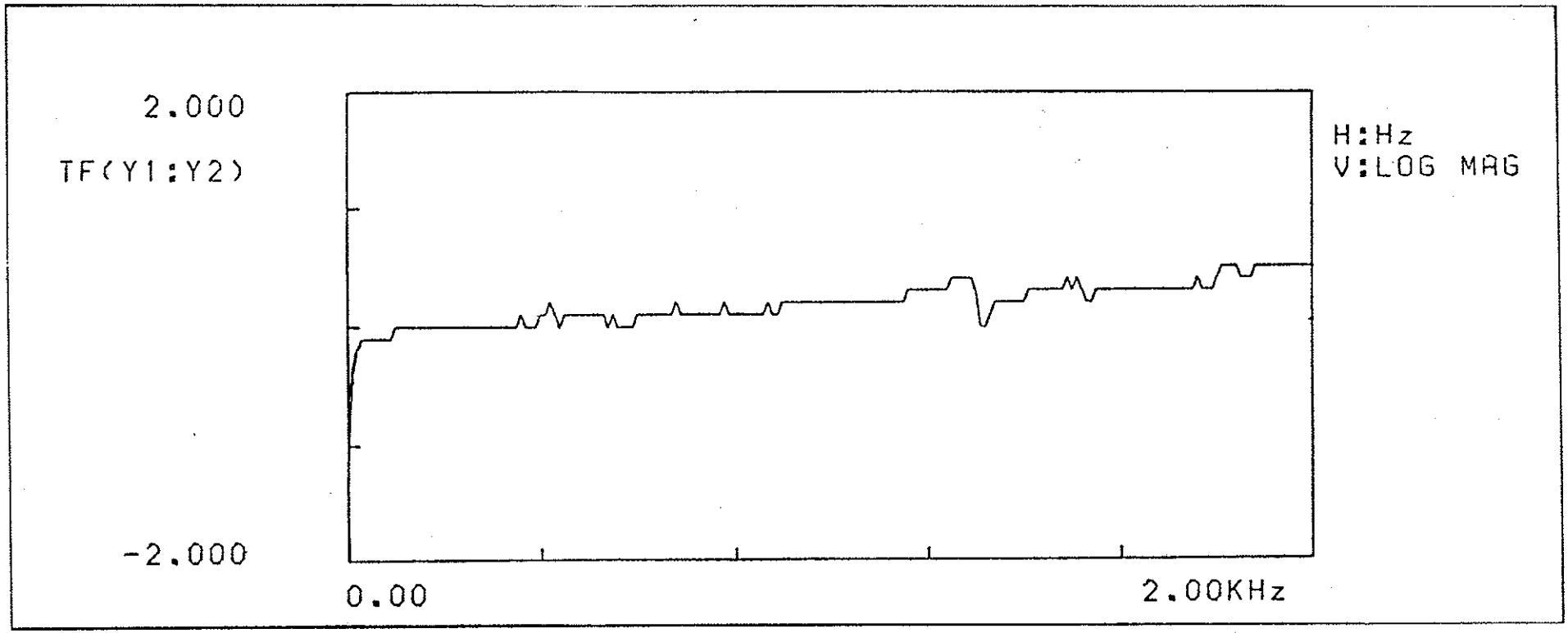


Figura 11 - Resposta em freqüências de DC a 2 kHz do acelerômetro piezoelétrico desenvolvido e utilizado neste trabalho

Tais características foram consideradas aceitáveis para o trabalho em sismografia de exploração. Foram montados 14 acelerômetros no total, obedecendo sempre à mesma metodologia de calibração e levantamento das características dinâmicas.

4.2.2 Conversor analógico-digital

O conversor analógico-digital recebeu atenção especial desde o início do projeto, pois o desenvolvimento das demais partes dependeria de suas características de entrada e da possibilidade de programação de suas interfaces.

Diversos conversores A/D foram pesquisados e considerados, tendo-se optado por um conversor que consiste em uma placa de expansão, compatível com os microcomputadores da linha IBM-PC, fabricado pela empresa Lynx Tecnologia Eletrônica Ltda., e disponível no mercado nacional. Trata-se de um conversor de 12 bits (4096 níveis de digitalização), que possui uma série de características que o torna particularmente apropriado para o trabalho em questão. Estas características são:

a) velocidade de conversão de até 60.000 amostras por segundo;

b) entrada analógica para até 16 canais independentes;

c) base de tempo interna (2,00 MHz), independente da do microcomputador;

d) possibilidade de selecionar, via programa de controle, entre quatro níveis de amplificação, independentemente para cada canal;

e) capacidade de multiplexação da entrada, ou seja, é possível fazer um chaveamento das entradas dos diversos canais, utilizando-se apenas um conversor;

f) possibilidade de inicialização do registro por sinal gerado externamente;

g) capacidade de acessar a memória do microcomputador independentemente de seu processador, por meio do DMA ("direct memory access" - acesso direto à memória). Esta característica permite a coleta de dados a 60 kHz, independente da velocidade da UCP do microcomputador;

h) possibilidade de ser programado de maneira convencional no microcomputador, tanto por linguagem de baixo nível (Assembler) como de alto nível (Pascal, C e

até mesmo Basic);

i) impedância da entrada dos amplificadores de 100 kOhms;

j) precisão de ± 1/2 bit menos significativo;

l) as alimentações necessárias são fornecidas pelo próprio microcomputador;

m) possibilidade de operar em temperaturas entre 0° e 50°C.

Considerando-se que o padrão da indústria sismográfica utiliza o número de canais múltiplo de 6, optou-se pelo desenvolvimento de um sistema com 12 canais, o que atende a este padrão e também à grande parte dos trabalhos. A implementação de 12 canais permite a utilização desta placa a uma taxa de amostragem de 4.000 amostras por segundo por canal, o que possibilita, de acordo com o teorema de amostragem, trabalhar com uma freqüência do sinal sísmico de até 2.000 Hz.

4.2.3 Microcomputador tipo IBM-PC

O microcomputador utilizado no desenvolvimento do sistema é um compatível ao IBM-PC-XT, marca Panasonic, modelo Business Partner (FX-600 Series), fabricado no Japão, dotado do processador 8086 fabricado pela INTEL, e com freqüência de relógio de 7.16 MHz. Este microcomputador é equipado com duas unidades de disco flexível (360 kbytes cada), um disco rígido com capacidade de 20 Mbytes e um co-processador aritmético 8087-2 marca INTEL. A unidade de vídeo consiste em um monitor monocromático de cor âmbar, marca AMDEK modelo 310-A, cujo padrão é conhecido pelo nome comercial de "Hércules" (720 pontos na horizontal e 348 na vertical). A alimentação de ambos é 110 Volts corrente alternada (60Hz).

Este sistema foi utilizado em todo o desenvolvimento e nos trabalhos de campo por não se ter disponível um microcomputador tipo "laptop". Para os trabalhos de campo onde não se dispunha de eletricidade, usou-se um conversor DC-AC marca Tektronix, modelo 1105, que transforma 24 Volts (corrente contínua - duas baterias de automóvel em série) em 110 Volts e corrente alternada (60Hz). Adotando-se esta montagem, é possível trabalhar

normalmente cerca de sete horas com a carga das baterias.

4.2.4 Amplificador e filtros

Foi desenvolvido especialmente um conjunto de amplificadores e filtros cujo objetivo primeiro consiste em trazer os sinais provenientes do sensor a níveis compatíveis com as entradas do conversor analógico-digital. Para isto, é dado um ganho fixo de 100 vezes, o que equivale a 20 dB. Um conjunto de filtros associados aos amplificadores limita a banda de freqüência entre 20 Hz e 1000 Hz ou 200 Hz e 1000 Hz. Estes circuitos foram implementados em uma placa de circuito impresso especialmente desenvolvida para esse fim, porém com um desenho que permitiria uma série de opções de desenhos de filtros diferentes, caso se desejasse modificar o projeto. Por este motivo, não se preocupou com o tamanho final da placa.

Na implementação final, os filtros corta-baixas consistem em filtros tipo Chebyshev, que aplicam uma atenuação de 12 dB/oitava, e cuja freqüência de corte (20 ou 200 Hz) é selecionada por um "jumper" na placa de circuito impresso. Este estágio de filtros aplica um ganho de 10 vezes no sinal acima da freqüência de corte. O diagrama elétrico destes filtros é apresentado na Figura 12.

O filtro corta-altas consiste em filtro tipo Chebyshev implementado de forma a atenuar o sinal com uma rampa de 24 dB/oitava, e freqüência de corte de 1000 Hz. Este filtro possui a rampa de corte mais abrupta, pois ele tem também a função de filtro anti-Alias. Este estágio fornece, igualmente, um ganho de 10 vezes no sinal, o que, associado ao anterior, dá o ganho total de 100 vezes. O diagrama elétrico deste estágio é apresentado na Figura 13.

Apesar de a taxa de amostragem selecionada para o conversor analógico-digital permitir a aquisição teórica de até 2.000 Hz, optou-se por utilizar filtro de 1.000 Hz e rampa de corte menos abrupta, por razões de custo.

O projeto de ambos os filtros (corta-altas e corta-baixas) foi baseado em Johnson and Hilburn (1975).

Foi desenvolvido também um circuito de filtro "notch" (corta bandas sintonizado em 60 Hz), que opcionalmente pode ser acionado por meio de um "jumper". Seu diagrama elétrico encontra-

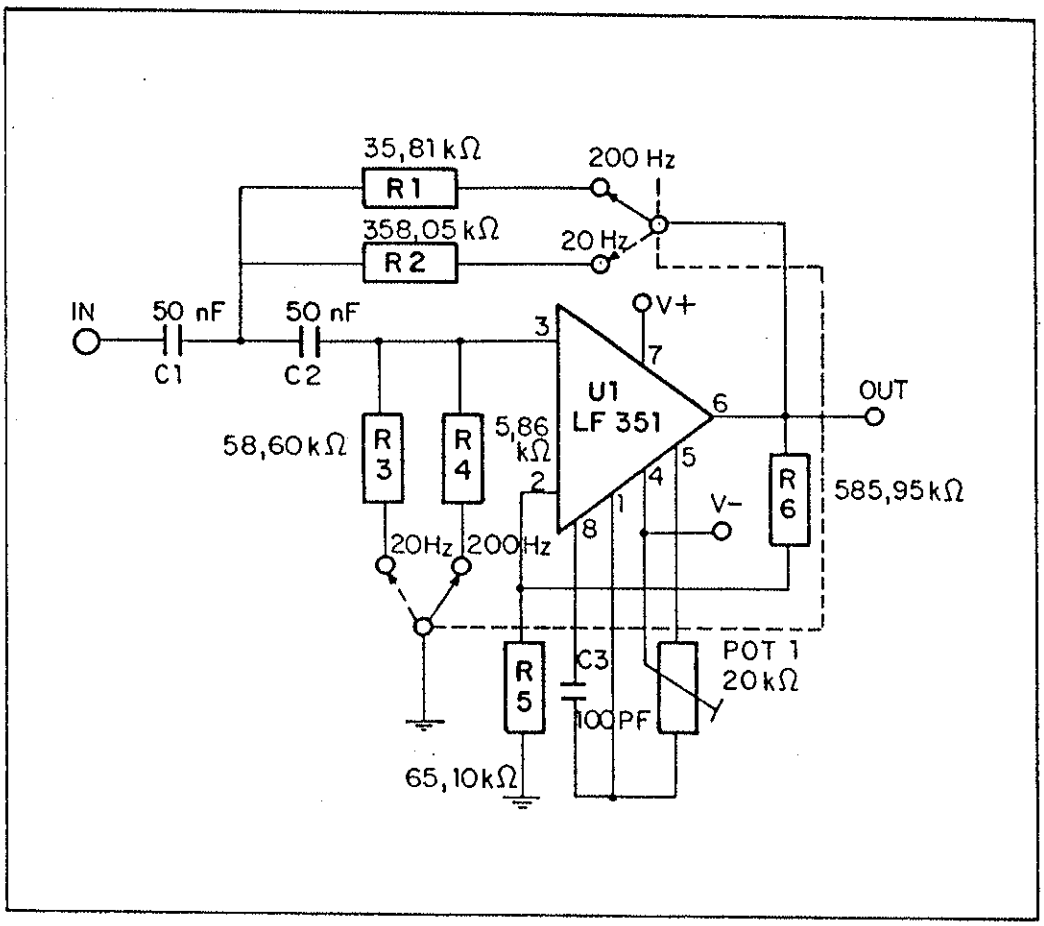


Figura 12 - Diagrama elétrico esquemático do filtro corta-baixas utilizado no protótipo desenvolvido

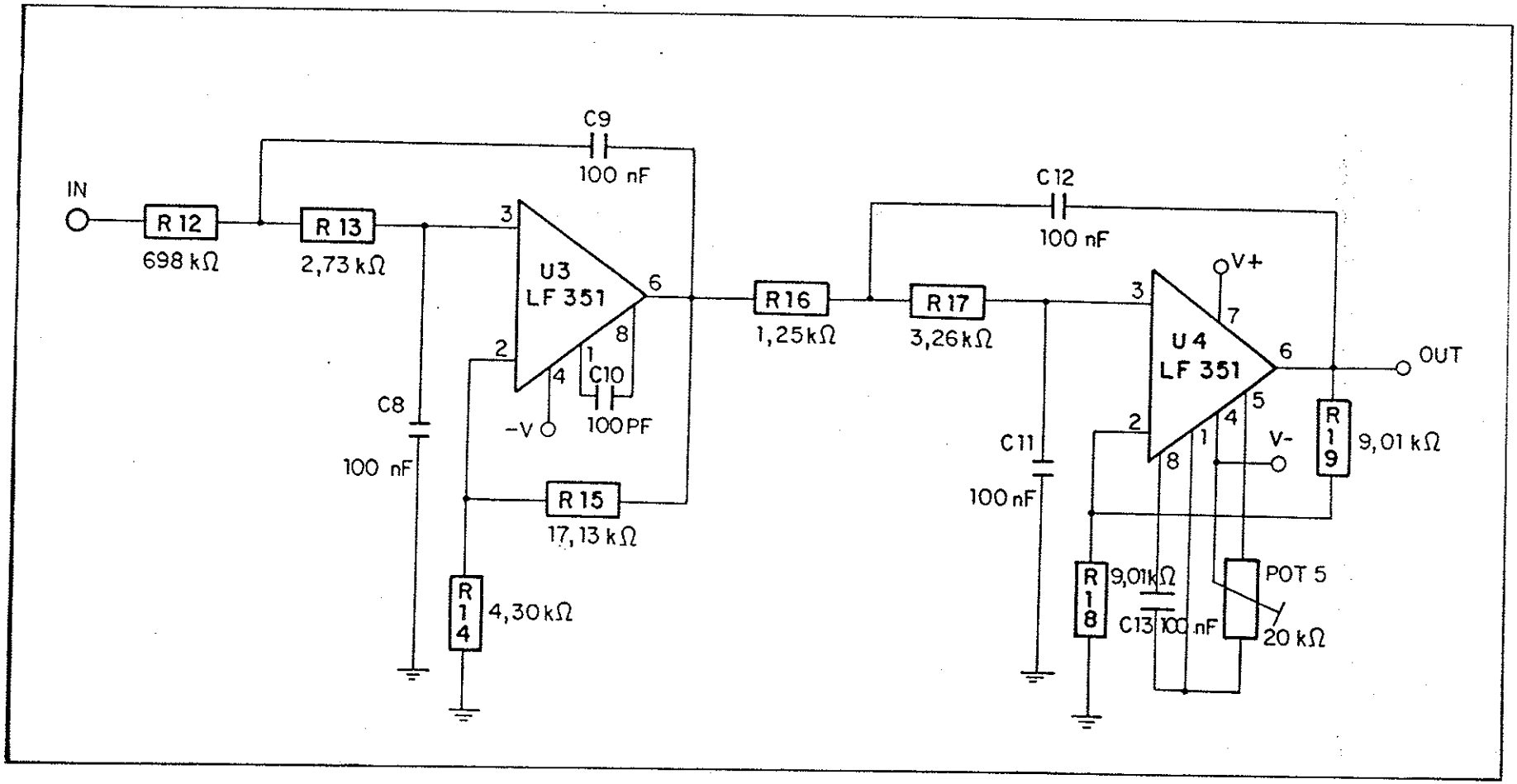


Figura 13 - Diagrama elétrico esquemático do filtro corta-altas utilizado no protótipo desenvolvido

se na Figura 14, e seu projeto foi baseado em Texas Instruments (1982).

Os amplificadores e filtros estão montados em placa de circuito impresso de tal maneira que se tem uma placa por canal e, por serem idênticas, são intercambiáveis. As doze placas foram colocadas em uma caixa tipo maleta, forrada com folha de alumínio, e contendo ainda duas baterias seladas de 12 Volts e 6,5 Ah, e um circuito de fonte estabilizada que recebe a tensão das baterias (12 Volts) e regula tensões de +8 e -8 Volts, que são as utilizadas para alimentação dos sensores e dos circuitos de amplificação e filtros. O valor de tensão de 8 Volts foi escolhido por permitir que se trabalhe sem problemas com tensão mínima das baterias de 10,5 Volts. O diagrama elétrico esquemático deste circuito de fonte de alimentação é apresentado na Figura 15. As baterias utilizadas foram propositadamente superdimensionadas a fim de possibilitar sua eventual utilização como fonte de energia auxiliar para um microcomputador tipo "laptop" (cujas baterias internas têm carga para cerca de apenas 3 horas de trabalho).

Depois da calibração de cada placa (obtida pelos métodos convencionais de laboratório, com sinais senoidais, e com ruído branco contínuo de amplitudes conhecidas), foram efetuados diversos testes de laboratório para se avaliar o desempenho tanto dos amplificadores como dos filtros. Os resultados apresentaram-se satisfatórios, e então procurou-se efetuar teste que simulasse mais de perto as condições de campo, ou seja, o comportamento dos amplificadores e filtros quando solicitados a sinais transientes. Para isto, foi montado um circuito gerador de um pulso único com amplitude de aproximadamente 70 mV e duração menor do que um ciclo de amostragem do conversor A/D (menor do que 15 microssegundos). Este pulso foi injetado em cada um dos canais e a resposta foi registrada em arquivos no microcomputador, posteriormente recuperados para cálculo do espectro de freqüência contido no sinal. O espectro de freqüência proveniente de tal análise consiste na resposta dinâmica dos amplificadores e filtros, uma vez que o conteúdo em freqüências de um pulso é infinito. A Figura 16 traz o esquema da montagem experimental utilizada. Os gráficos dos resultados típicos obtidos para as diversas combinações de filtros possíveis estão apresentados nas Figuras 17, 18, 19 e 20. A análise e comparação dos diversos gráficos permitem afirmar que

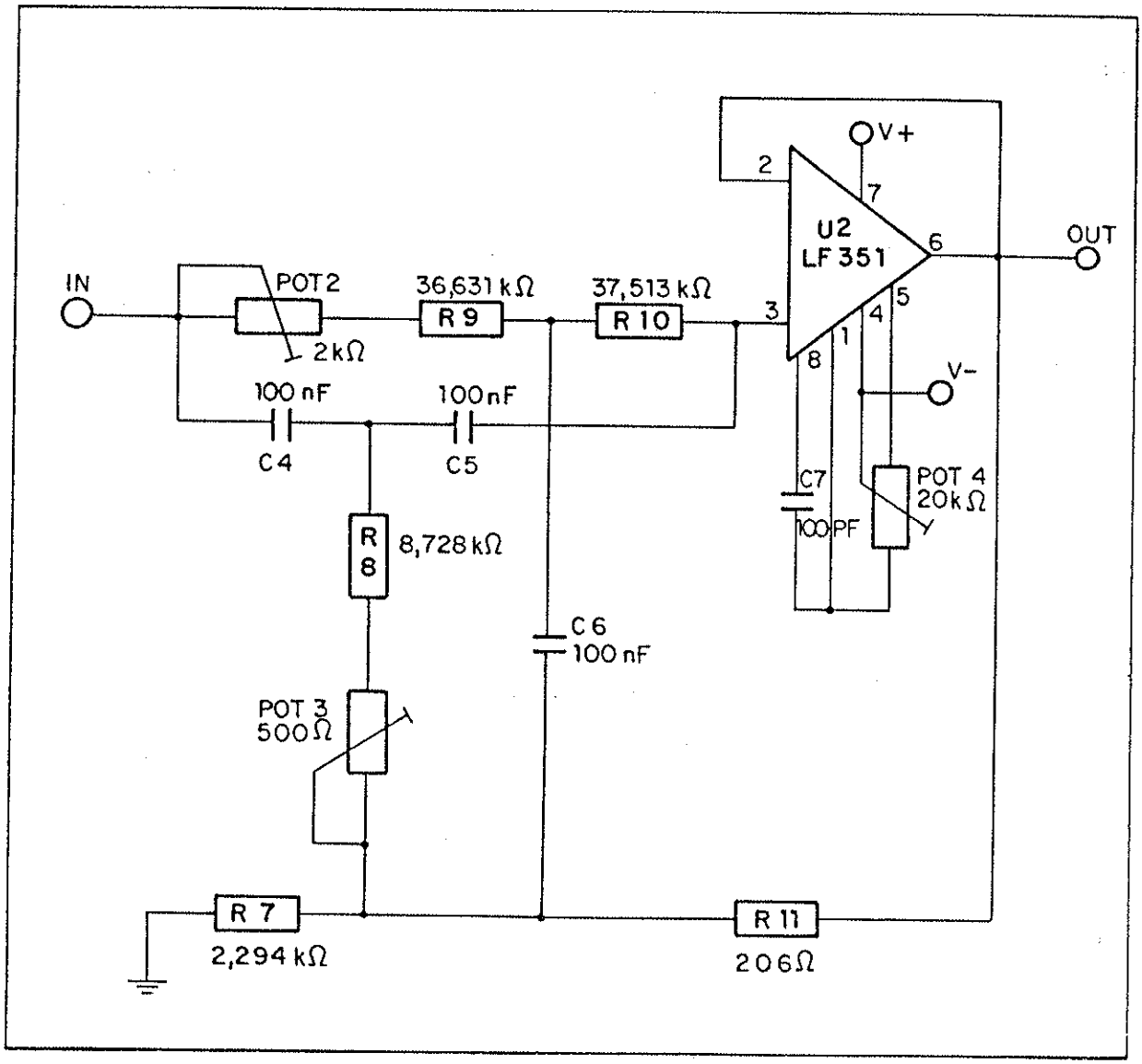
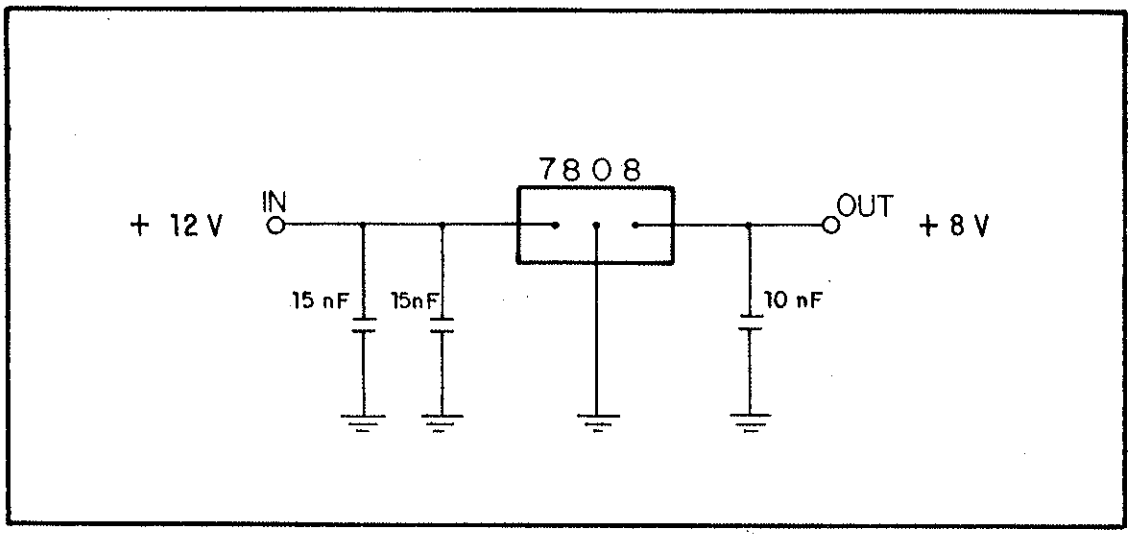


Figura 14 - Diagrama elétrico esquemático do filtro "notch" desenvolvido e utilizado neste trabalho.



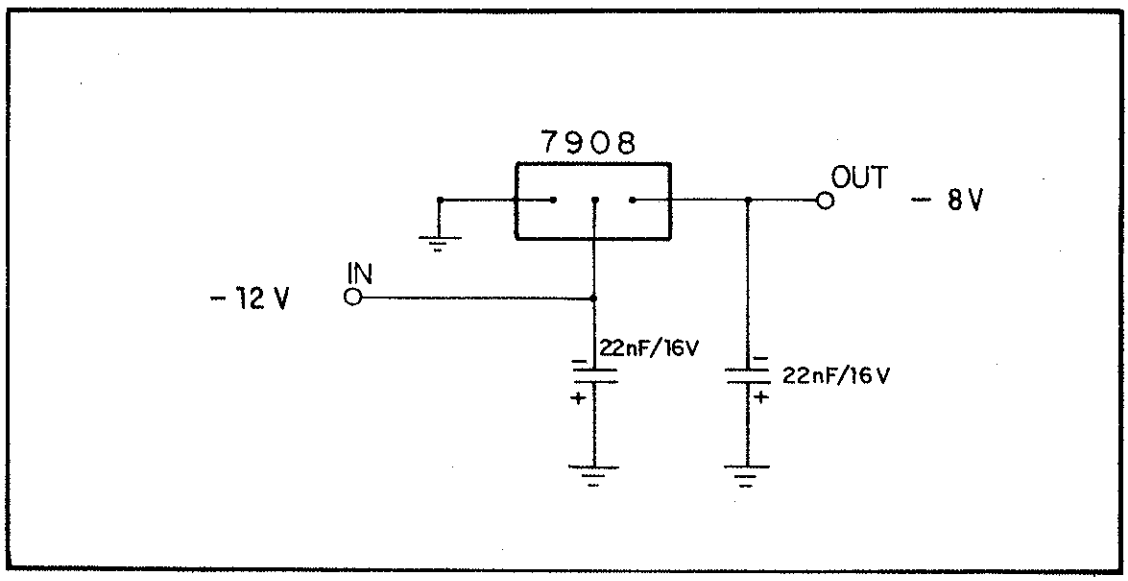


Figura 15 - Diagrama elétrico esquemático da fonte de alimentação do sistema (a superior é de + 8 V e a inferior de -8 V)

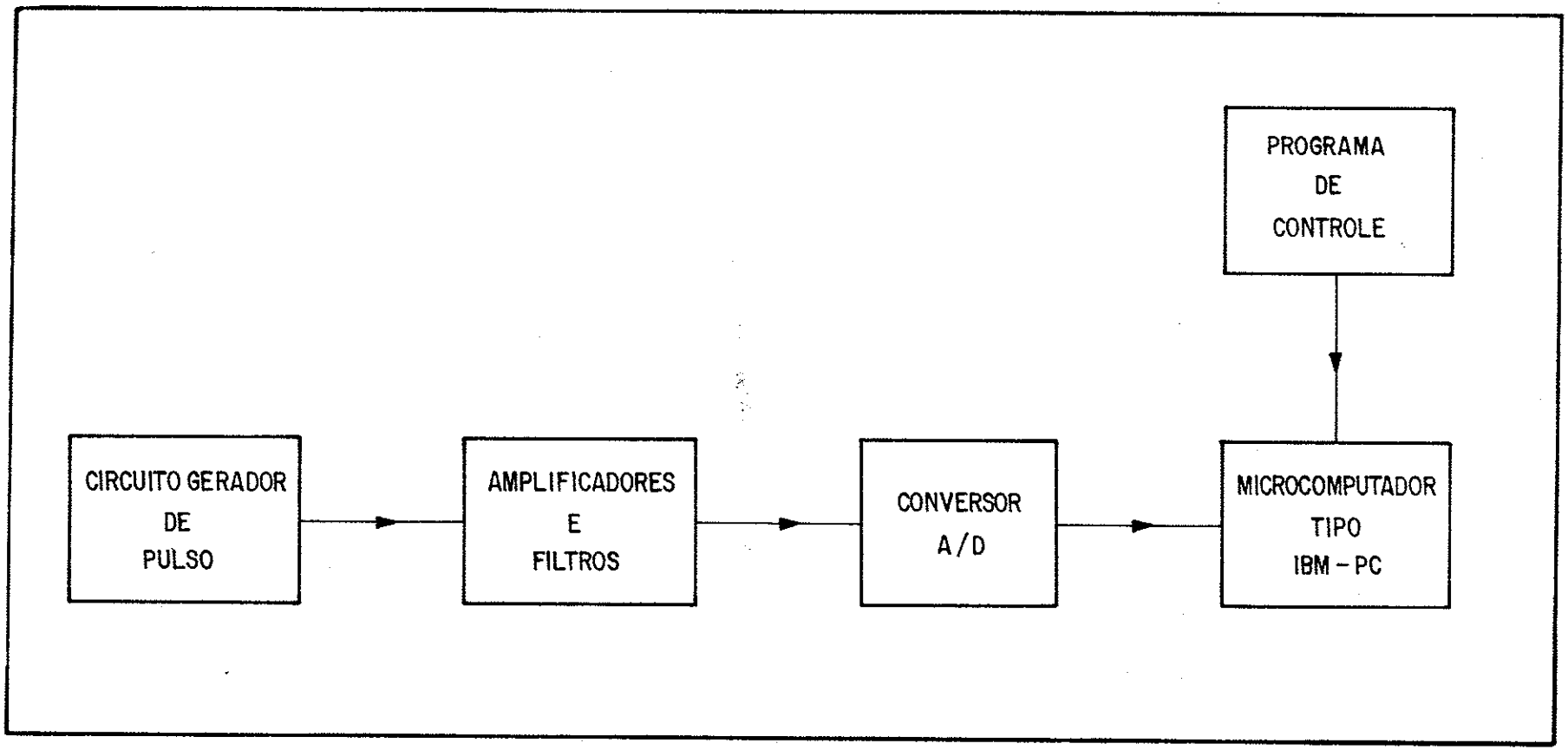


Figura 16 - Diagrama de blocos da montagem experimental utilizada para testes da resposta dinâmica dos amplificadores e filtros.

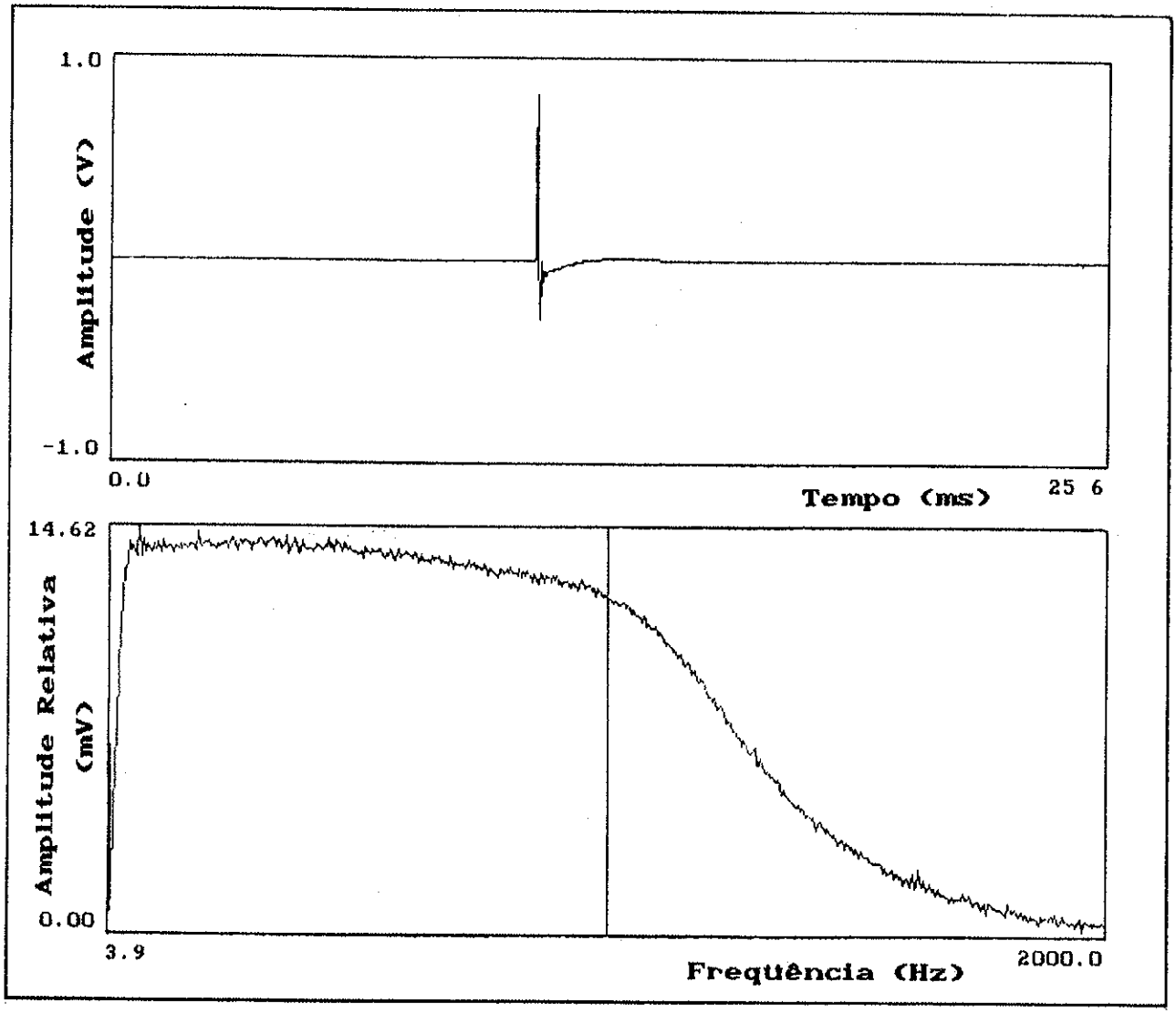


Figura 17 - Resposta em freqüência dos filtros 20 Hz e 1000 Hz. A parte superior mostra o sinal registrado no domínio do tempo, e a parte inferior, seu conteúdo em freqüências.

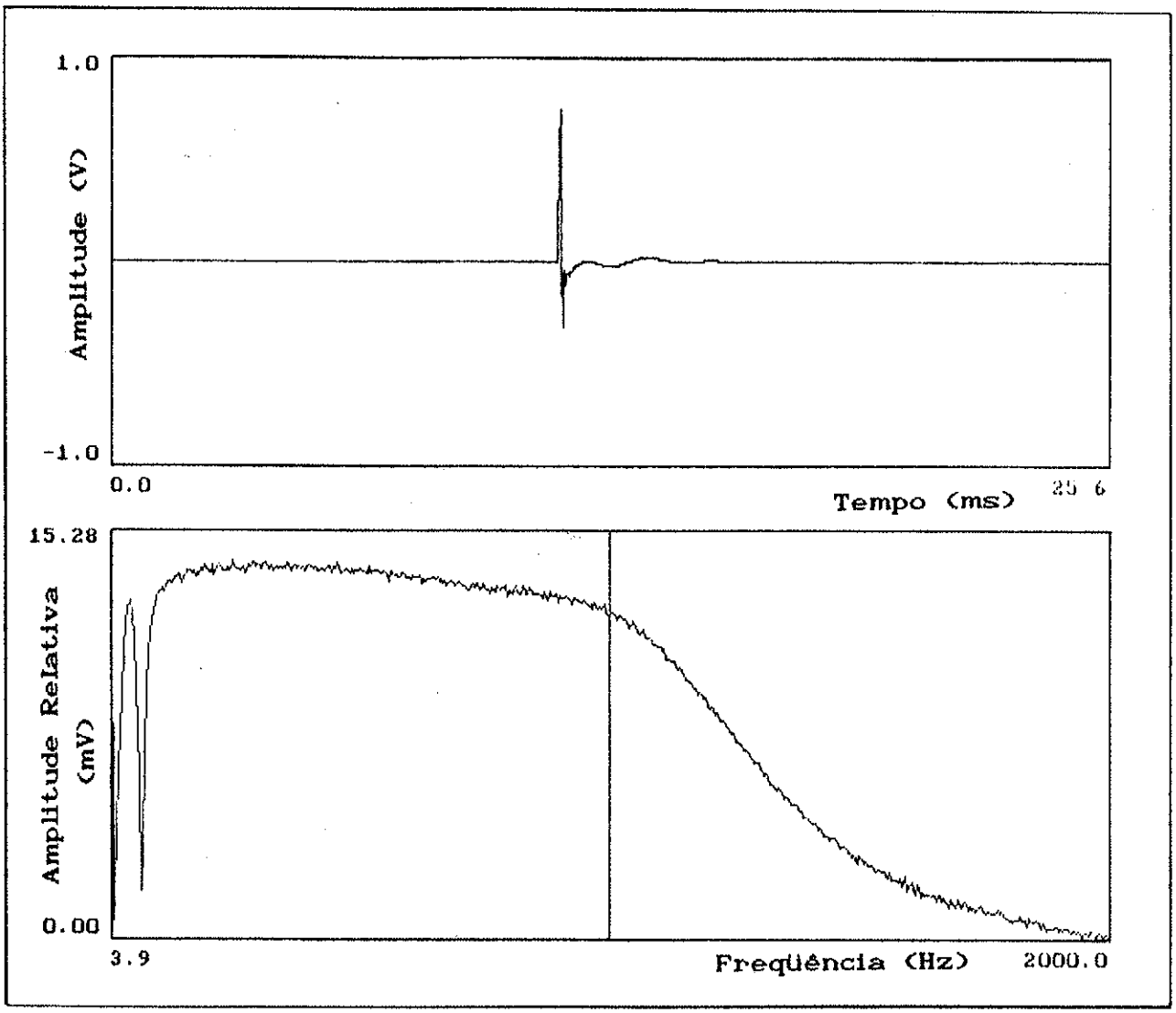


Figura 18 - Resposta em freqüência dos filtros 20 Hz, "notch" e 1000 Hz. A parte superior mostra o sinal registrado no domínio do tempo, e a parte inferior, seu conteúdo em freqüências.

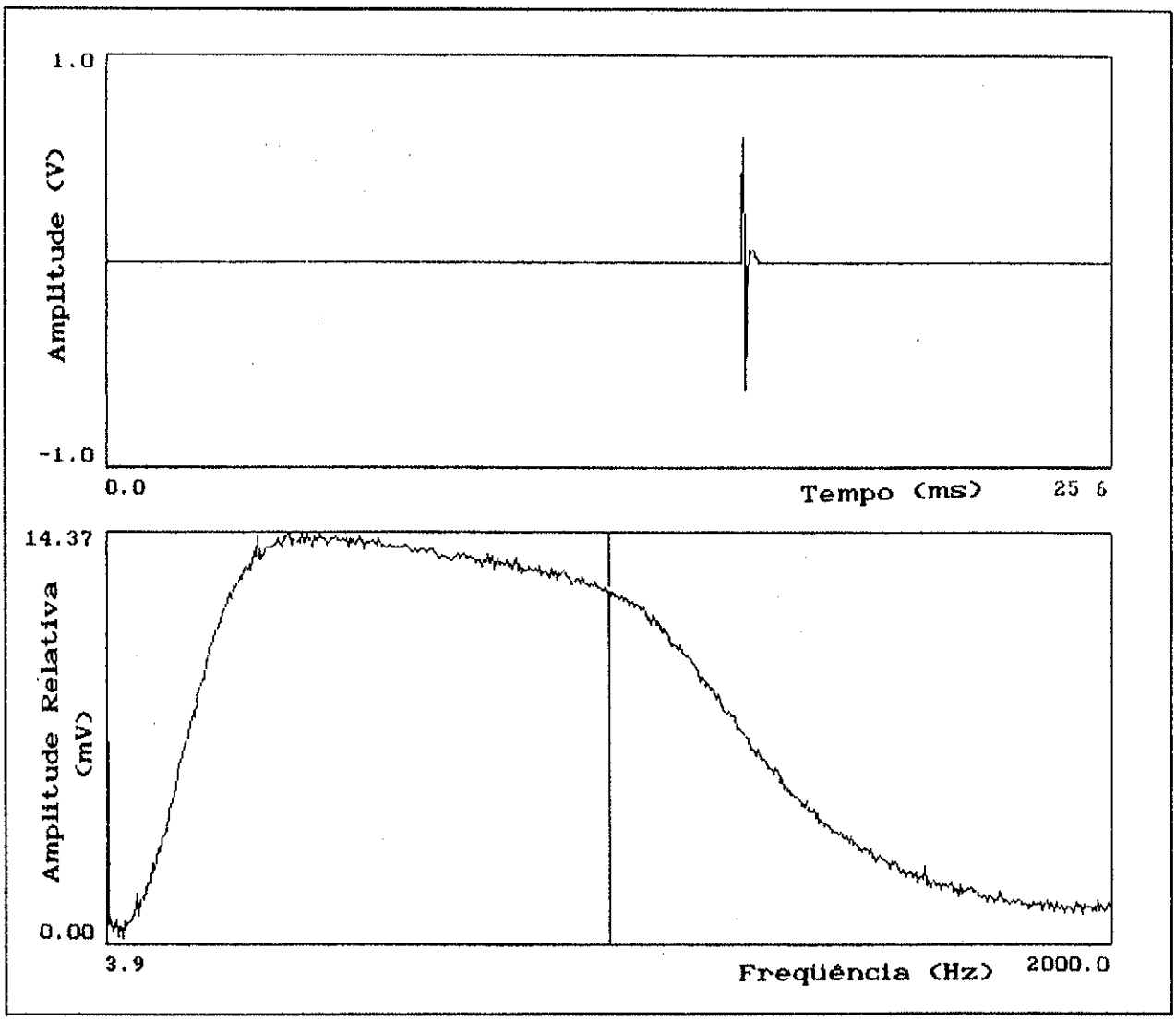


Figura 19 - Resposta em freqüência dos filtros 200 Hz e 1000 Hz. A parte superior mostra o sinal registrado no domínio do tempo, e a parte inferior, seu conteúdo em freqüências.

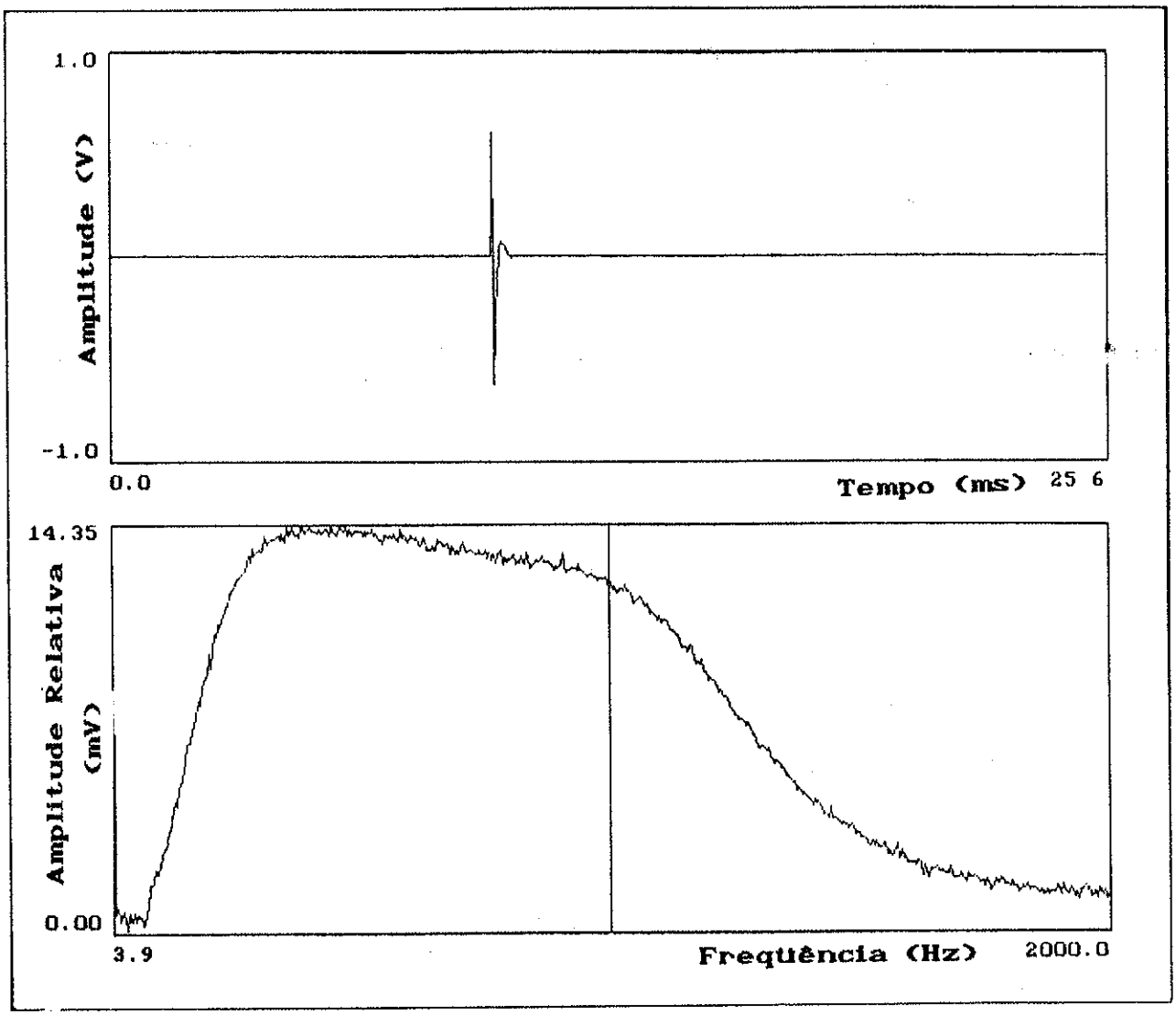


Figura 20 - Resposta em freqüência dos filtros 200 Hz, "notch" e 1000 Hz. A parte superior mostra o sinal registrado no domínio do tempo, e a parte inferior, seu conteúdo em freqüências.

os amplificadores e filtros apresentaram resposta em freqüência de acordo com o projeto, e comportamento bastante homogêneo (dentro de ± 5%) entre todos os canais.

Outra série de testes foi efetuada com uma configuração experimental, conforme mostrado na Figura 21. Os testes eram realizados por meio de um ruído branco injetado na entrada do amplificador de potência do sistema vibratório e observada a transformada de Fourier do sinal de saída, de tal forma que se obtinha de maneira rápida a resposta em freqüência do circuito de amplificadores e filtros quando operando em conjunto com os acelerômetros. Foram efetuados ensaios deste tipo para as várias combinações possíveis de filtros, e os resultados típicos são apresentados nas Figuras 22, 23 e 24. Utilizou-se a mesma configuração de teste para o levantamento da resposta de fase dos circuitos, e os resultados típicos encontram-se nas Figuras 25, 26 e 27. Pelos resultados destes ensaios, pode-se notar que as respostas obtidas são bastante semelhantes às dos amplificadores isolados.

4.2.5 Cabo sismográfico

Para a conexão dos sensores aos respectivos circuitos de amplificação e filtros foi desenvolvido um cabo sismográfico especial. Este cabo consiste em um cabo elétrico, utilizado normalmente em telefonia, e portanto facilmente encontrado no mercado, composto por 22 condutores flexíveis bitola AWG # 24, com uma malha de cobre estanhado que funciona como blindagem. Trabalhos anteriores executados pelo autor (Taioli e Ribeiro, 1990a e 1990b), usando o mesmo cabo em outros sistemas de aquisição de dados de campo, mostraram resistência e durabilidade em condições adversas, qualidades estas imprescindíveis para os trabalhos sismográficos. As tomadas para cada sensor foram executadas por meio de uma incisão e ligação de um outro cabo flexível com quatro condutores e comprimento de 0,30 m, em cuja extremidade foi instalado um conector de quatro pinos que fornece a alimentação elétrica ao sensor e recebe os sinais sísmicos. As tomadas estão espaçadas a cada 5 metros, de tal forma que o cabo tem um comprimento total de 60 metros. Em uma extremidade do cabo sismográfico foi instalado um conector de 24 pinos, do qual são utilizados 15 pinos (12 para os sinais sísmicos, um para a

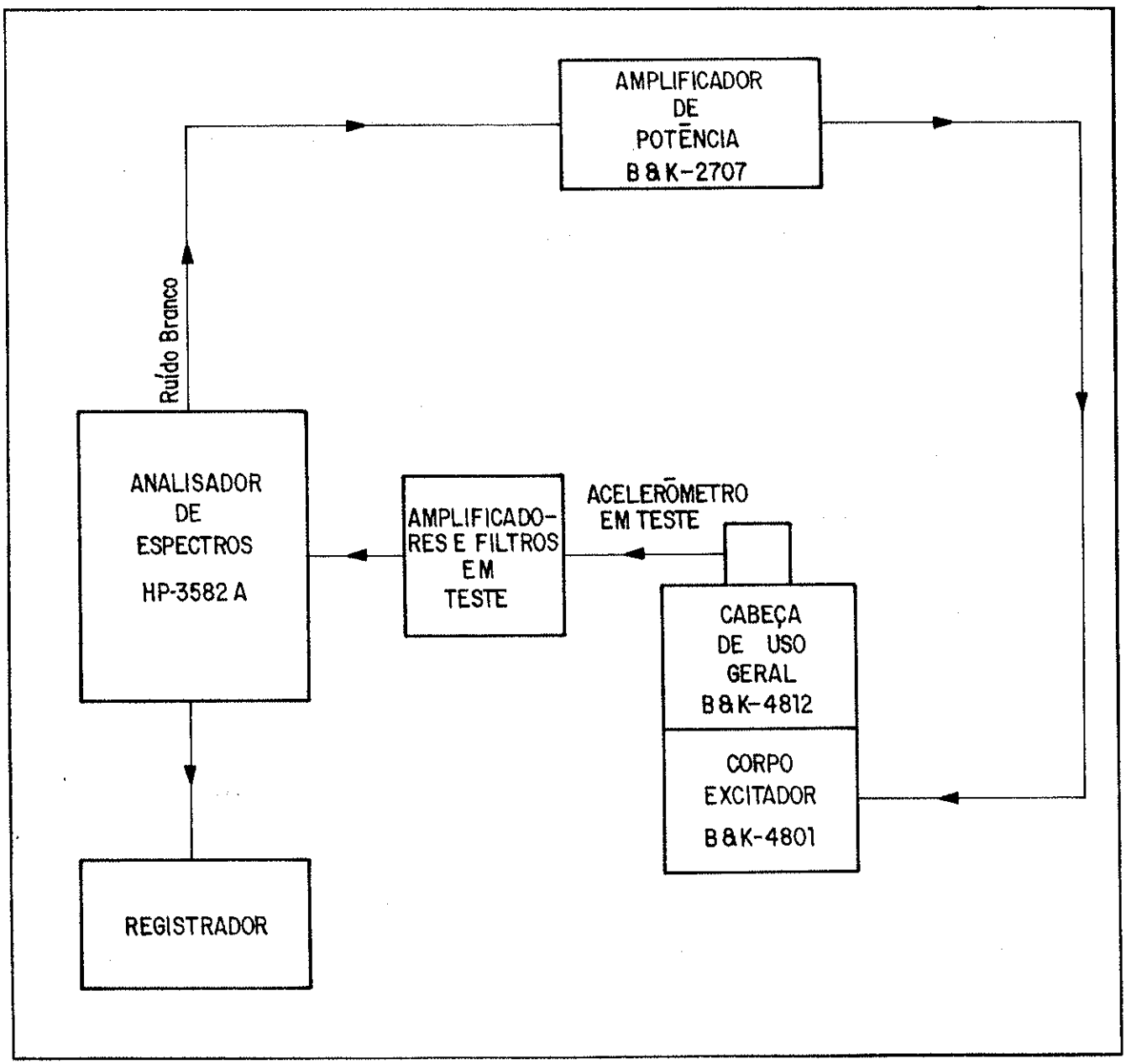


Figura 21 - Diagrama de blocos da montagem experimental utilizada para testes dos acelerômetros em conjunto com os amplificadores e filtros.

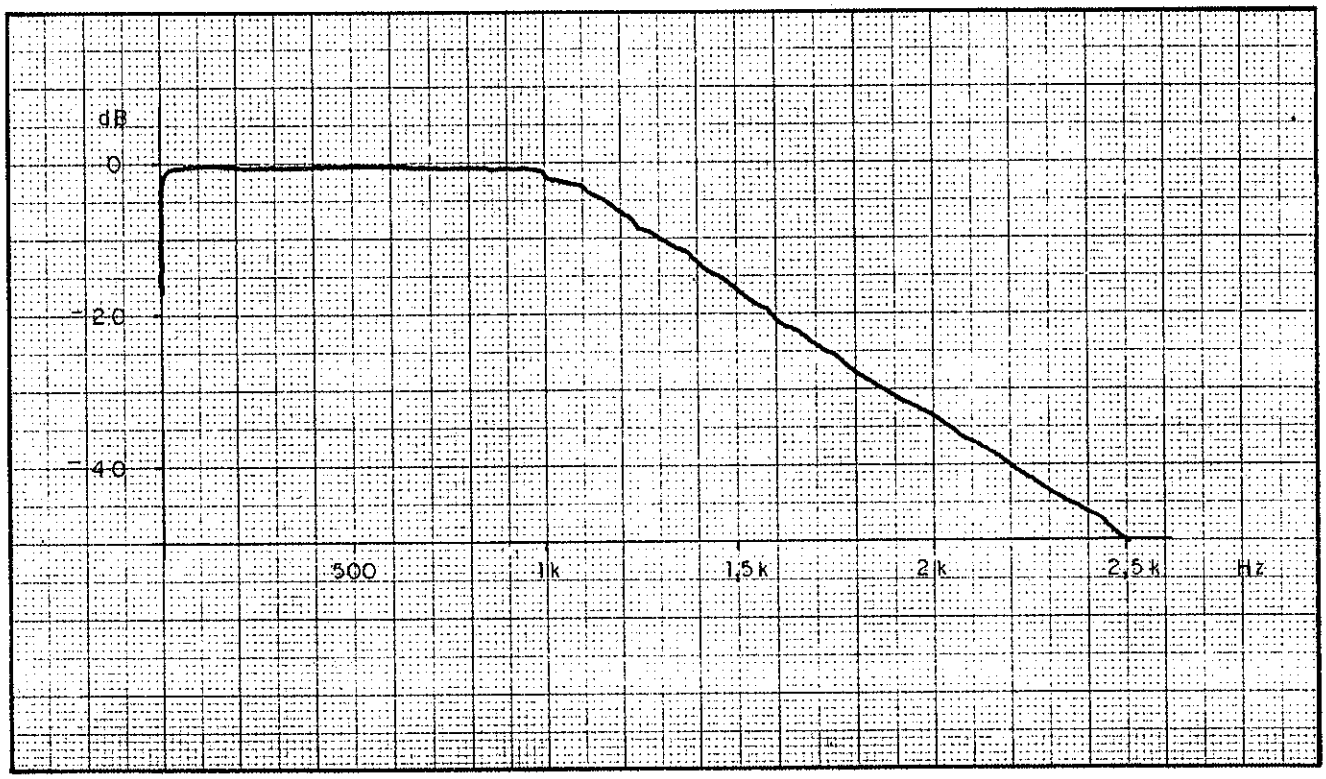


Figura 22 - Resposta em freqüência dos filtros 20 Hz e 1000 Hz em conjunto com acelerômetro.

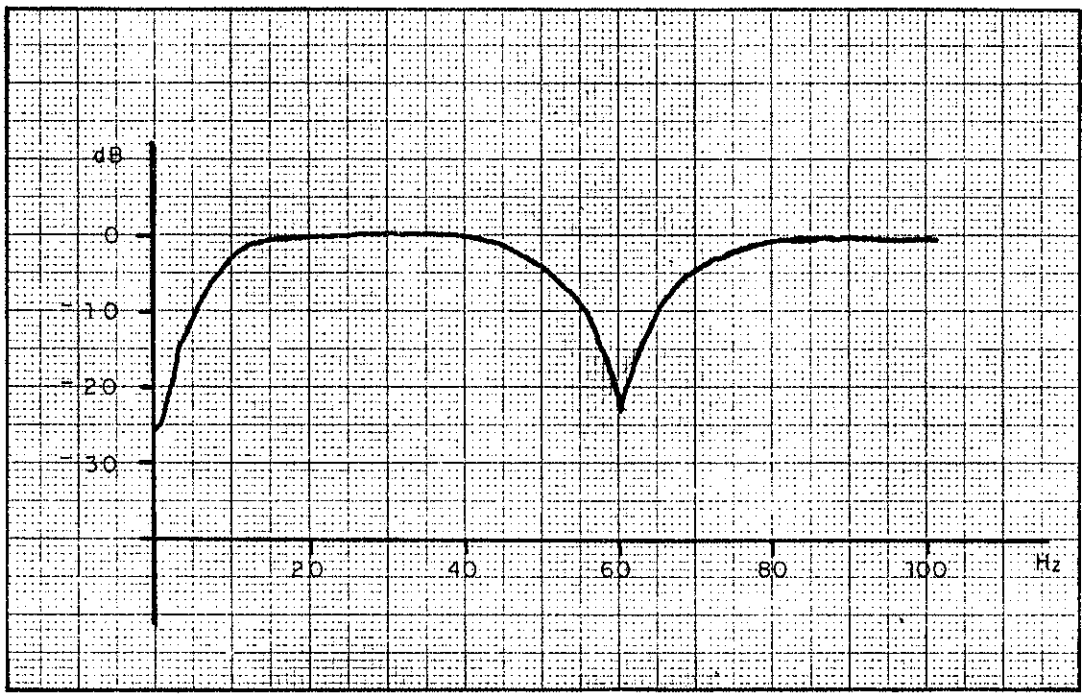


Figura 23 - Detalhe da resposta em freqüência dos filtros 20 Hz e "notch" em conjunto com acelerômetro.

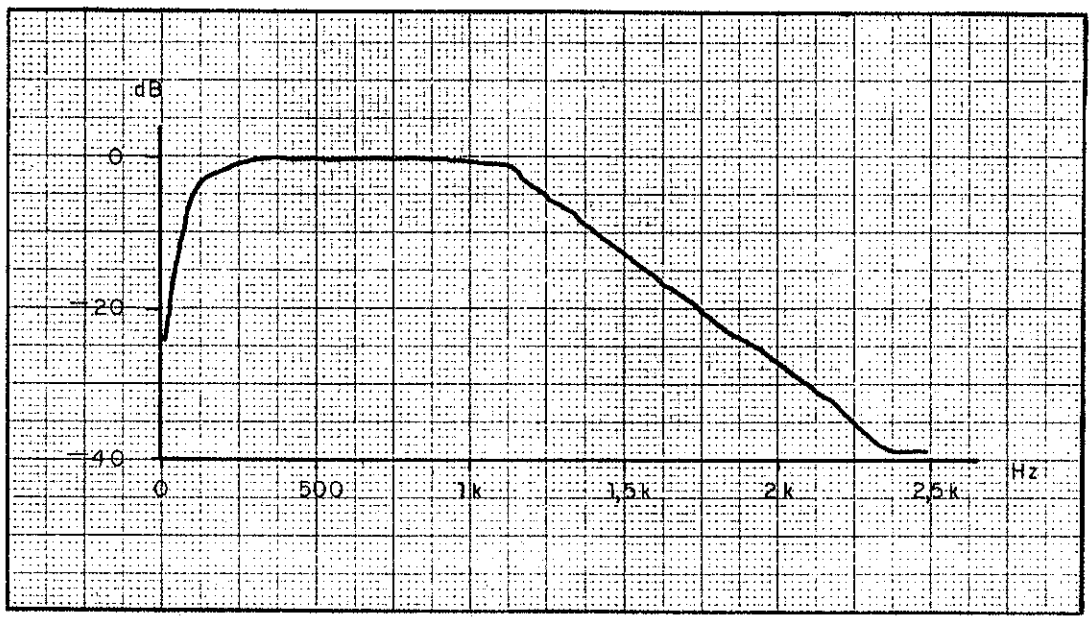


Figura 24 - Resposta em freqüência dos filtros 200 Hz e 1000 Hz em conjunto com acelerômetro.

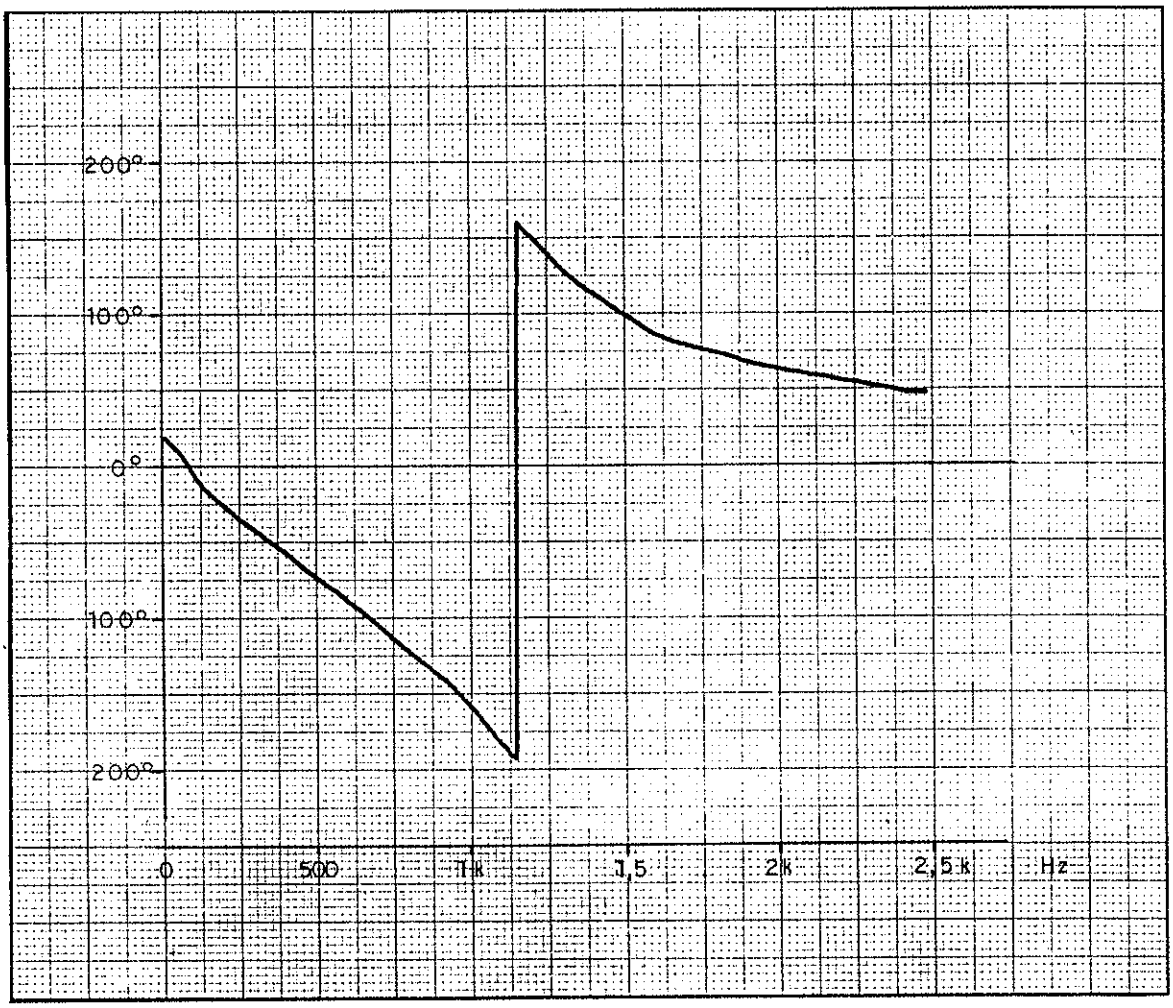


Figura 25 - Diagrama de fase dos filtros 20 Hz e 1000 Hz em conjunto com acelerômetro.

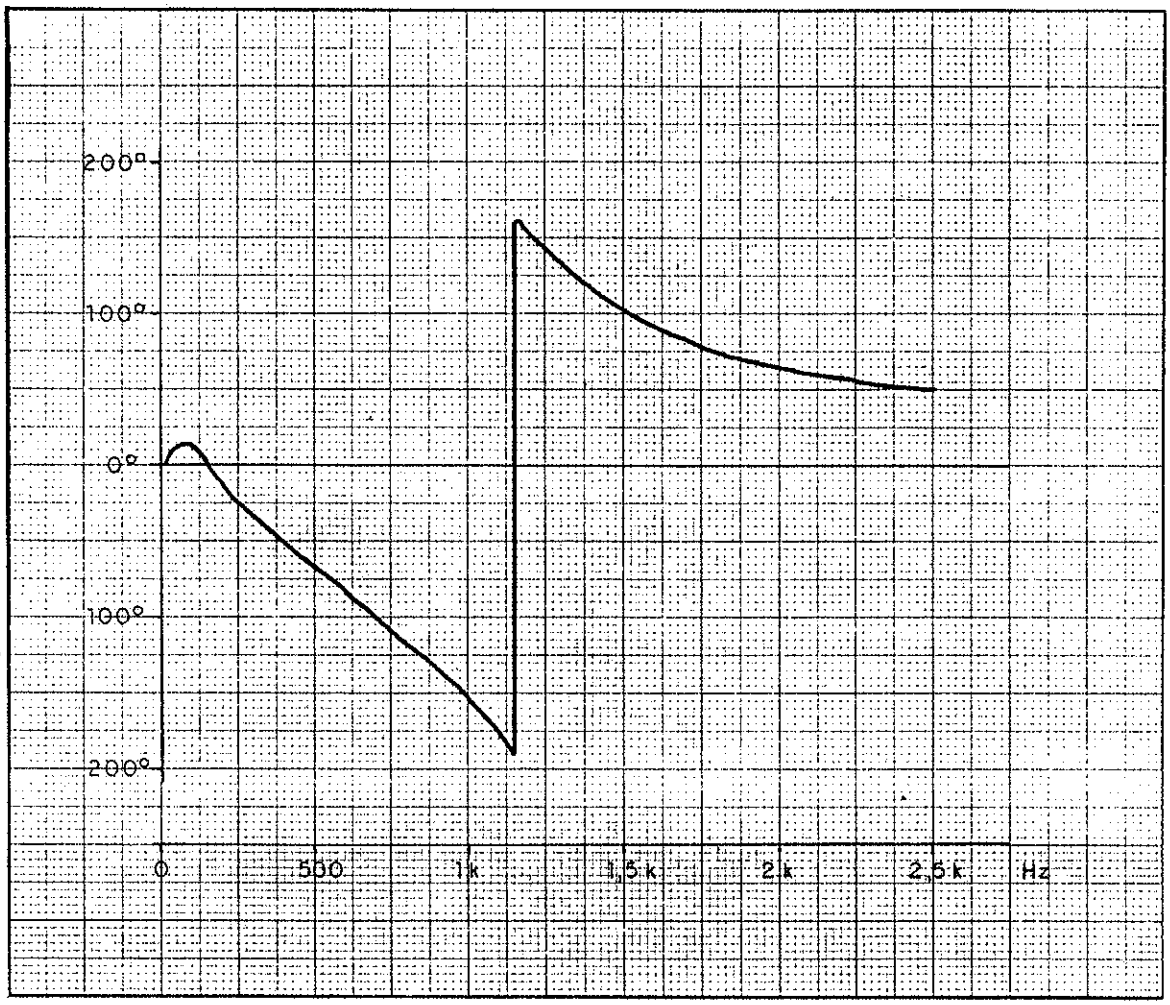


Figura 26 - Diagrama de fase dos filtros 20 Hz, "notch" e 1000 Hz em conjunto com acelerômetro.

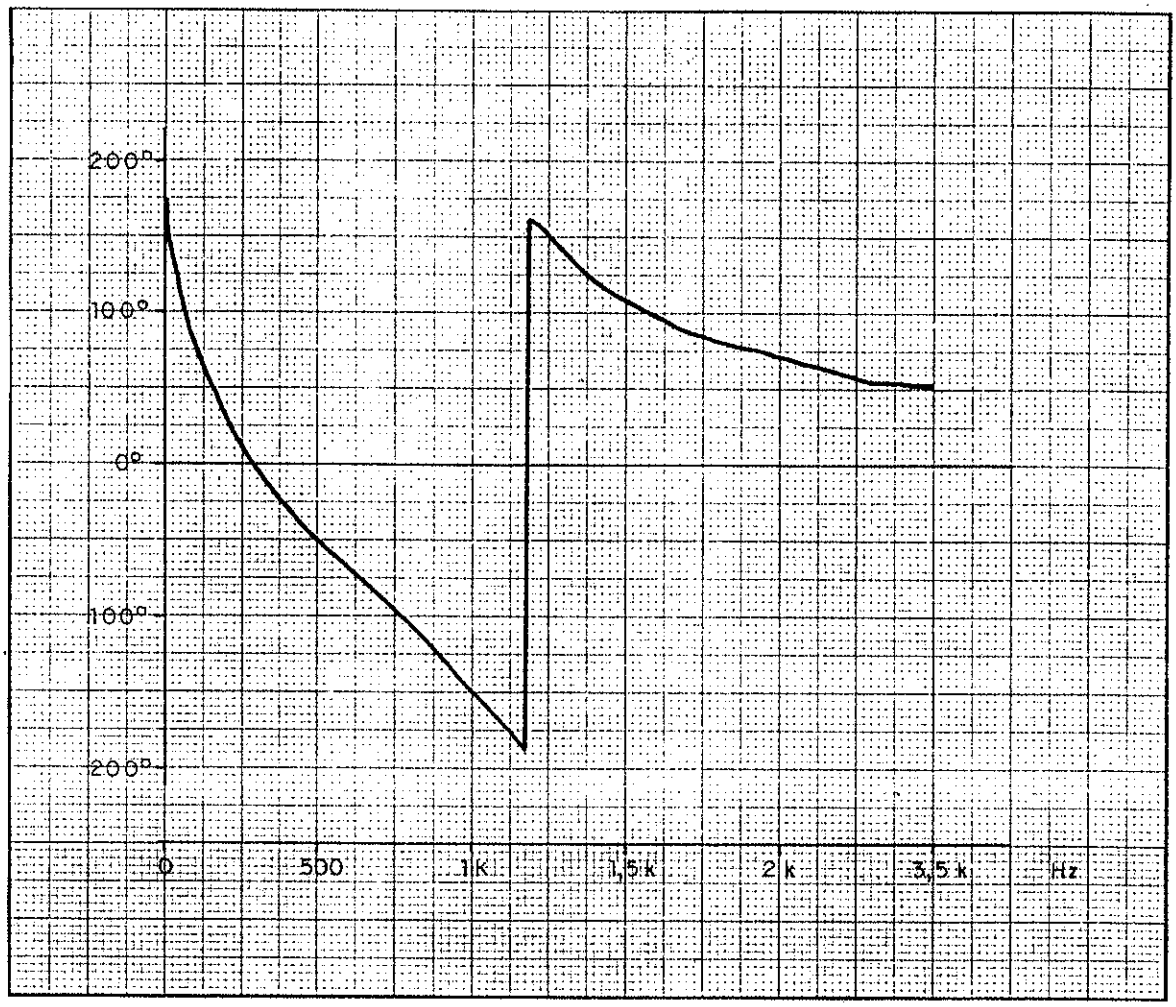


Figura 27 - Diagrama de fase dos filtros 200 Hz e 1000 Hz em conjunto com acelerômetro.

alimentação positiva, um para a alimentação negativa e um para o terra). Este conector permite a ligação do cabo na caixa de amplificadores. O diagrama esquemático do cabo sismográfico desenvolvido é apresentado na Figura 28.

4.2.6 Programa de controle

O programa para executar o controle da operação de todo o sistema foi escrito em linguagem Pascal, utilizando-se o compilador Turbo Pascal versão 5.5 da Borland International no ambiente MS-DOS. Foi escolhida esta linguagem por permitir fácil controle de endereços, entrada e saída de dados e a manipulação de "bits". Em adição, a versão utilizada do compilador Turbo Pascal possui uma biblioteca de comandos gráficos bastante poderosa. Por ser também uma linguagem estruturada, a manutenção do programa torna-se bastante facilitada.

O programa de controle foi desenvolvido utilizando-se uma arquitetura que procura simular a operação dos sismógrafos digitais convencionais. Isto foi feito a fim de reduzir o tempo de aprendizagem e a possibilidade de erro do operador.

O programa pode ser descrito em dois níveis diferentes: um nível é como o usuário o enxerga , enquanto o outro é como o programa funciona internamente.

Para o usuário, assim que o programa é iniciado, é apresentado um menu (Figura 29) com quatro opções, as quais são:

a. ajusta parâmetros globais;
b. recupera arquivo;
c. adquire novo registro, e
d. termina.

A primeira opção (ajusta parâmetros globais) permite ao usuário fornecer dados importantes que serão gravados no cabeçalho do arquivo de dados. Estas informações consistem em: nome do trabalho que está sendo executado, tempo de atraso entre o gatilhamento e o início do registro, filtro passa-altas escolhido, "offset" utilizado (distância entre o ponto de tiro e o primeiro geofone da linha), espaçamento entre geofones, posição do ponto de tiro na linha sísmica, direção do tiro (direto, central ou reverso), seleção dos ganhos dos 12 canais, e finalmente, possibilidade de retornar ao menu inicial.

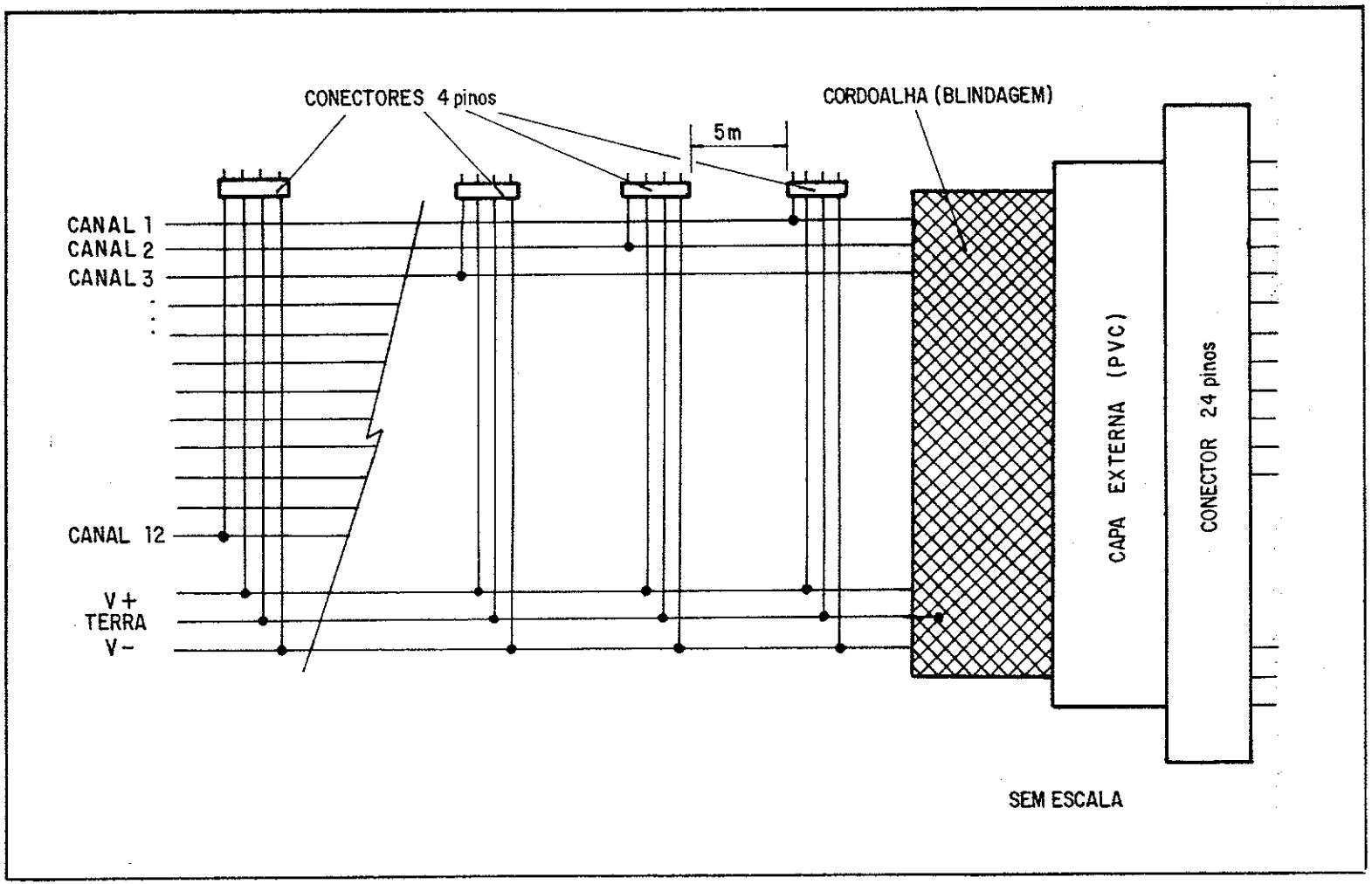


Figura 28 - Diagrama esquemático do cabo sismográfico desenvolvido e utilizado neste trabalho.

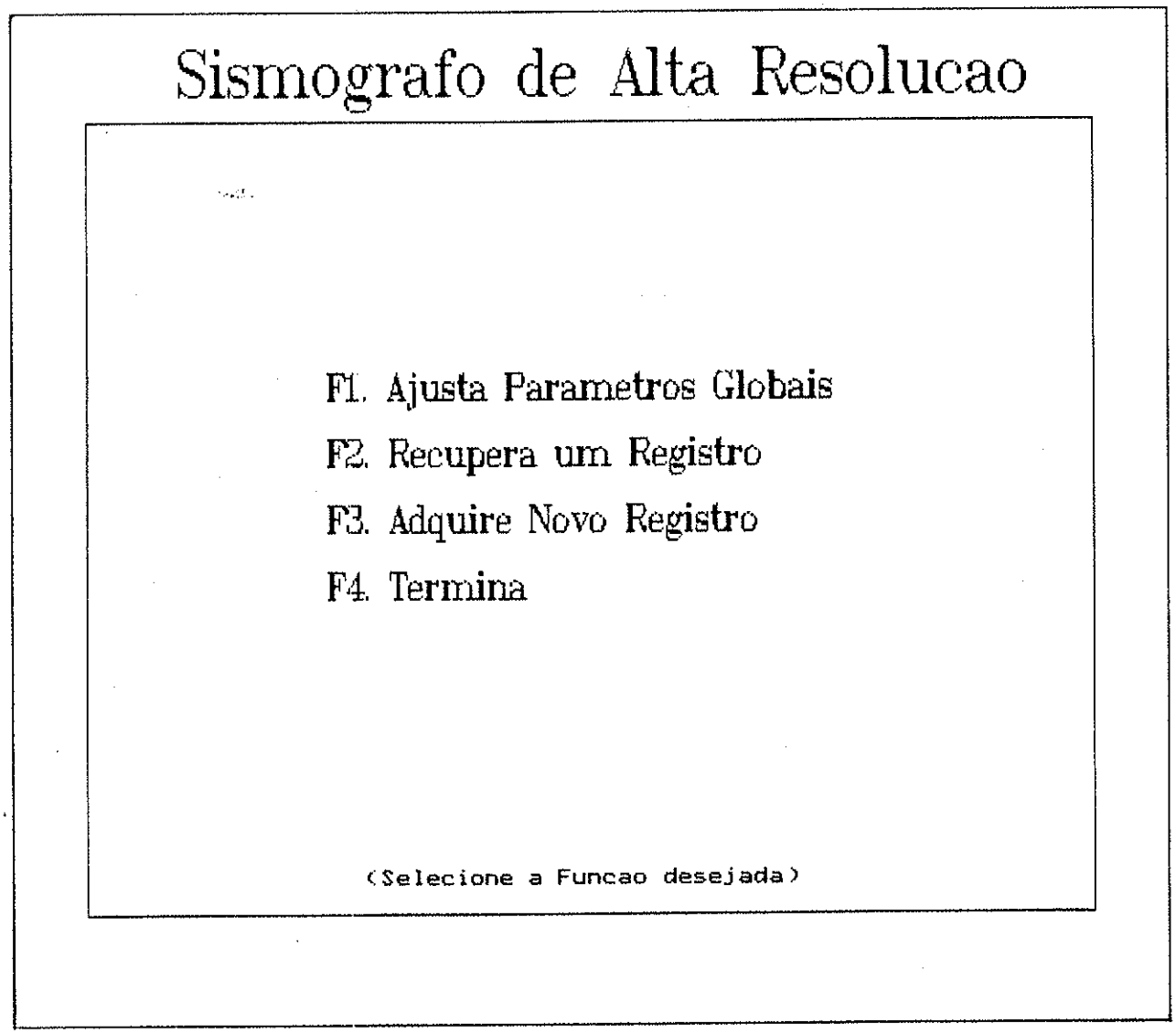


Figura 29 - Menu de opções apresentado pelo programa de controle na inicialização do sistema.

A segunda opção (recupera arquivo) permite recuperar um arquivo de um registro efetuado anteriormente e o apresenta no vídeo de forma gráfica. Convém salientar que esta opção não permite acesso ao registro, ou seja, não é possível alterá-lo ou utilizá-lo em operação de empilhamento, de tal forma que o registro é preservado na sua forma original. Por outro lado, é apresentado um menu de opções que permite amplificar os traços, aplicar um "zoom" e imprimir a tela. As outras opções disponíveis são a de adquirir um novo registro, verificar o ruído na linha sísmica e retornar ao menu inicial.

A terceira opção é a que possibilita acesso ao modo de aquisição de novos registros e, conseqüentemente, a opção utilizada durante o trabalho normal, e que será detalhada adiante.

A última opção (termina), como o próprio nome diz, encerra o processamento e retorna o computador ao modo de processamento normal.

Deve-se notar que, em cada uma das opções escolhidas, o usuário tem a seu dispor um novo menu de opções que o orienta quanto às possibilidades do sistema.

Internamente, o programa é formado por diversos módulos que são acionados de acordo com as opções escolhidas pelo usuário. Alguns módulos, entretanto, passam despercebidos, pois são os que acionam os endereços dos dispositivos de entrada e saída do conversor A/D, acionam o DMA, criam matrizes de dados, zeram matrizes de dados e fornecem informações específicas do equipamento para serem gravadas no cabeçalho do arquivo.

Os módulos de acesso disponível ao usuário são descritos a seguir:

a) ruído na linha - mostra um gráfico de barras com a amplitude do sinal presente em cada um dos canais;

b) adquire registro - descarta o conteúdo da matriz de dados e a prepara para receber um novo bloco de dados, que será iniciado em sincronismo com o sinal de disparo proveniente da fonte sísmica;

c) grava arquivo - permite gravar no disco o conteúdo da matriz de dados, assim como o seu cabeçalho. Antes da gravação é solicitado um nome para o arquivo;

d) amplificar traços - permite aplicar um fator de multiplicação aos dados em uso. Esta opção não modifica

os dados originais, pois é aplicado o fator de multiplicação simplesmente para tornar o registro mais visível no monitor;

e) zoom - mostra somente a primeira metade dos dados, porém com maior detalhe. Isto objetiva facilitar a visualização da parte inicial do registro;

f) imprime tela - coloca disponível a uma impressora de matriz de pontos o conteúdo da região de dados do monitor. É fornecido também um pequeno cabeçalho para permitir sua identificação;

g) somar registro - cria uma segunda matriz de dados, inicialmente com o conteúdo da matriz de dados original, e armazena a somatória dos registros ponto por ponto. Uma vez escolhida esta opção, os próximos menus serão diferentes, pois permitirão, além das demais opções, efetuar somas positivas ou negativas;

h) menu inicial - esta opção permite o retorno ao menu inicial. Quando isto é feito, as matrizes de dados são zeradas e as variáveis do programa são levadas a valores predefinidos ("default").

A opção "adquire novo registro" passa primeiramente pelo gráfico de ruído presente na linha, onde se tem a opção de retornar ao menu anterior ou de adquirir o registro. Caso se confirme a opção de adquirir registro, a tela do monitor é limpa e surge a mensagem "aguardando o trigger", que significa que o sistema está inteiramente pronto para receber os dados, assim que o sinal de sincronismo proveniente do sistema gerador das ondas seja enviado. Uma vez adquiridos os dados e armazenados na matriz de dados via DMA, a matriz é lida e, por meio de uma rotina gráfica, é colocada no monitor de vídeo. Tendo em vista que o registro tem um comprimento de 1024 amostras e os monitores de vídeo mais comuns não dispõem dessa resolução, é apresentada somente metade dos dados (as amostras ímpares), porém o suficiente para que se tenha uma boa idéia do registro. Caso se opte pelo "zoom", são apresentadas as primeiras 512 amostras, obtendo-se assim uma definição total da primeira metade do registro. Esta opção visa facilitar a interpretação dos dados em trabalhos de sísmica de refração, quando a definição exata do tempo da primeira

chegada das ondas é vital.

O formato de gravação do arquivo em disco obedece a um padrão compatível com o sistema de processamento sísmico "Proseis", desenvolvido por "Talos Five Computer Software", no entanto, facilmente adaptável para qualquer outro padrão desejado, uma vez que a diferença entre os formatos utilizados pelos diversos sistemas de processamento está na ordenação das informações, e não no conteúdo delas.

O fluxograma do programa de controle é apresentado nno Anexo 3.

4.3 Teste do Sistema

Após concluídos os testes em cada parte do sistema, foram efetuados testes do sistema completo, ou seja, sensores, cabo sismográfico, amplificadores e filtros, conversor A/D, microcomputador, programa de controle e sistema de gatilho. Para isto, foi montado, em laboratório, todo o sistema, e diversas simulações de "tiros" foram registradas. Os resultados obtidos mostraram que o sistema comportou-se a contento, estimulando a ida ao campo para testes mais completos.

4.4 Comentários e Conclusões

O sistema (mecânica, eletrônica e programa de controle) como proposto aqui, foi projetado e construído para que, ao mesmo tempo que fosse o mais econômico possível, atendesse às necessidades básicas e mais comuns da maioria dos geofísicos envolvidos em trabalhos sísmicos aplicados à engenharia, meio ambiente e hidrogeologia. Deve-se ressaltar que se trata de um sistema básico, onde qualquer alteração e aperfeiçoamento se torna possível em cada bloco ou módulo independentemente, sem necessidade de que se modifique o sistema como um todo. Esta característica, conseguida com a arquitetura adotada, deverá permitir uma contínua evolução do sistema.

Finalmente, os resultados obtidos nos testes de laboratório evidenciaram a viabilidade do sistema proposto e forneceram resultados satisfatórios.

5. TESTES DO SISTEMA EM CAMPO

5.1 Generalidades

Após a realização dos testes de laboratório, tornava-se necessário avaliar o comportamento do sistema em trabalho de campo. Este teste deveria, em um primeiro momento, analisar a operacionalidade do sistema, ou seja, a facilidade de transporte, montagem e operação, assim como a proteção do sistema a erros de operação. Uma segunda etapa de testes deveria comparar os resultados obtidos em campo com os resultados adquiridos utilizando-se um sistema consagrado no mercado. A terceira e última etapa de testes de campo seria a utilização do sistema desenvolvido na execução de um trabalho de rotina, e, tentativamente, o processamento e a interpretação dos resultados obtidos.

Estas três etapas de testes foram realizadas, sendo que a metodologia utilizada e os resultados obtidos são apresentados neste Capítulo.

5.2 Testes de Operacionalidade

Os testes de operacionalidade do sistema foram executados em duas áreas distintas, selecionadas pela diferença marcante de propagação de altas freqüências.

A primeira área selecionada foi o "campus" da Cidade Universitária "Armando de Salles Oliveira", São Paulo, por razões de proximidade aos laboratórios, tanto do Instituto de Geociências como do IPT, aos quais seria possível recorrer rapidamente caso ocorresse algum problema. Esta área, totalmente plana, localiza-se contígua ao Instituto de Psicologia, e geologicamente consiste em sedimentos terciários da Formação Itaquaquecetuba. Sondagens recentes, efetuadas pelo CEPAS - Centro de Estudos e Pesquisas de Água Subterrânea, revelaram a presença de pequenas lentes de argila e cascalho em um pacote de aproximadamente 50 metros de areias, sobrepondo o embasamento gnáissico (Ellert, 1991). Uma linha de comprimento aproximado de 50 metros, perpendicular à raia olímpica, foi traçada para a instalação dos geofones e geração das ondas.

Após a chegada à area, iniciou-se a medição para instalação dos geofones, os quais foram colocados distantes um do outro 2,5 metros. O total do sistema de captação ficou, desta maneira, com 27,5 metros. Foram efetuados furos de trado de diâmetro de 38 mm e profundidade de aproximadamente 50 cm a distâncias variadas do primeiro geofone (5, 10, 15, 20 e 25 metros). Estes furos destinavam-se aos "pontos de tiro" (pontos de geração das ondas sísmicas). A montagem do sistema receptor (sismógrafo) foi feita sobre o porta bagagens de uma perua Kombi, e não levou mais do que 15 minutos para que estivesse em operação.

Como fonte sísmica, foram utilizados um "Buffalo gun" (Pullan and MacAulay, 1987) e cartuchos calibre 12 fabricados pela CBC - Companhia Brasileira de Cartuchos. O sistema de sincronismo do instante do tiro com o início do registro consiste em uma pastilha piezoelétrica colocada na manopla do "Buffalo gun". O sinal gerado pela pastilha é amplificado e, através de um circuito lógico, aciona a inicialização do conversor A/D, o qual, por meio do programa de controle, está aguardando este sinal. Este sistema de geração de ondas tem uma vantagem importante sobre os outros que se utilizam de explosivos convencionais, pois não necessita de paióis de armazenamento de explosivos e espoletas.

Diversos "tiros" foram disparados de forma a se observar o comportamento do sistema. Alguns colegas foram convidados a acompanhar os testes e muito auxiliaram na avaliação crítica, tanto do "hardware" como do "software".

Devido à grande atenuação oferecida pelo solo da Cidade Universitária, e à pequena energia fornecida pelo "Buffalo gun", foi necessário efetuar um somatório para se conseguir sinais de amplitude razoável de serem manipuladas. Um dos registros assim obtidos é apresentado na Figura 30.

A segunda área de teste foi às margens da represa de Guarapiranga. Este local, além de também ser plano e de fácil acesso, apresenta o solo saturado, que é considerado como condição ideal para a propagação de ondas de alta freqüência quando se utiliza do "Buffalo gun" (Miller et al., 1986 e Pullan and MacAulay, 1987).

Equipamento: PC-SISMO mod.01 S/N: 001
Arquivo: SOMUSP1
Numero de canais: 12
Numero de amostras por canal: 1024
Razao de Amostragem: 0.250 ms
Tempo de Atraso: 0.000 ms
Filtro Passa-baixas: 200.00 Hz
Filtro Passa-altas: 1000.00 Hz
Offset: 15.0 m
Intervalo entre geofones: 2.50 m

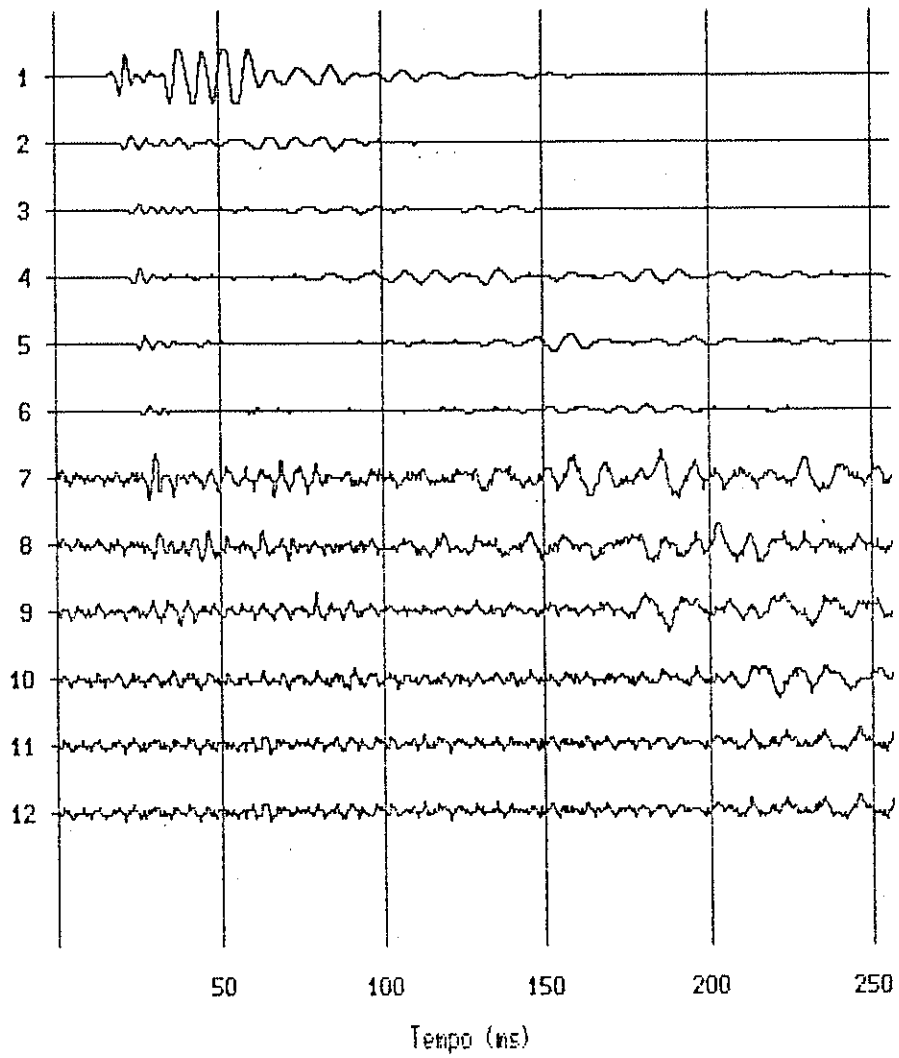


Figura 30 - Registro obtido em testes de campo efetuados na Cidade Universitária "Armando de Salles Oliveira".

Da mesma forma, o sistema foi montado em poucos minutos no compartimento de bagagens de uma perua Kombi. Os "tiros" disparados mostraram novamente a facilidade de operação do sistema e a presença marcante de altas freqüências. Um registro típico obtido nesta área é apresentado na Figura 31.

Ambos os testes evidenciaram a praticidade do sistema desenvolvido e encorajaram a execução do teste comparativo com sistema comercial consagrado.

5.3 Teste Comparativo

Para a execução do teste comparativo utilizou-se um sistema sismográfico fabricado pela Bison (modelo 1580 - "Signal Enhancement Seismograph), de seis canais, operando com geofones de bobina móvel e 10 Hz de freqüência de ressonância. Este instrumento, de propriedade do Agrupamento de Geofísica do IPT, vem sendo utilizado rotineiramente em trabalhos de sísmica de refração, reflexão, "cross-hole", etc.

Como fonte sísmica, foi utilizado o mesmo "Buffalo gun" citado anteriormente. No entanto, devido à necessidade de se obter um perfeito sincronismo entre os dois sistemas, a fonte sísmica deveria ser única, e tornava-se necessária a obtenção de um sinal de sincronismo único, porém, de tal forma, que um sistema não interferisse eletricamente no outro. Isto foi conseguido com a montagem de um amplificador do sinal do "trigger" dotado de dois acopladores ópticos no sinal de saída, o que isolou eletricamente os dois sistemas.

A área selecionada foi dentro do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT (no "campus" da Cidade Universitária), no jardim ao lado do prédio da Divisão de Geologia e Recursos Minerais - DGRM. Deve ser salientado que o sistema Bison, utilizando geofones de bobina móvel com freqüência de ressonância de 10 Hz, é menos sensível a altas freqüências; portanto, sem prejudicar o teste, tendo em vista que a geologia desta área é bastante semelhante àquela encontrada ao lado do Instituto de Psicologia. Foram disparados diversos "tiros" de refração utilizando-se "offset" de 5 metros e distância entre geofones de 3 metros. Para o sistema Bison adotou-se o mesmo

Equipamento: PC-SISMO mod.01 S/N: 001
Arquivo: rep5
Numero de canais: 12
Numero de amostras por canal: 1024
Razao de Amostragem: 0.250 ms
Tempo de Atraso: 0.000 ms
Filtro Passa-baixas: 200.00 Hz
Filtro Passa-altas: 1000.00 Hz
Offset: 25.0 m
Intervalo entre geofones: 3.00 m

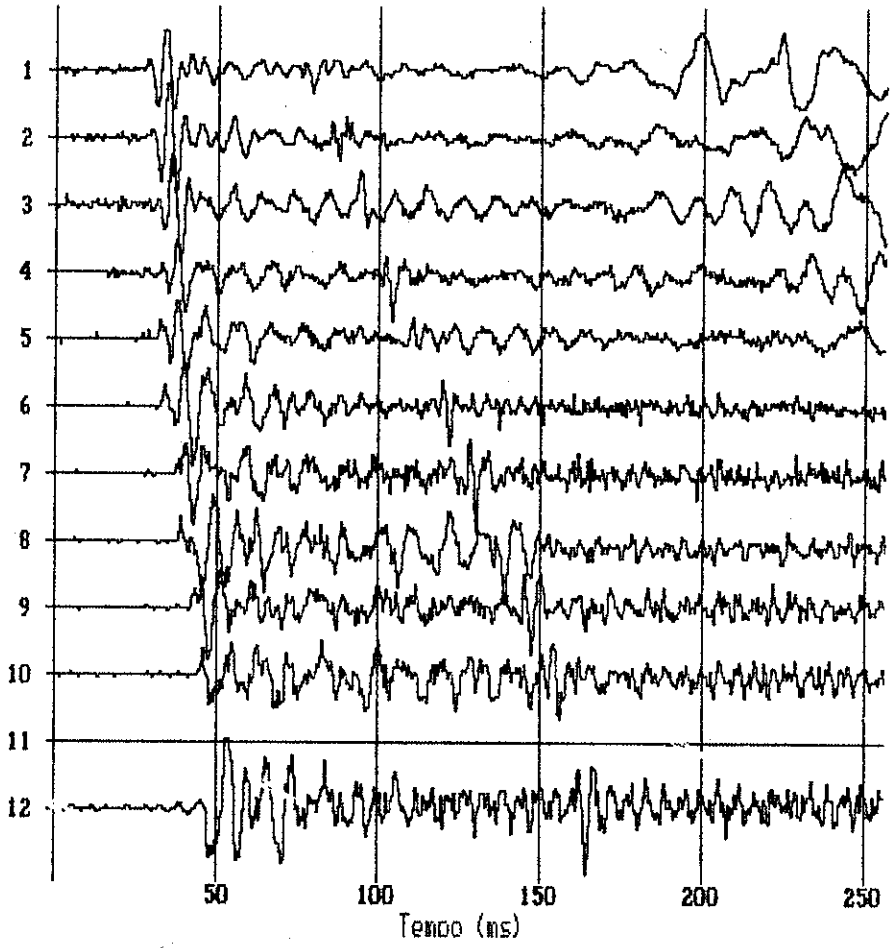


Figura 31 - Registro obtido em testes de campo efetuados às margens da represa Guarapiranga - SP.

"offset", porém com distância entre geofones de 6 metros, de tal forma que estes coincidissem com os canais ímpares do sistema desenvolvido. Registros típicos obtidos com cada sistema permitem que seja efetuada a comparação entre eles, e são apresentados nas Figuras 32 e 33, respectivamente obtidos pelo Bison e pelo sistema desenvolvido. A Tabela 1 apresenta os tempos das primeiras chegadas das ondas observados em cada instrumento.

TABELA 1

Distância do ponto de tiro (m)	Bison (ms)	Sistema em teste (ms)
3	14,2	12,8
6	-	19,2
9	37,7	34,6
12	-	41,5
15	47,2	46,1
18	-	50,7
21	51,9	51,7
24	-	55,0
27	58,5	58,8
30	-	59,4
33	61,3	-
36	-	62,5

Este teste mostrou coerência entre os dois sistemas no que diz respeito aos tempos de percurso das ondas, de primeira chegada e de amplitude do sinal. Os menores tempos observados no sistema desenvolvido para os primeiros canais pode ser explicado pela diferença de "slew rate" devido à resposta intrínsica de freqüências entre os sistemas. Para os canais mais distantes a freqüência do sinal é menor, devido à filtragem natural pelo solo, e portanto os tempos de chegada se tornam bem próximos. A saturação de alguns canais do Bison pode ser explicada pela menor faixa dinâmica deste instrumento.

Observa-se que os registros obtidos com o sistema desenvolvido apresentaram conteúdo em freqüências mais amplo, que também pode ser atribuído à diferença de resposta em freqüências do geofone convencional de bobina móvel utilizado pelo Bison e do acelerômetro, usado com o sistema desenvolvido.

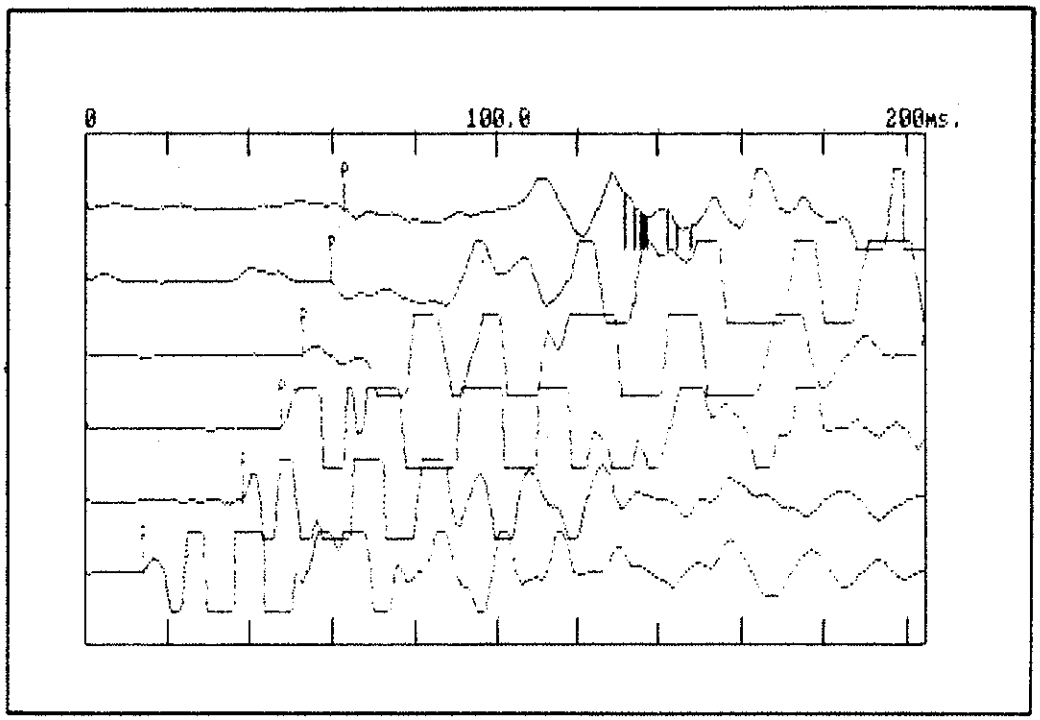


Figura 32 - Registro obtido com o sistema Bison durante os testes comparativos.

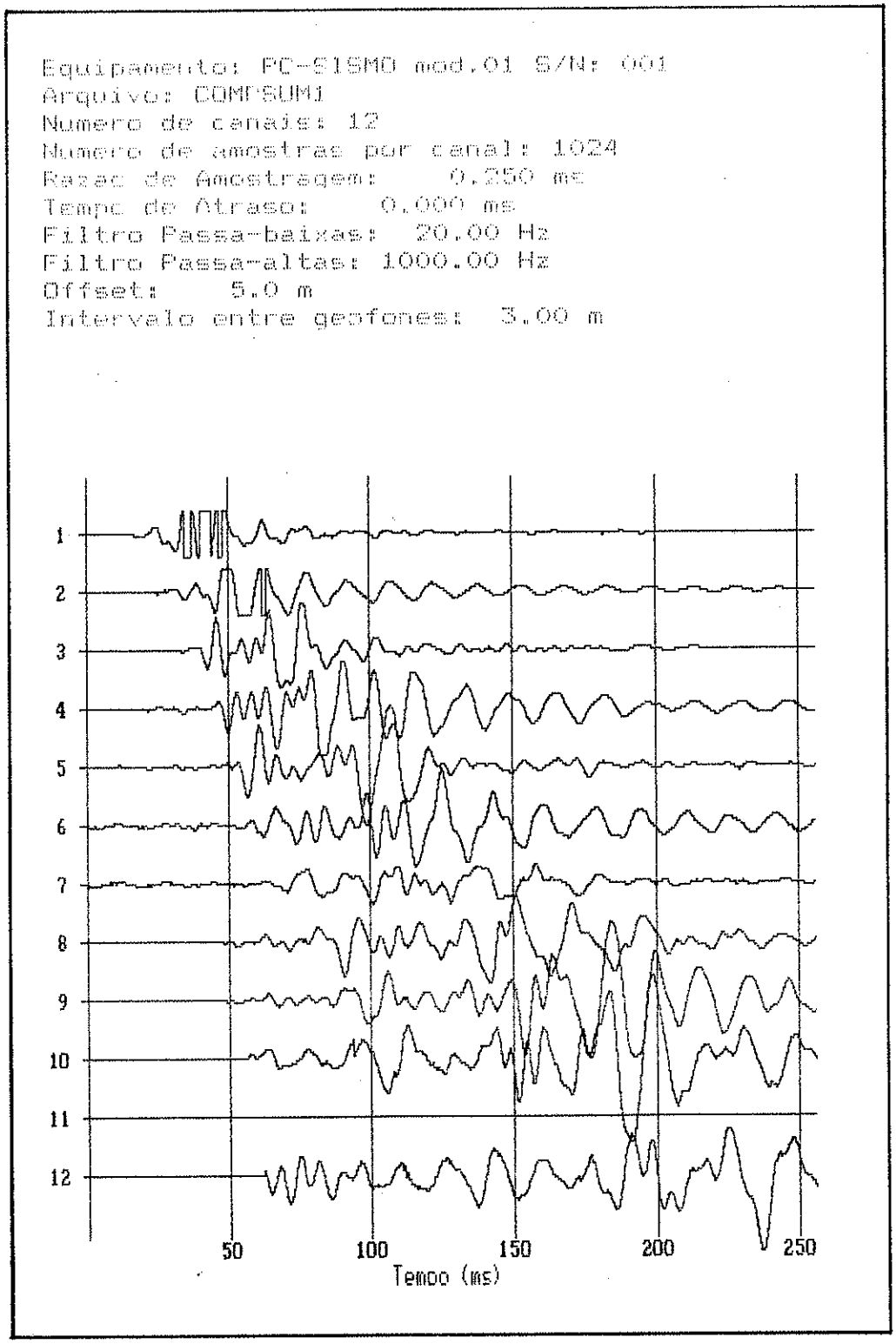


Figura 33 - Registro obtido com o sistema desenvolvido, durante os testes comparativos com sistema comercial.

5.4 Trabalho de Campo

Os testes do sistema em situação de campo foram executados em duas áreas distintas e em condições geológicas diferentes.

5.4.1 Situação geologicamente conhecida

A primeira área escolhida foi na própria Cidade Universitária "Armando de Salles Oliveira", no jardim localizado entre a Praça do Relógio e a Reitoria antiga. A linha foi executada em direção aproximada norte - sul, ligando os poços de observação denominados n° 2 e n° 8, respectivamente, executados pelo CEPAS, e tinha como objetivo tentar mapear uma possível descontinuidade de orientação aproximada leste - oeste, que havia sido inferida a partir de dados de sondagens por Iritani (1989) e por dados gravimétricos por Ussami (1991). Os mapas destes trabalhos são apresentados nas Figuras 34 e 35, respectivamente. Dados de sondagens elétricas efetuadas na área também indicavam uma anomalia nesta seção, porém não eram conclusivos, devido à presença de tubulação subterrânea com condutores elétricos próximos à área (Ellert, 1992).

O trabalho realizado consistiu em uma linha de levantamento sísmico de reflexão, utilizando-se o instrumento desenvolvido em conjunto com o "Buffalo-gun". Como parâmetros de campo, adotaram-se um "offset" de 24 metros e distância entre geofones de 3 metros. Desta forma, para se obter uma cobertura de 100% em sub-superfície, cada "tiro" avançava 18 metros na linha. Foram efetuados 13 "tiros", porém, durante o processamento, foi perdido um arquivo (equivalente ao "tiro" n° 4). O esquema da cobertura da linha é apresentado na Figura 36. O trabalho de campo foi realizado em cerca de 6 horas, sendo que para sua realização contou-se com a colaboração dos técnicos Joaquim Ireno e José P. Burato Jr., e do estudante Fabio Nacaratto.

O processamento dos dados foi efetuado no escritório, e devido à falta de um sistema mais sofisticado, limitou-se à aplicação de filtros digitais e à correção de "normal move-out" para uma única velocidade. A linha final assim obtida é apresentada na Figura 37.

A análise desta seção mostra o contacto entre os sedimentos e o embasamento cristalino a um tempo de cerca de 90 ms na

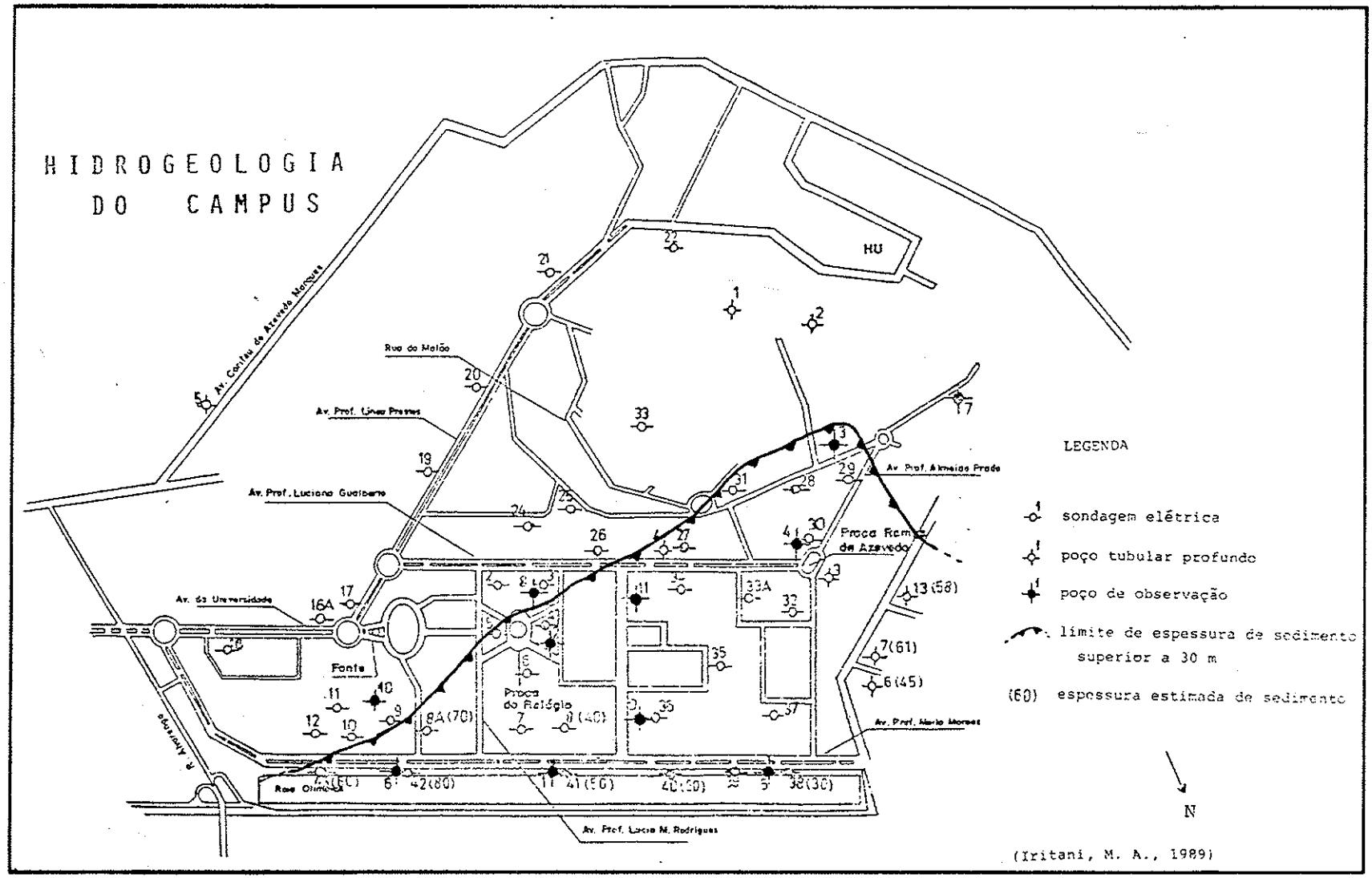


Figura 34 - Mapa da Hidrogeologia do Campus "Armando de Salles Oliveira" (Iritani, 1989).

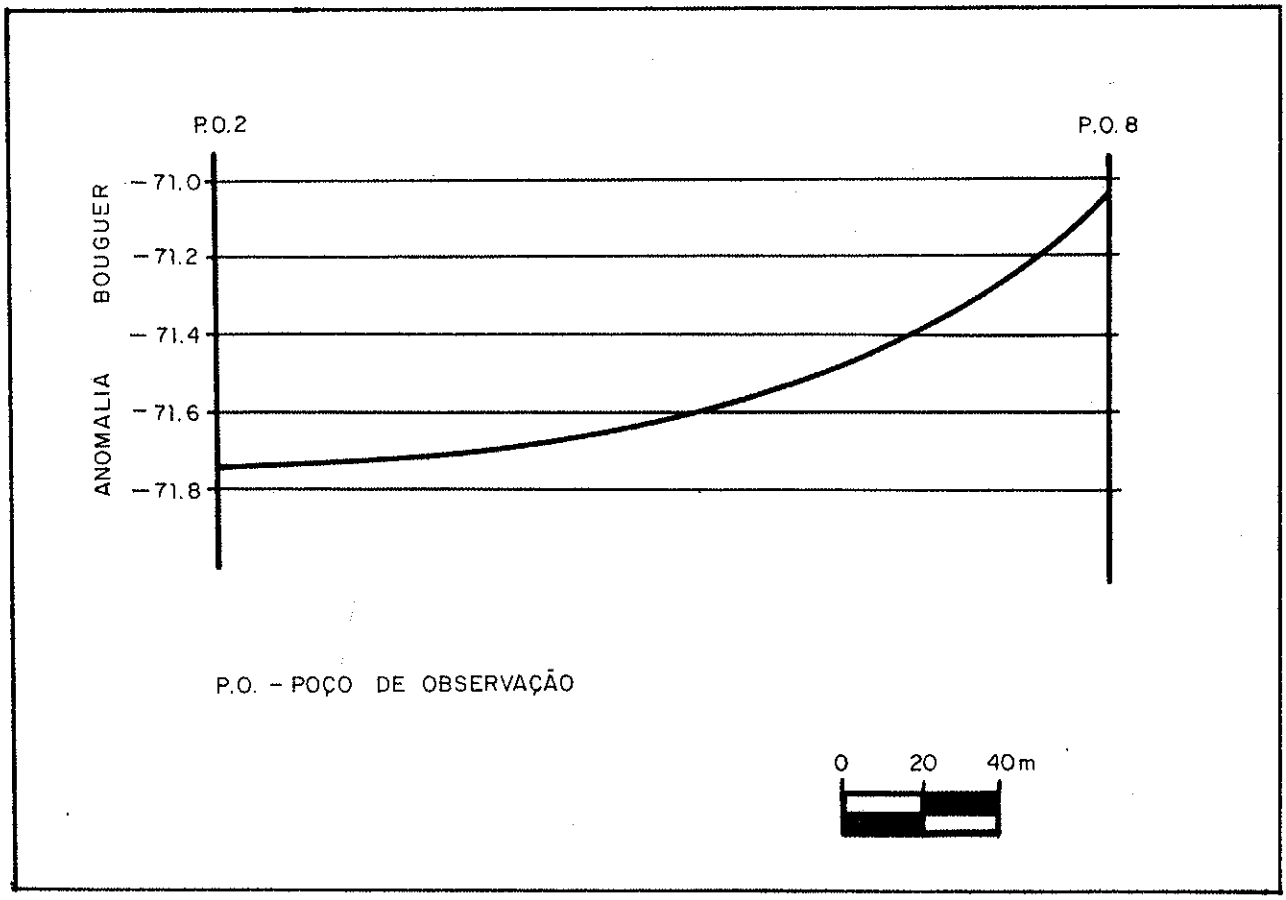


Figura 35 - Seção de anomalia gravimétrica da área estudada. Adaptada de Ussami (1991).

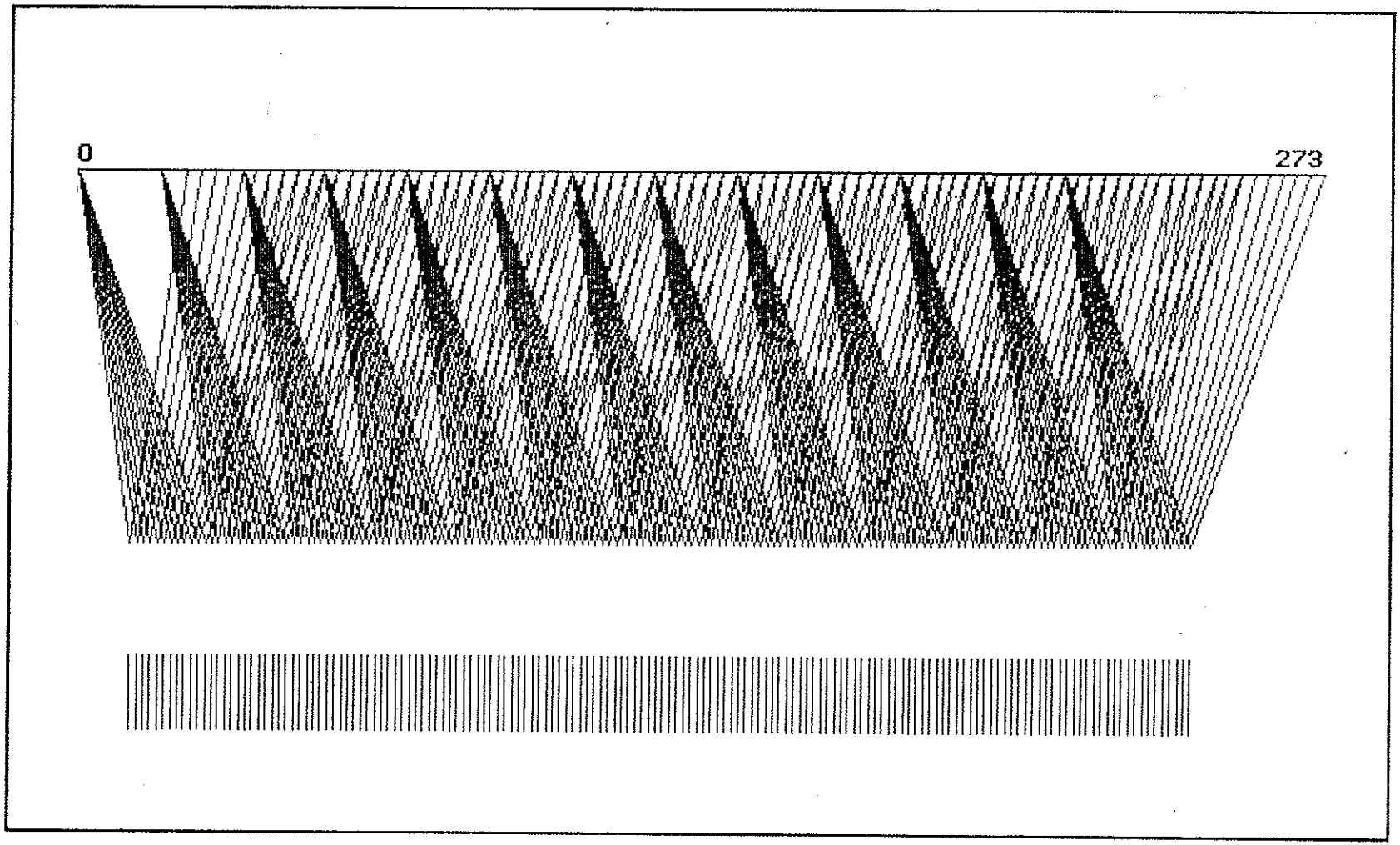


Figura 36 - Esquema da cobertura em subsuperfície obtida na linha executada no "campus" da Cidade Universitária.

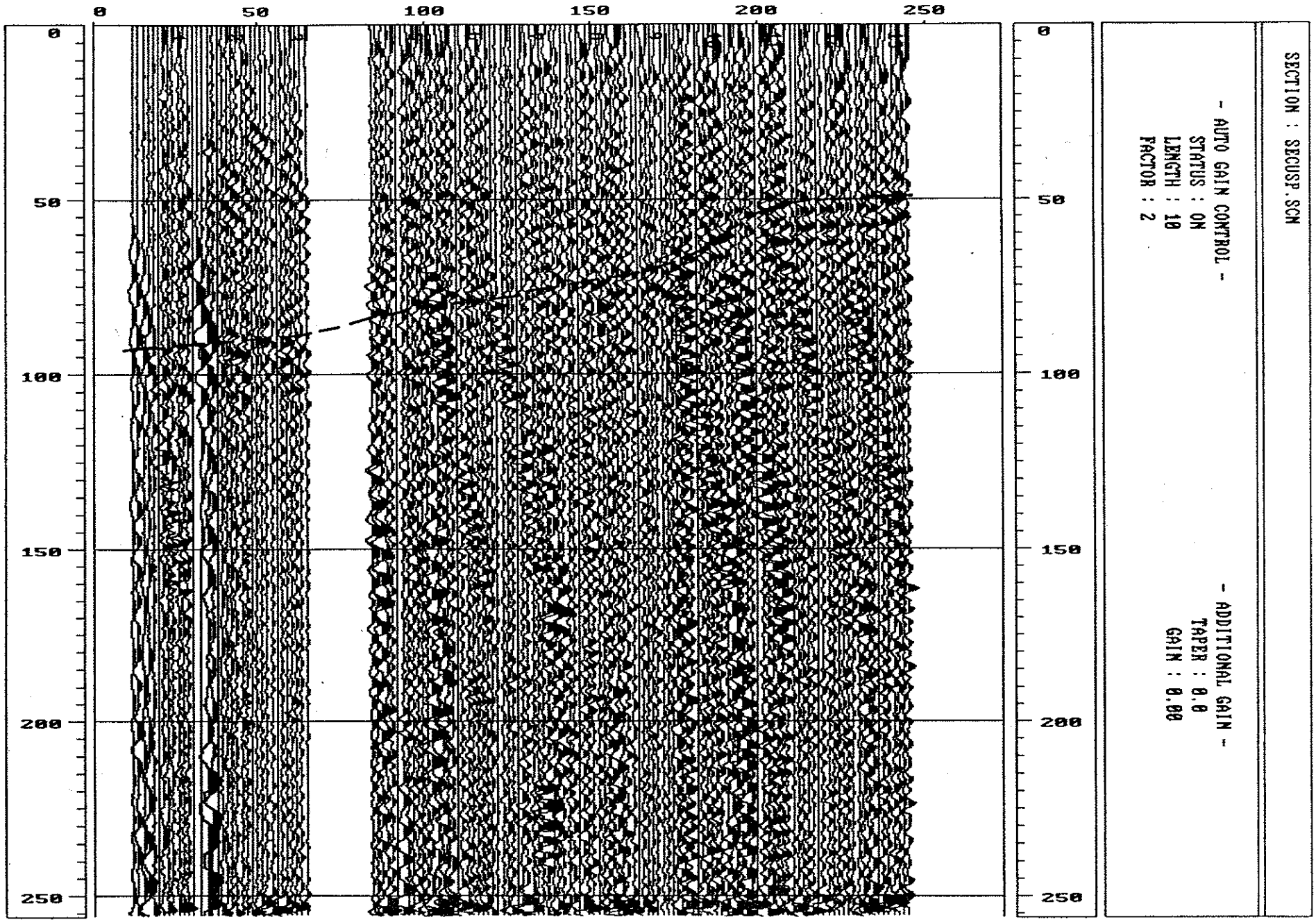


Figura 37 - Seção final, após o processamento, obtida no trabalho no Campus "Armando de Salles Oliveira".

extremidade norte da linha, elevando-se para cerca de 50 ms na extremidade sul. Sabe-se que na extremidade sul o embasamento foi encontrado, por sondagem, à profundidade de 30 metros (Iritani, 1989), o que, considerando-se a velocidade de propagação de ondas na Formação Itaquaquecetuba como sendo homogênea, permite estimar a profundidade do contacto do sedimento com o embasamento na extremidade norte (poço de observação nº 8) como sendo de cerca de 54 metros. Uma análise mais detalhada da seção mostra que existe uma declividade mais acentuada no embasamento a cerca de 160 metros do início da linha. Este dado coincide com os dados gravimétricos apresentados por Ussami (1991). Com os dados obtidos é possível elaborar uma seção geológica da área estudada, que é apresentada na Figura 38.

5.4.2 Situação geologicamente desconhecida

Para execução de outro teste de campo, foram contactadas várias instituições com o fim de se obter auxílio financeiro.

A CESP - Centrais Energéticas do Estado de São Paulo, em uma de suas obras (Aproveitamento Múltiplo do Rio Mogi Guaçu) vem enfrentando problema na escavação do canal de fuga de sua barragem que, apesar de ter tido a cota do embasamento gnáissico detectada pela sísmica de refração, tem encontrado, na região sedimentar, inúmeros matacões, alguns com mais de 100 m^3 de volume, o que tem prejudicado o cronograma executivo e de desembolso, além de onerar sobremaneira a escavação. As técnicas convencionais de prospecção geofísica são incapazes de resolver este problema com segurança e, por isso, tentou-se utilizar um equipamento que opera em uma faixa de freqüências mais alta, tendo, conseqüentemente, maior resolução na localização destes matacões. Deve-se lembrar, no entanto, que a grande "cultura" da aplicação de sísmica de reflexão se dá em regiões de bacias sedimentares, com estratos predominantemente horizontais e paralelos.

Sugeriu-se, e obteve-se concordância da CESP, a execução, de forma tentativa, de uma linha sísmica perpendicular ao canal de fuga em uma área a ser escavada, de tal forma que se poderia conferir os resultados obtidos com o novo sistema por ocasião da escavação, e, desta forma, avaliar a aplicabilidade do método.

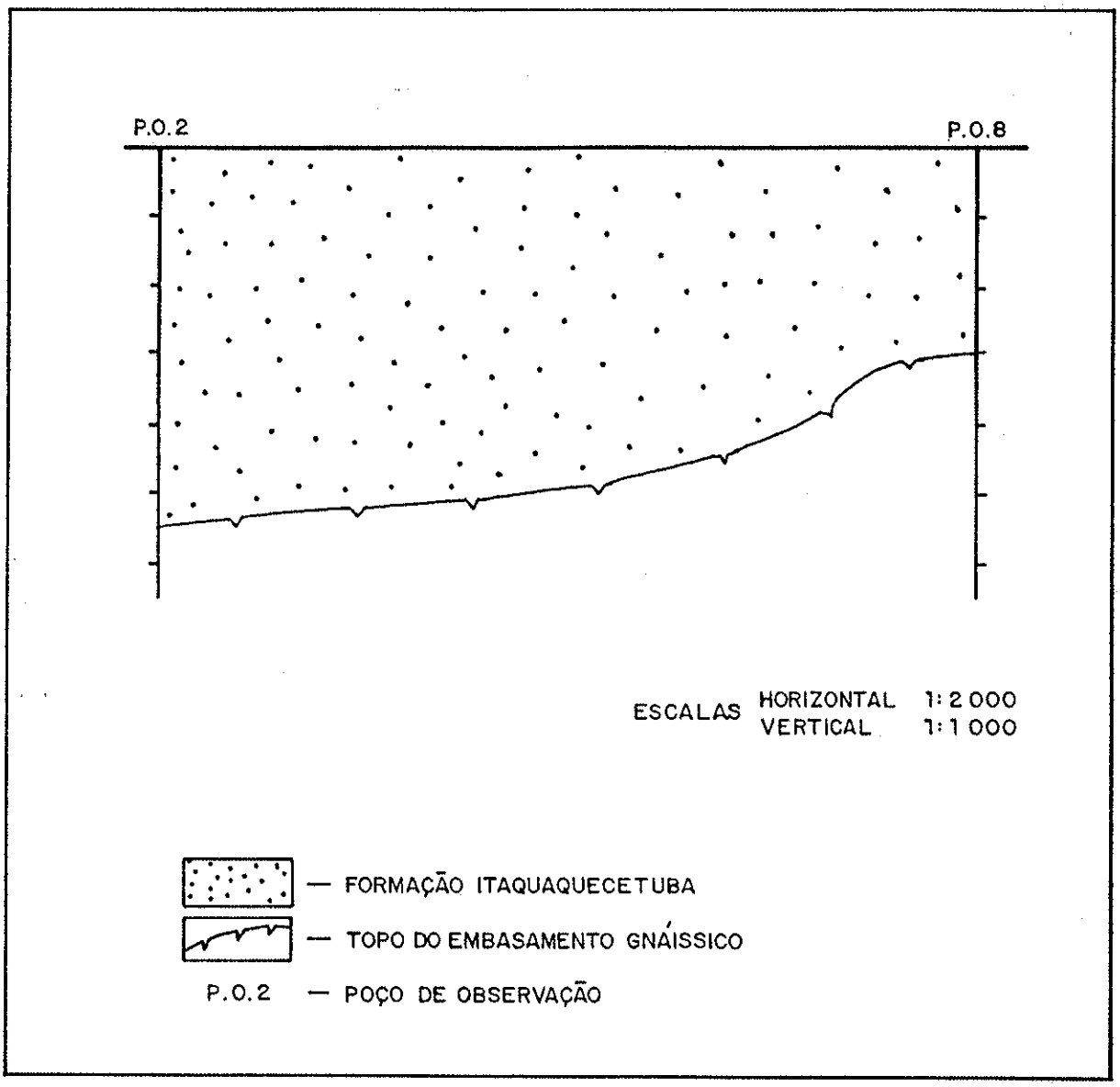


Figura 38 - Seção geológica da área estudada no Campus "Armando de Salles Oliveira" baseada em dados sísmicos.

Em meados de novembro de 1991, visitou-se a obra, cuja planta de situação é mostrada na Figura 39, e executou-se a linha coincidente ao perfil "E", conforme apresentado na Figura 40. Este perfil, segundo o cronograma então vigente, deveria estar sendo escavado em meados de janeiro de 1992.

Para o trabalho, utilizou-se o mesmo sistema desenvolvido, e já descrito, montado no porta bagagens de um veiculo Volkswagen - "Parati". A linha foi preparada de forma a se conseguir cobertura dos furos de sondagens já executados pela CESP (SP-237, SR-129 e SP-221). Os geofones foram espaçados de 1 (um) metro e os pontos de tiro também de 1 (um) metro, tendo-se assim uma cobertura múltipla de até 1200%, ao mesmo tempo que permitiria um processamento em "offset comum". O "offset" foi selecionado em 8 metros, por falta de espaço físico no início da linha, e também por receio de não se conseguir altas freqüências chegando aos geofones. Nos pontos de tiro foram efetuados furos com profundidade média de 50 cm e diâmetro de 38 mm, para utilização do "Buffalo-gun".

Dispararam-se 59 tiros, de forma que se cobriram os três furos de sondagens. O avanço era dado após cada tiro, quando se mudava a posição do primeiro geofone, que era colocado na última posição da linha, e movia-se o cabo sismográfico a fim de se conectarem os 12 geofones. Utilizaram-se 2 dias (aproximadamente 16 horas) de trabalho, sendo que a maior parte do tempo foi dispendida na execução dos furos de trado para os tiros. Quando se conseguiram dois auxiliares para executarem os furos a trado, obteve-se um rendimento de aproximadamente 10 tiros por hora. O tempo de mudança de ponto de tiro era gasto para que se efetuasse a mudança do cabo sismográfico, geofones e troca de cartucho no "Buffalo gun". O tempo de aquisição propriamente dito não ultrapassava nunca cerca de 1 (um minuto). Um registro típico conseguido nesta campanha pode ser observado na Figura 41.

Com os dados gravados em meio magnético, já no escritório, observou-se que o conteúdo em freqüências foi dentro do esperado, e que poderia ter sido utilizado um "offset" maior, o que evidenciaria melhor as reflexões. Após análise dos registros, resolveu-se utilizar o traço número 8 de todos os registros,

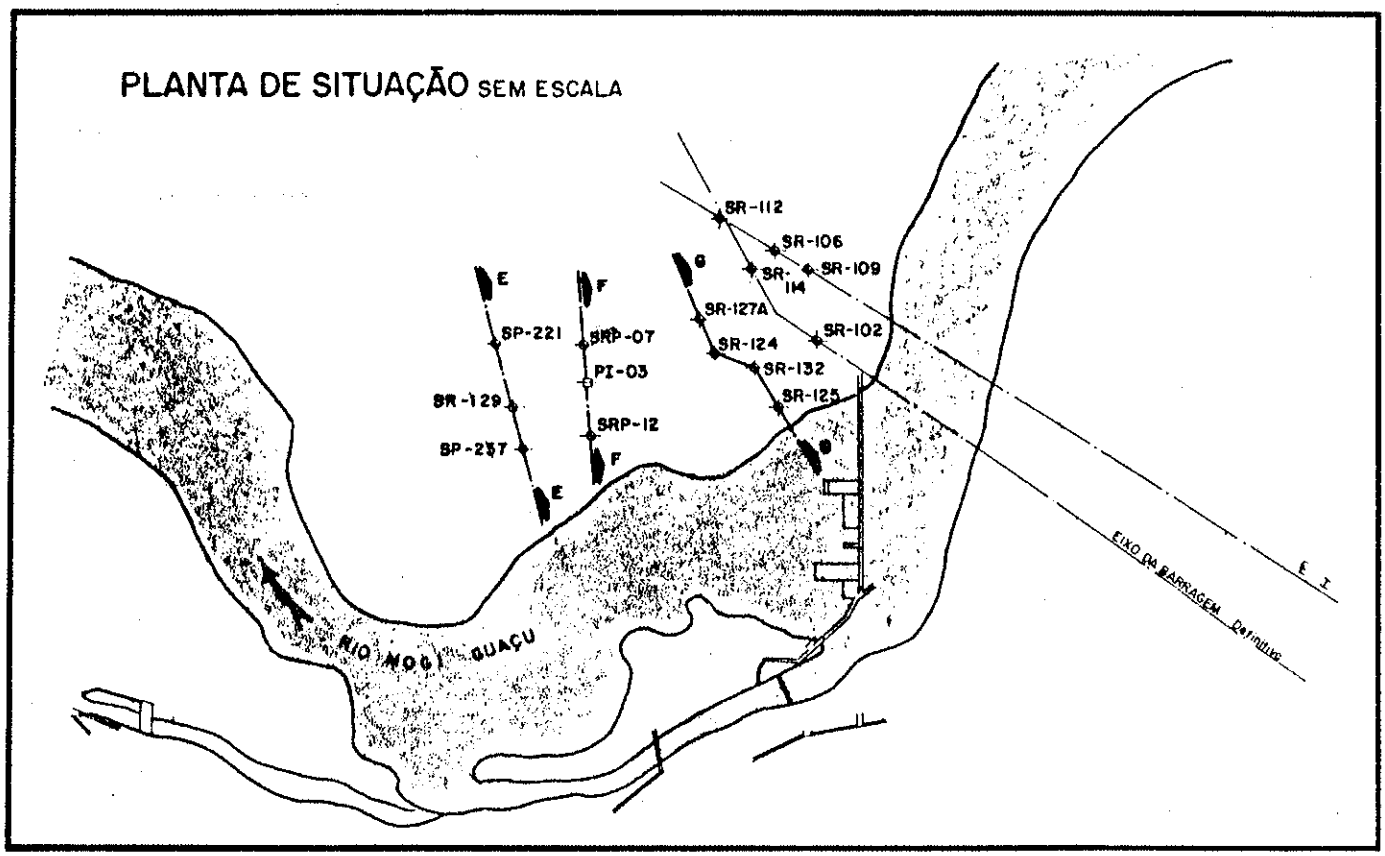


Figura 39 - Planta de situação da área estudada em Mogi Guaçu.

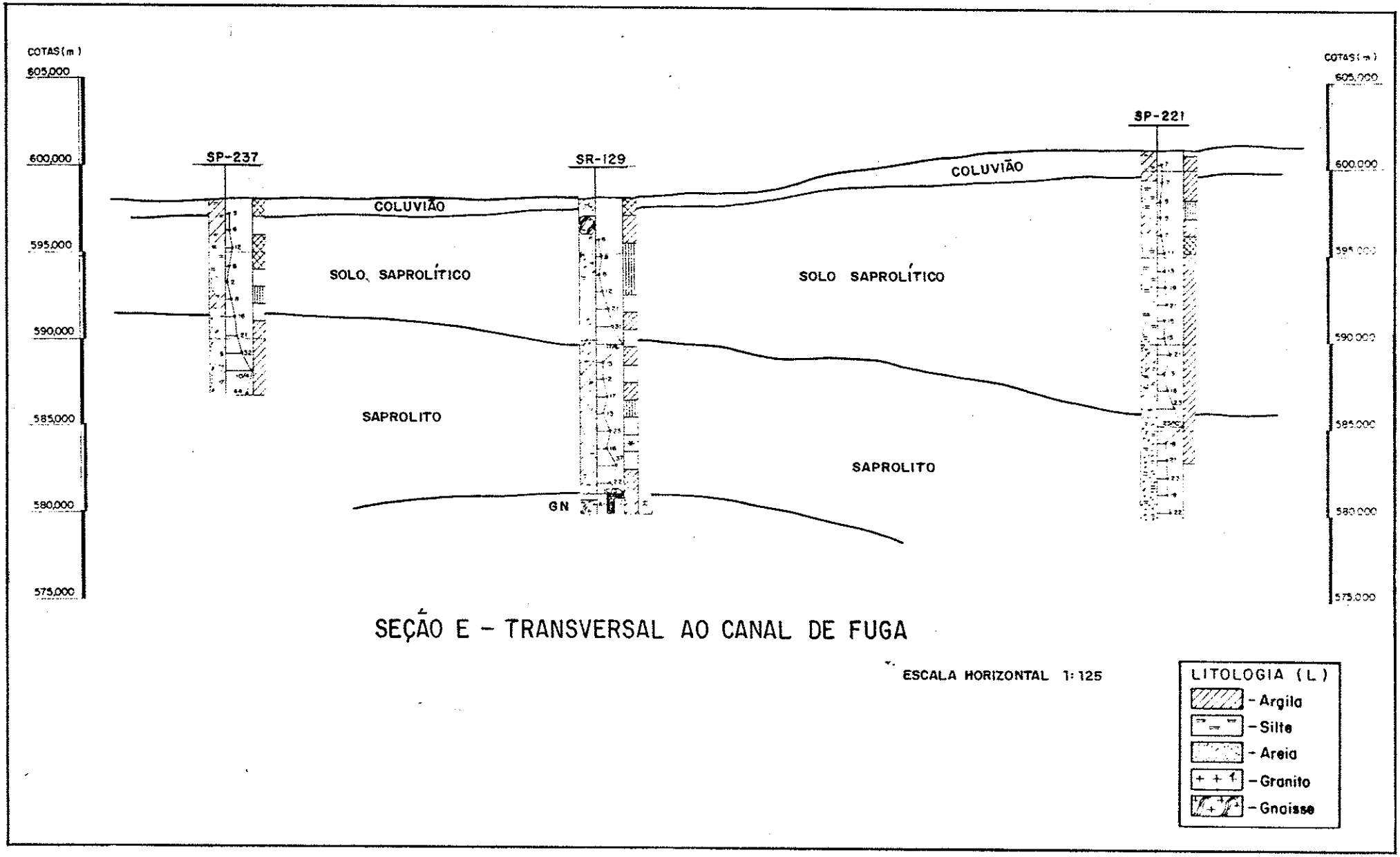


Figura 40 - Geologia da seção "E", transversal ao canal de fuga, baseada nos dados das sondagens realizadas.

Equipamento: PC-SISMO mod.01 S/N: 001
Arquivo: e_09
Numero de canais: 12
Numero de amostras por canal: 1024
Razao de Amostragem: 0.250 ms
Tempo de Atraso: 0.000 ms
Filtro Passa-baixas: 200.00 Hz
Filtro Passa-altas: 1000.00 Hz
Offset: 8.0 m
Intervalo entre geofones: 1.00 m

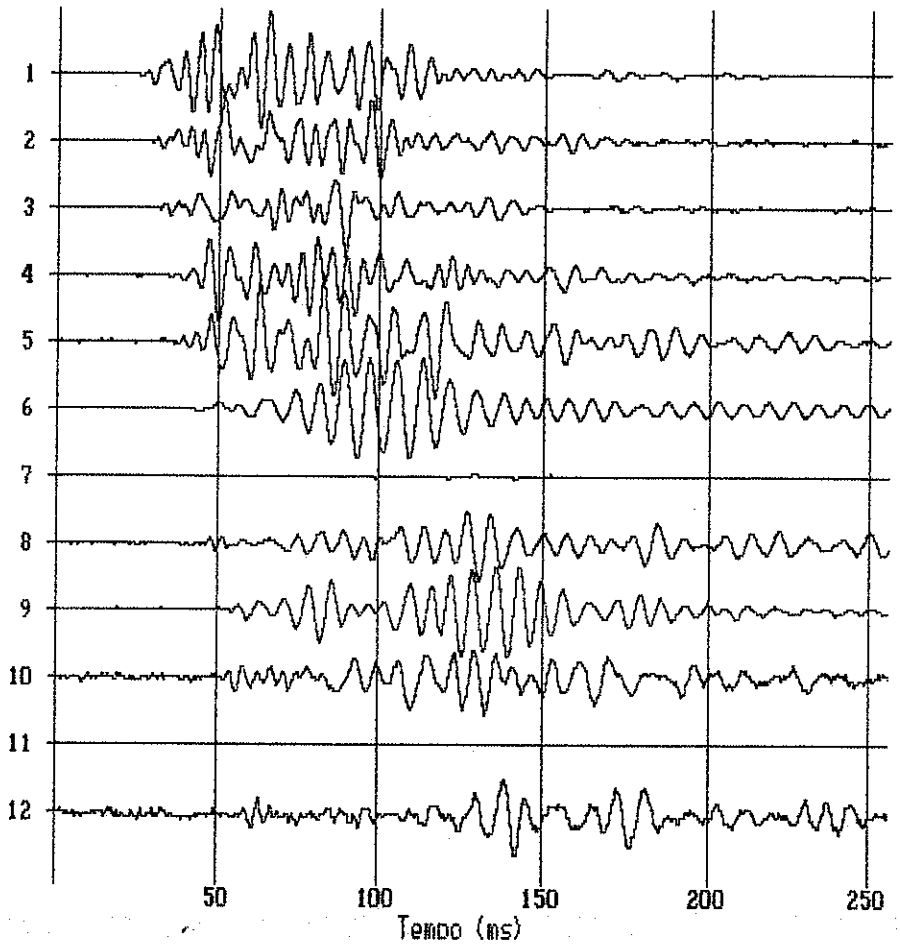


Figura 41 - Registro típico obtido durante o trabalho de campo em Mogi-Guaçu.

corrigidos dos efeitos da topografia, para formar uma seção 100% (processamento "offset comum"). A seção obtida desta forma é apresentada na Figura 42. O processamento em "offset comum" dispensa as correções de "normal move-out", evitando-se assim a possibilidade do próprio tratamento dos dados mascarar ou distorcer eventuais anomalias. Deve-se lembrar que a correção de "normal move-out" assume que os horizontes sejam horizontais ou quase horizontais, o que não é o caso no local escolhido, onde as anomalias consistem em matacões.

Para a interpretação dos dados sísmicos, elaborou-se um modelo geológico baseado no conhecimento da região adquirido com os dados de sondagens executadas na área e vizinhanças, e com a escavação de parte do canal de fuga. Este modelo considera um estrato superficial formado por solo saprolítico, que parte encontra-se não saturado. Foi considerada uma velocidade de propagação de ondas sísmicas de 400 m/s para a parte não saturada e de 650 m/s para o solo saprolítico saturado. Em seguida encontra-se um estrato chamado de saprolito, com uma velocidade de propagação de ondas sísmicas de cerca de 1200 m/s. É neste estrato que é encontrada a maioria dos matacões de grande volume, os quais deveriam ser detectados.

A análise da seção, dentro do modelo descrito, permite demarcar a linha de contacto entre o solo saprolítico não saturado e o saturado (nível d'água) a um tempo duplo de cerca de 60 ms, o que equivale a uma profundidade média de aproximadamente 7 metros. O horizonte seguinte (contacto entre o solo saprolítico e o saprolito) é irregular e encontra-se a um tempo duplo de 70 ms no extremo sul e a 93 ms ao norte. Deve-se notar que as profundidades obtidas com estes tempos fazem com que este contacto prticamente coincida com os picos de máximo SPT. O contacto entre o saprolito e o embasamento encontra-se a cerca de 108 ms na extremidade inicial da linha (extremo sul) e, com um leve e irregular mergulho, este horizonte desce até atingir a outra extremidade ao tempo de cerca de 114 ms. Um matacão teria sido atingido pela sondagem SR-129 a uma profundidade de cerca de 17 metros e, por esta interpretação, tem um comprimento aparente (ao longo da seção sísmica) de cerca de 8 metros. Utilizando o mesmo modelo, pode-se

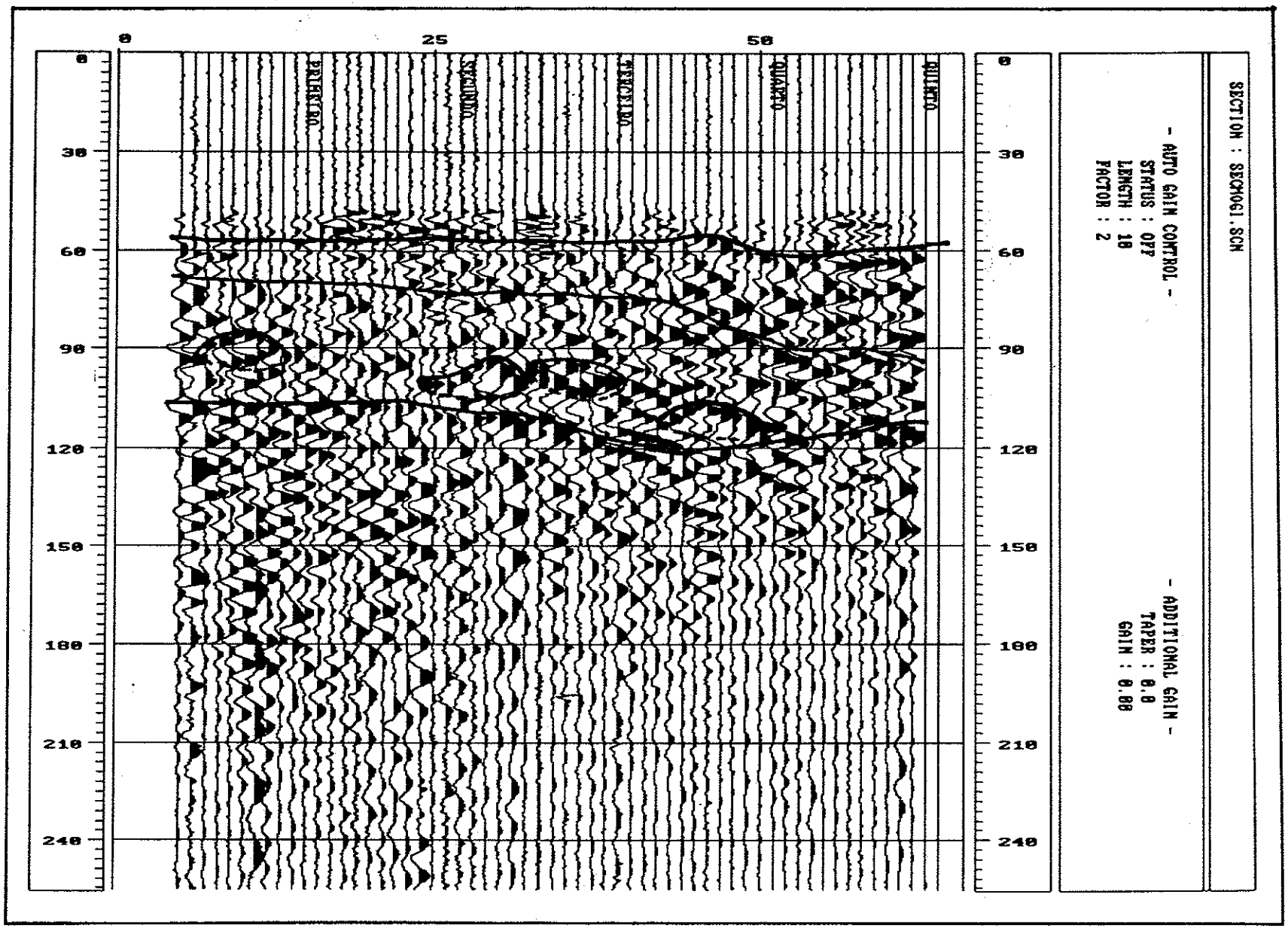


Figura 42 - Seção final, após o processamento, obtida no trabalho em Mogi-Guaçu.

inferir, pelo padrão de reflexão, a presença de um matacão a cerca de 90 ms próximo ao extremo norte da seção, outro a 35 metros do início da linha, e ainda outro a cerca de 50 metros também do início da linha. O modelo geológico baseado nos dados sísmicos é apresentado na Figura 43.

Vale ressaltar que a qualidade da seção sísmica poderia ser muito melhor, caso se dispusesse de um sistema de processamento mais avançado, onde fosse possível efetuar deconvoluções e migrações.

A comparação do modelo geológico obtido pela sísmica com o resultado da escavação foi prejudicada, uma vez que esta escavação, prevista inicialmente para janeiro de 1992, foi adiada para 1993.

5.5 Conclusões

Nesta fase do estudo procurou-se testar o sistema desenvolvido quanto aos aspectos de operacionalidade, de desempenho e em situações normais de trabalho em campo.

A respeito da operacionalidade, consultaram-se diversos colegas familiarizados com sistemas sismográficos para que emitissem suas opiniões, críticas e sugestões. Houve total aprovação do sistema, e as sugestões para seu aprimoramento, anotadas, serão apresentadas no próximo Capítulo.

Os testes em trabalho normal de campo permitiram observar que o sistema é bastante versátil e resistente às condições adversas de trabalho, enfrentadas durante a campanha na região de Mogi-Guaçu (topografia acidentada e chuvas torrenciais).

Os resultados finais obtidos do teste comparativo e dos trabalhos de campo permitem concluir que o sistema proposto e desenvolvido atendeu aos requisitos exigidos de um sistema sismográfico, e que se aplica a trabalhos de sísmica de reflexão e refração rotineiros, e também àqueles onde um espectro de freqüências mais amplo do que os sistemas convencionais equivalentes seja necessário.

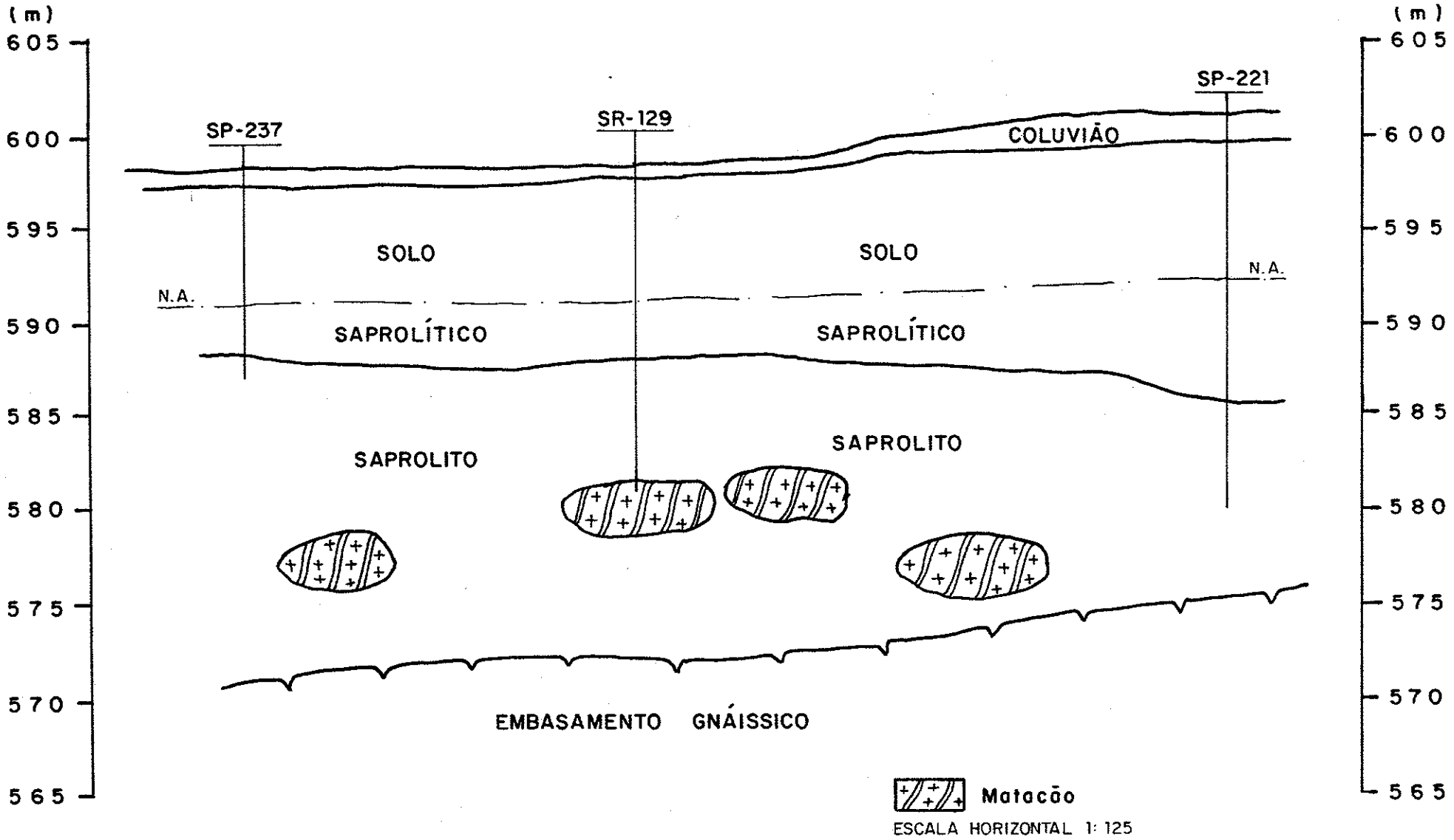


Figura 43 - Seção geológica da área estudada em Mogi Guaçu, baseada em dados sísmicos.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

6.1 Generalidades

Este trabalho propõe uma nova arquitetura para um sistema sismográfico de alta resolução. Difere dos sistemas já existentes por se basear primordialmente na eletrônica incorporada de um microcomputador tipo IBM-PC que, além de se ocupar com o gerenciamento e controle do sistema, torna-se parte ativa da aquisição de dados por meio da utilização do DMA (acesso direto à memória). Propõe ainda a utilização de acelerômetros piezoelétricos como geofones.

A seguir são expostas as conclusões do trabalho, e também são sugeridos novos caminhos para que se prossiga a pesquisa.

6.2 Conclusões

O trabalho realizado consistiu no projeto, montagem de protótipo, testes de laboratório e de campo de um sistema sismográfico de alta resolução e relativo baixo custo.

O instrumento e os acelerômetros idealizados mostraram-se factíveis e os testes em laboratório evidenciaram que suas características quanto a resposta em amplitude e freqüência atendiam às necessidades para trabalhos de sísmica de prospecção.

Testes comparativos com um sistema comercial mostraram resultados bastante semelhantes entre os dois sistemas, exceto quanto à resposta em freqüência que o sistema desenvolvido apresentou um espectro mais amplo.

Trabalhos de campo em duas áreas distintas mostraram sua utilização na solução de reais problemas geológicos.

Os resultados obtidos permitem concluir que:

a. o sistema, conforme foi proposto neste trabalho, é viável e pode ser desenvolvido e construído a relativo baixo custo (cerca de US$ 6.000,00);

b. o protótipo desenvolvido apresentou uma boa resposta a sinais de alta freqüência, o que o viabiliza para trabalhos onde alta resolução torna-se necessária;

c. durante o desenvolvimento e testes em laboratório e campo ficou evidenciada a praticidade de operação do sistema e a facilidade de se implementar modificações no programa objetivando a otimização de seu desempenho;

d. os resultados obtidos em trabalhos de campo normais permitiram resolver dúvidas quanto à geologia de duas regiões distintas e com problemas completamente diversos;

d. a análise da arquitetura do sistema proposto permite prever sua utilização em sistemas de aquisição de dados multicanais para outras finalidades, desde que se adapte o sensor e, eventualmente, os amplificadores e filtros.

6.3 Sugestões Para Novas Pesquisas

O trabalho, conforme apresentado, mostra que diversas alterações podem ser propostas já nesta fase, ou seja, o programa de controle pode ser melhorado com a utilização de por exemplo o ambiente "Windows", o que viria a facilitar ainda mais o operador. A nível de "hardware", pode-se sugerir que se tente melhorar ainda mais as características do acelerômetro, principalmente no que diz respeito a diminuir seu peso pelo uso de algum plástico ou resina de grande rigidez na base.

Sugere-se também que um sistema de arquitetura semelhante seja desenvolvido para utilização em outros métodos geofísicos, o que poderia se tornar uma opção bastante razoável para Universidades e mesmo para países de baixo poder aquisitivo.

Um aspecto interessante que o autor tem observado em sua carreira profissional é a de que normalmente os equipamentos geofísicos se tornam obsoletos devido ao avanço na eletrônica da unidade de registro. É possível encontrar em diversas empresas e mesmo Universidades instrumentos que, apesar de seus sensores ou transdutores estarem em perfeito estado de funcionamento, são abandonados por não mais funcionarem ou porque sua manutenção é dispendiosa ou mesmo inviável. Acredita-se que a arquitetura aqui proposta possa vir a ser utilizada na recuperação de muitos destes equipamentos. Para que isto seja feito basta que se adapte o programa de controle à necessidade específica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, S.J. 1984. The development of 1024-channel Geocor IV seismic recording. California: Geophysical Systems Corp.

AL-SADI, H.N. 1980. Seismic exploration. Technique and processing. Cambridge:Birkhauser, Boston, Inc. 215 p.

ANSTEY, N.A. 1976. Seismic prospecting instruments. Signal characteristics and instrument specifications. Berlin: Geopublication Associates, Gebruder Borntraeger. v.1. 156 p..

BOA-HORA, M.P.P. 1986. Applied geophysics in Brazil. Geophysics, v.51, n.5, p.1171-1173.

BORM, G.W. 1978. Methods from exploration seismology: reflection, refraction and borehole prospecting. in ———.Rock Dynamics and Geophysical Aspects. Rotterdam: A.A. Balkema. p.87-114. (Trab. apres. Proceedings of DMSR77, Karlsruhe).

BORN, W.T. 1960. A review of geophysical instrumentation. Geophysics, v.25, n.1, p.77-91.

BRADLEY, D. 1992. Implementing Direct Memory Access (DMA) in C. The C Users Journal, v.10, n.5, p.53-70.

BREGMAN, N.D. et al. 1989. Crosshole seismic tomography. Geophysics, v.54, n.2, p.200-215.

BRÜEL & KJAER. 1978. Piezoelectric accelerometers and vibration pre-amplifiers: Theory and application handbook. Denmark: Brüel and Kjaer. 98p.

CHEN, S.T. et al. 1990. Subsurface imaging using reversed vertical seismic profiling and crosshole tomographic methods. Geophysics, v.55, n.11, p.1478-1487.

COFFEEN, J.A. 1978. Seismic exploration fundamentals. Oklahoma: PPC Books. 277p..

DOBRIN, M.B. 1960. Introduction to geophysical prospecting. 2.ed. New York: McGraw Hill.

DOURADO, J.C. 1984. A utilização da sísmica na determinação de parâmetros elásticos de maciços rochosos e terrosos "in situ". São Paulo: ABGE. 12p.

EGGEBRECHT, L.C. 1986. Interfacing to the IBM personal computer. Indianapolis: Howard W. Sams & Co. 246 p.

ELLERT, N. 1991. Comunicação pessoal. IGc.USP. São Paulo.

ELLERT, N. 1992. Sondagens elétricas no "campus" da Cidade Universitária "Armando de Salles Oliveira". IGc.USP. São Paulo. no prelo.

EVENDEN, B.S., STONE, D.R. 1976. Seismic prospecting instruments: Instrument performance and testing. Berlin: Gebruder Borntraeger. v.2. p.196.

FAIL, J.P., et al. 1962. Couplage des sismographes avec le sol. Geophysical Prospecting. v.10, n.2, p. 128-147.

HEILAND, C.A. 1942?. Geophysical Exploration. New York: Prentice-Hall. 1013 p. Geology Series..

HOLANDA FERREIRA, A.B. 1975. Novo dicionário da lingua portuguesa. Rio de Janeiro: Ed. Nova Fronteira. p.1319.

IRITANI, M.A. 1989. Hidrogeologia do "campus" da Cidade Universitária "Armando de Salles Oliveira". IGc.USP. São Paulo. no prelo.

JAKOSKI, J.J. 1950. Exploration geophysics. 2. ed. California: Trija Publishing Co. p.639-937.

JOHNSON, D.E. , HILBURN, J.L. 1975. Rapid practical designs of active filters. New York: John Wiley & Sons, Inc. 264 p.

KEPPNER, G. 1991. Ludger Mintrop. Geophysics: The Leading Edge of Exploration. V.10, n.9, p.21-28.

KLAASSEN, K.B., VAN PEPPEN, J.C.L. 1983. Electronic acceleration-sensitive geophone for seismic prospecting. Geophysical Prospecting. v.31, p.457-480.

KNAPP, R.W. , STEEPLES, D.W. 1986a. High resolution common-depth-point seismic reflection profiling: Instrumentation. Geophysics. v.51, n.2, p.276-282.

KNAPP, R.W. , STEEPLES, D.W. 1986b. High resolution common-depth-point seismic reflection profiling: field acquisition parameter design. Geophysics. v.51, n.2, p.283-294.

LAMER, A. 1970. Couplage sol-geophone. Geophysical Prospecting. v.18, p.300-319.

LEPPER, C.M. 1981. Guidelines for selecting seismic detectors for high-resolution applications. Washington: United States Department of the Interior. (Bureau of Mines - RI 8599). 37 p.

LERICOLAIS, G. et al. 1990. A new system for acquisistion and processing of very high-resolution seismic reflection data. Geophysics. v.55, n.8, p.1036-1046.

MILLER, R.D. et al. 1986. Field comparison of shallow seismic sources. Geophysics. v.51, n.11, p.2067-2092.

NEIDELL, N.S. 1982. Following the seismic pulse to the reflecting bed and back - Seismic wave propagation in Earth. 84 p. (10th. Annual Course "Applied Geophysics for Geologists". Houston: University of Houston Geology Foundation).

NORTON, P. 1986. Inside the IBM-PC. New York: Prentice Hall. 387p.

O'BRIEN, J.T. et al. 1982. Sign-bit amplitude recovery with applications to seismic data. Geophysics. v.47, n.11, p.1547-1539.

PARASNIS, D.S. 1970. Principios de geofisica aplicada. Madrid: Ed. Paraninfo. p.135-158.

PIEUCHOT, M. 1978. Les appareillages numériques d'acquisition des données sismiques. France: Éditions Technip. 145 p.

PULLAN, S.E. and MAC AULAY, H.A. 1987. An in-hole shotgun source for engineering seismic surveys. Geophysics. v.52, n.7, p.985-996.

ROBINSON, E.A., TREITEL, S. 1980. Geophysical signal analysis. New York: Prentice -Hall. 466 p.

SEGUIN, M.K. 1971. La géophysique et les propriétés des roches. Québec: Les Presses de L'Université LAVAL. p.445-558.

SERRIDGE, M., LICHT, T.R. 1986. Piezoelectric accelerometer and vibration preamplifiers - theory and application handbook. Denmark: Brüel and Kjaer. 151 p.

SHARMA, P.V. 1986. Geophysical methods in geology. 2.ed. New York: Elsevier. 442 p.

SHAYANI, S. 1979. Sismos induzidos. In: Simpósio sobre sismicidade natural e induzida, 1979, S. Paulo. Anais... São Paulo: ABGE. p. 15-47.

SHERIFF, R.E. 1978. A first course in geophysical exploration and interpretation. Boston: International Human Resources Development Corporation. 313 p.

TAIOLI, F., YAMAMOTO, J.K. 1984. Contribuição ao estudo da significância do número de bits na digitalização de dados sísmicos. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 33, 1984, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: SBG. v.3, p. 1921-1932.

TAIOLI, F., RIBEIRO, V. 1990a. Sistema automático de aquisição de dados para medida de permeabilidade de maciços rochosos "in-situ". In: Simpósio sobre Instrumentação em Geotecnia - SINGEO 90. Anais... Rio de Janeiro: ABMS. p.311-317.

TAIOLI, F., RIBEIRO, V. 1990b. Sistema automático para ensaio de determinação do tensor de permeabilidade. In: VI Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. Anais... Salvador: ABGE, V.1, p.115-120.

TEXAS INSTRUMENTS. 1982. DFS V - drawings manual. Houston: Texas Instruments, Inc. p.2.9.

USSAMI, N. 1991. Dados gravimétricos do "campus" da Cidade Universitária "Armando de Salles Oliveira". IAG USP. São Paulo. no prelo.

WASHBURN, H. , WILEY, H. 1941. The effect of the placement of a seismometer on its response characteristics. Geophysics. v.6, n.1, p. 116-131.

WHITE, J.E. , PRESS, F. 1960. Geophysical research and progress in exploration. Geophysics. v.25, n.1, p. 168-180.

WOLFF, E.A. , MERCANTI, E.P. (Eds). 1974. Geoscience instrumentation. New York: John Wiley & Sons, Inc. 819 p.

A N E X O 1

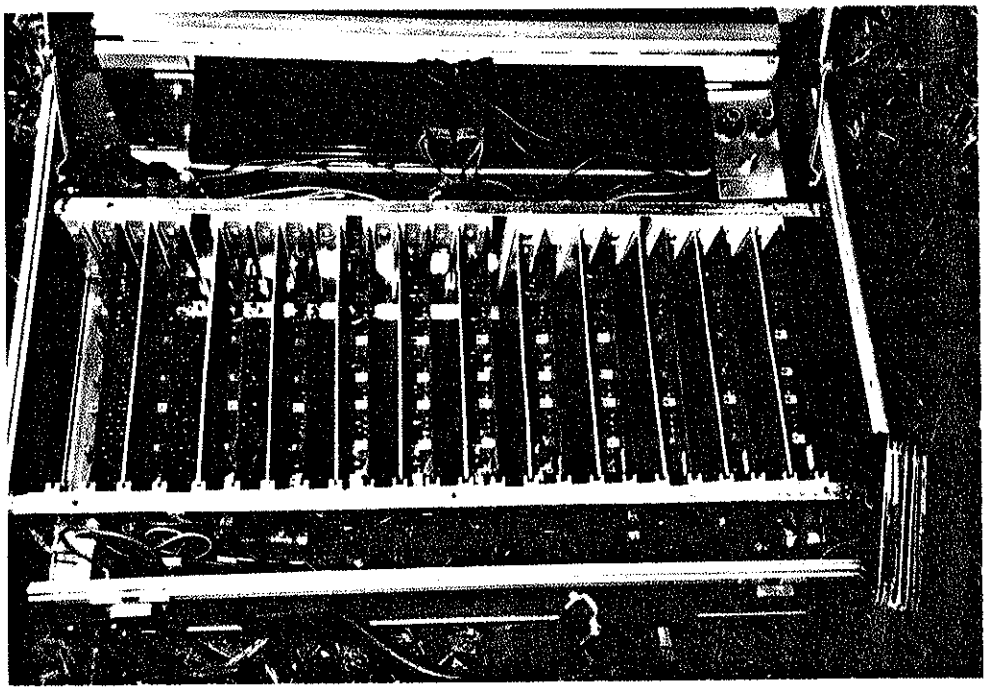


Foto 1 - Detalhe do gabinete dos amplificadores, filtros, fontes de alimentação e baterias do sismógrafo desenvolvido.

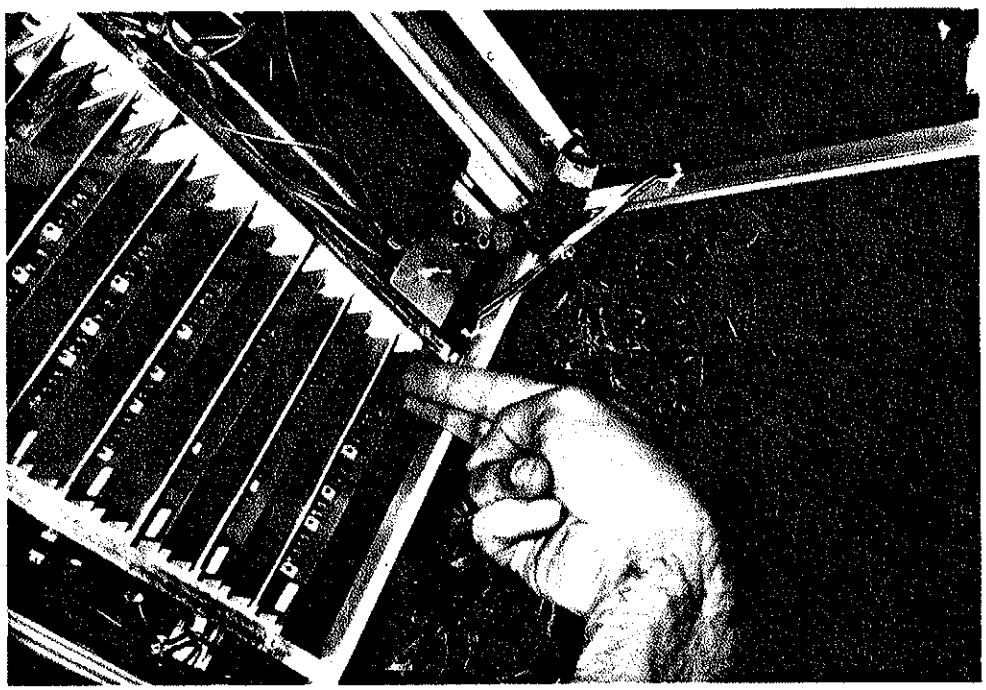


Foto 2 - Detalhe dos "jumpers" de seleção dos filtros corta-baixas e "notch".

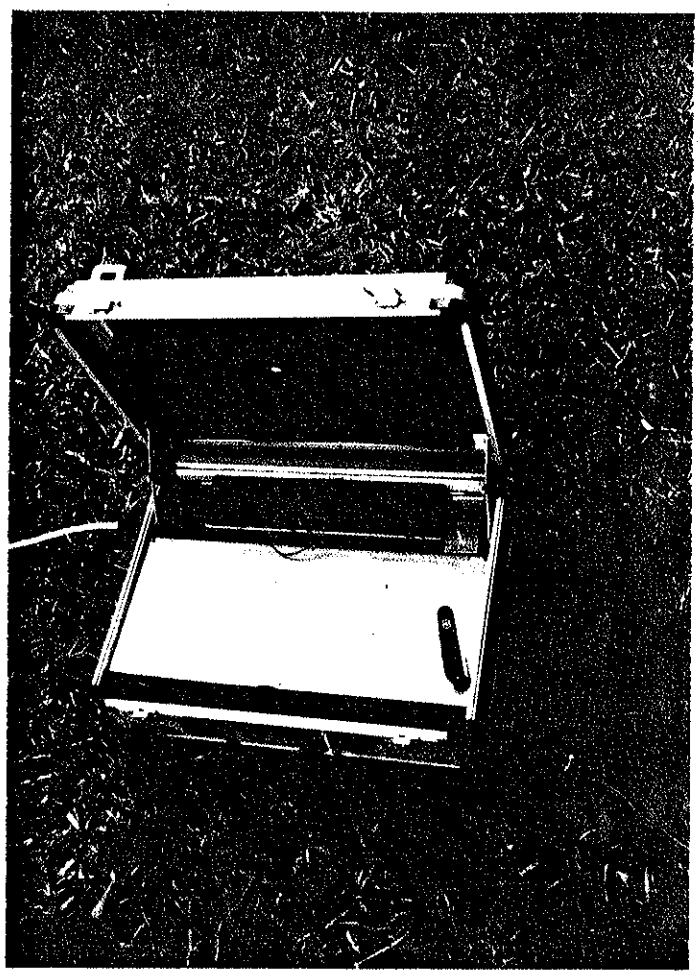


Foto 3 - Compartimento dos filtros e amplificadores com tampa para isolamento contra ruído elétrico.

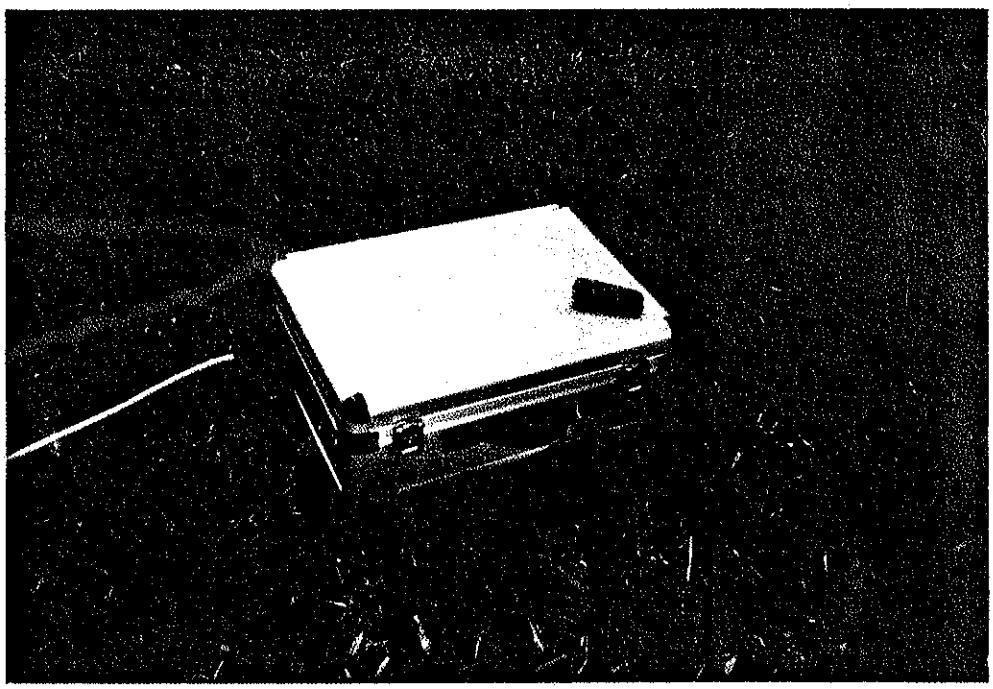


Foto 4 - Aspecto do gabinete do sismógrafo em uso normal.

Foto 5 - Detalhe da tomada do cabo sismográfico para conexão do acelerômetro.

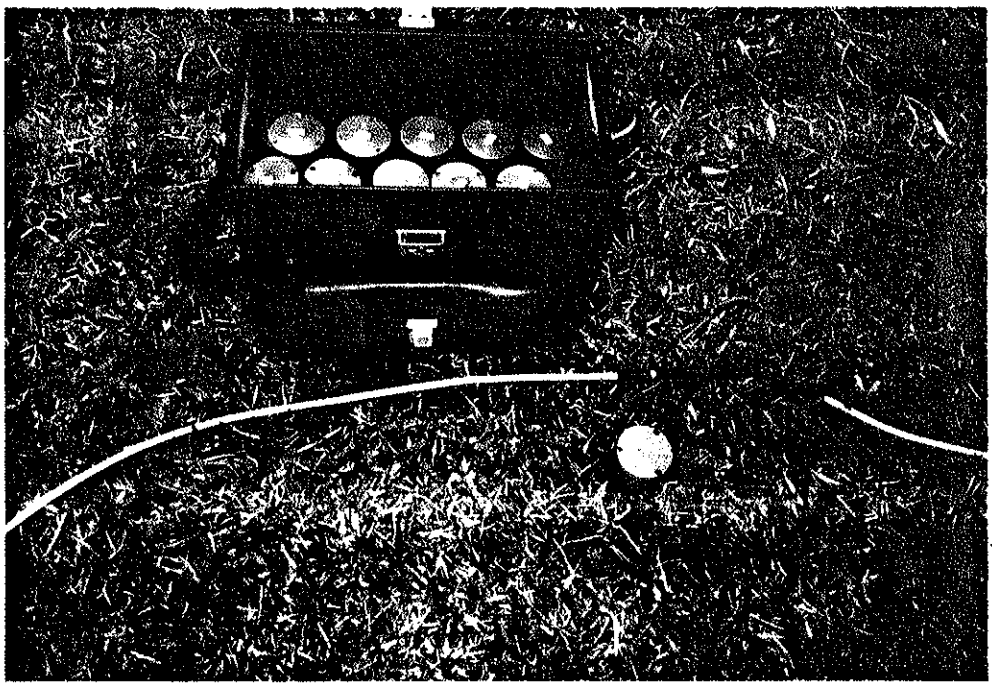


Foto 6 - Acelerômetro conectado ao cabo sismográfico, ao lado da maleta de transporte dos acelerômetros.

Foto 7 - Detalhe do carregamento do "Buffalo gun" com cartucho calibre 12.

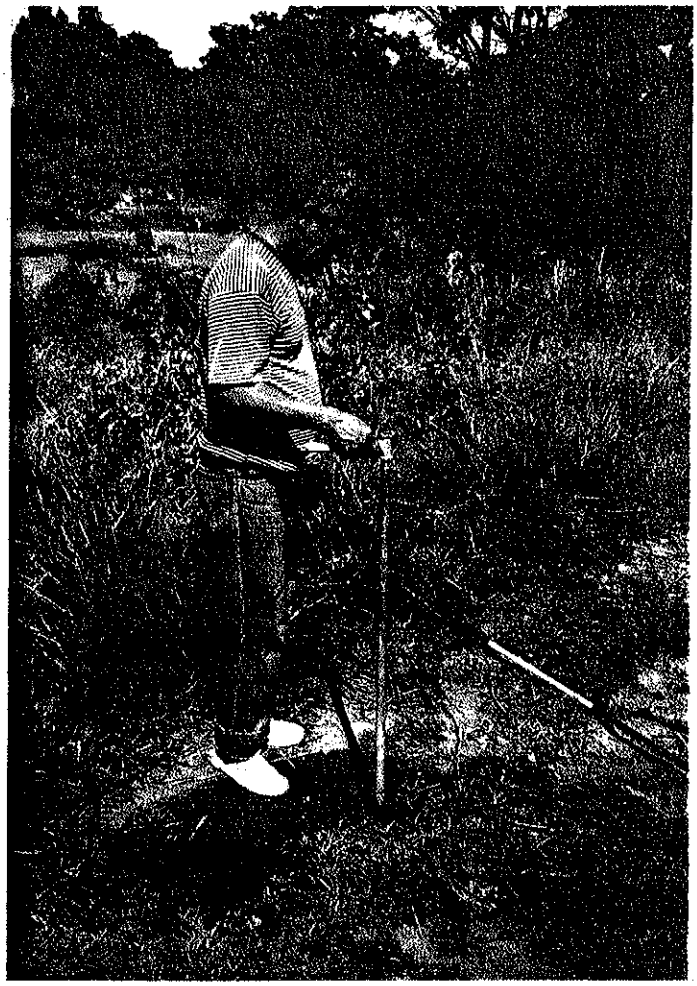


Foto 8 - "Buffalo gun" sendo introduzido no ponto de tiro.

Foto 9 - Detalhe do "Buffalo gun" sendo disparado. Observar a pastilha piezoelétrica, geradora do sinal de "trigger", na manopla.

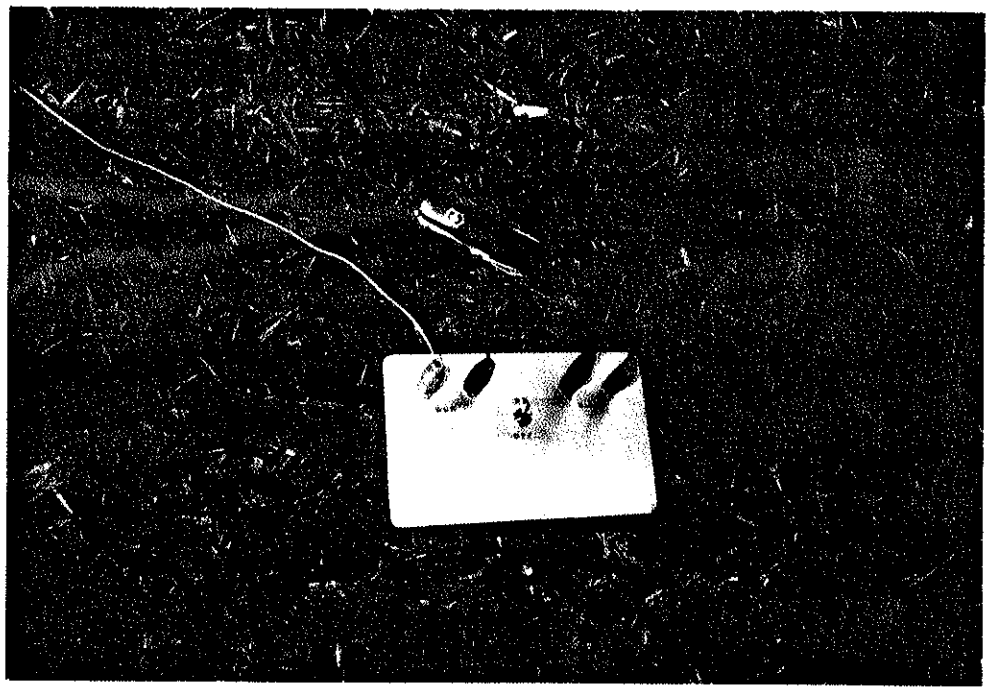


Foto 10 - Caixa do amplificador do sinal de "trigger" proveniente da pastilha piezoelétrica da manopla do "Buffalo gun".

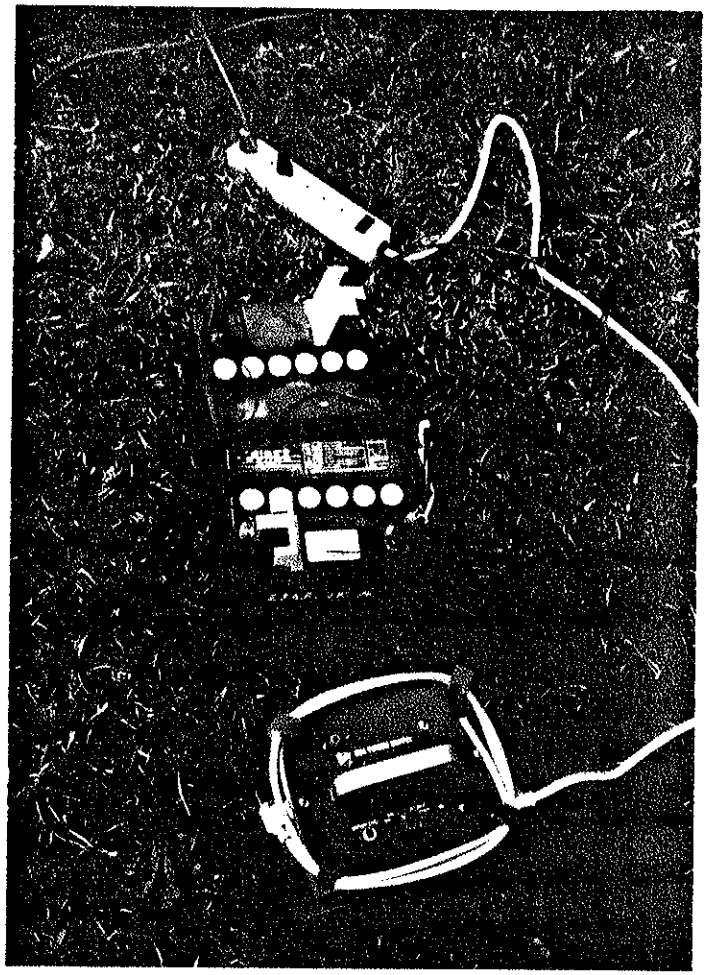


Foto 11 - Detalhe do sistema de alimentação utilizado para os trabalhos de campo. Composto de duas baterias ligadas em série e um conversor de 24 Volts DC para 110 Volts AC.

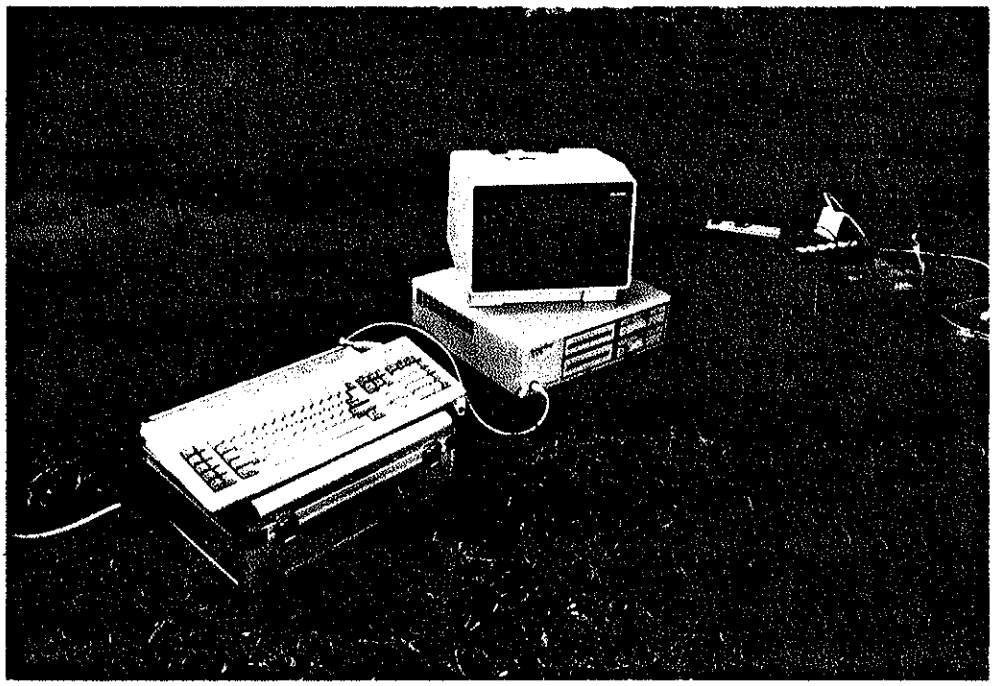


Foto 12 - Sistema sismográfico completo, pronto para trabalhos de campo.

Foto 13 - Sistema montado no porta bagagens de uma perua Kombi, durante os testes iniciais às margens da represa de Guarapiranga. Pode-se observar também o sistema Bison sendo utilizado concomitantemente.

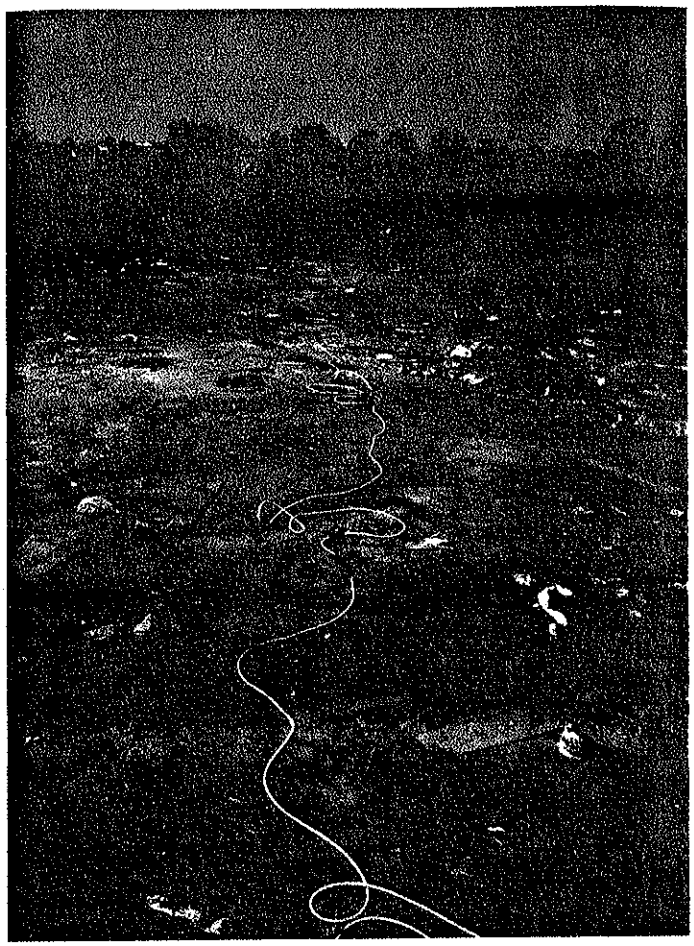


Foto 14 - Linha de sensores utilizados nos testes na represa de Guarapiranga. Pode-se observar os acelerômetros e os geofones convencionais.

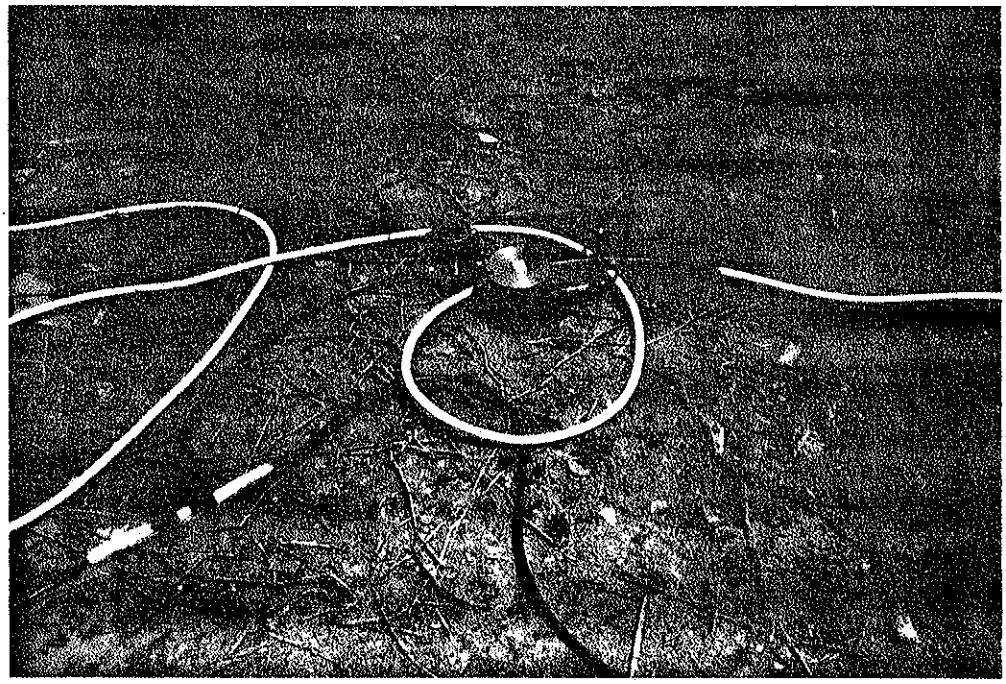


Foto 15 - Detalhe de acelerômetro ao lado de geofone convencional durante testes comparativos com sistema comercial

Foto 16 - Vista panorâmica da região estudada em Mogi Guaçu. Pode-se observar os matacões presentes, inclusive incrustados no talude.

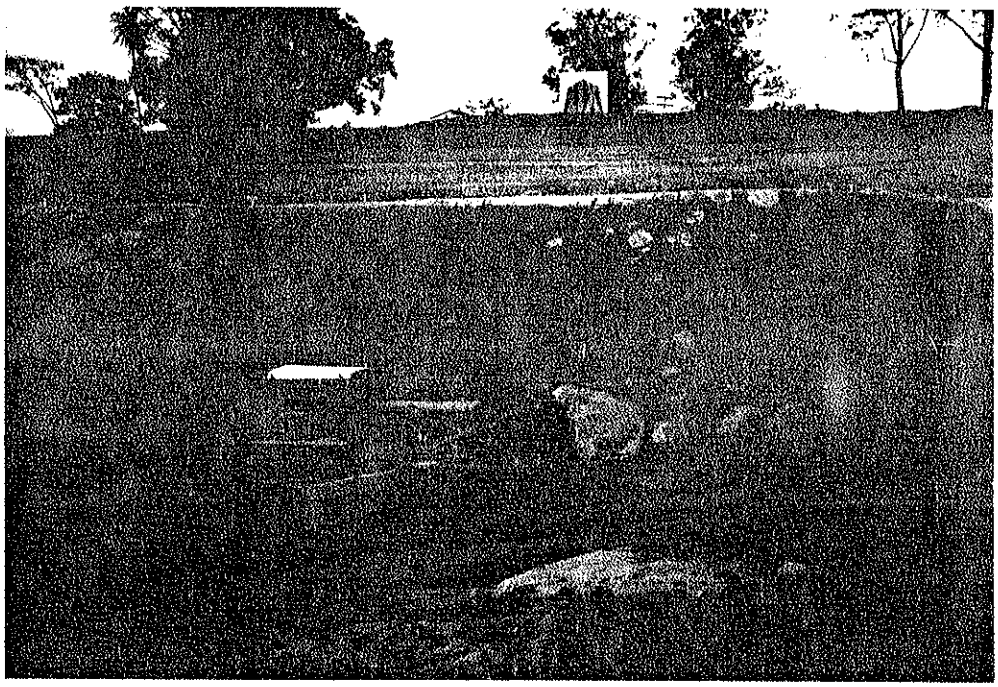


Foto 17 - Detalhe de trator removendo matacão na região estudada em Mogi Guaçu.

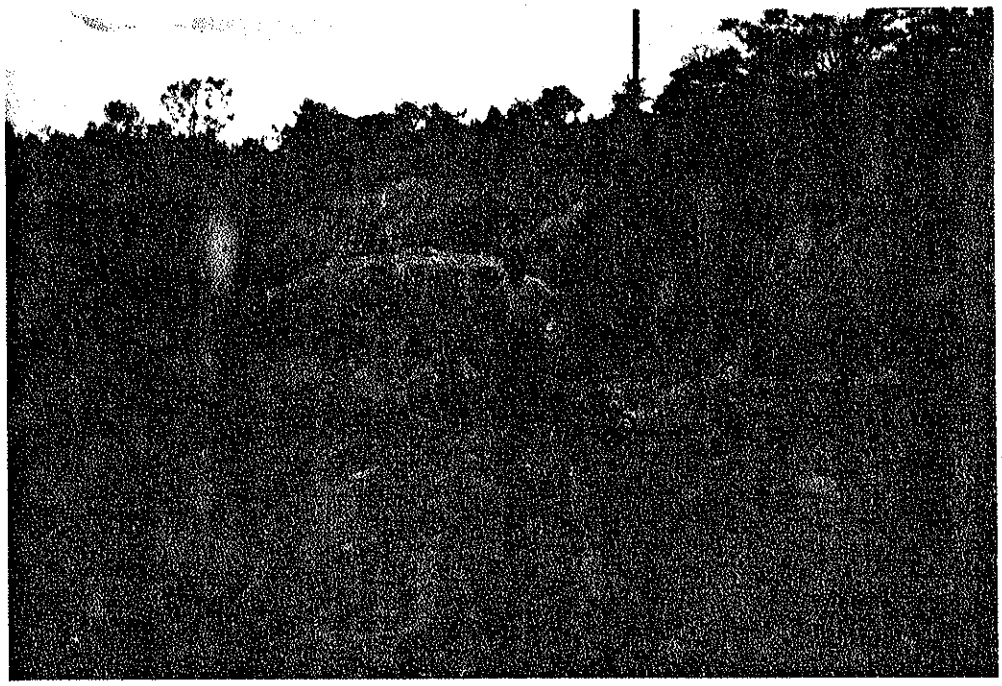


Foto 18 - Detalhe de matacão encontrado durante escavação na região estudada.

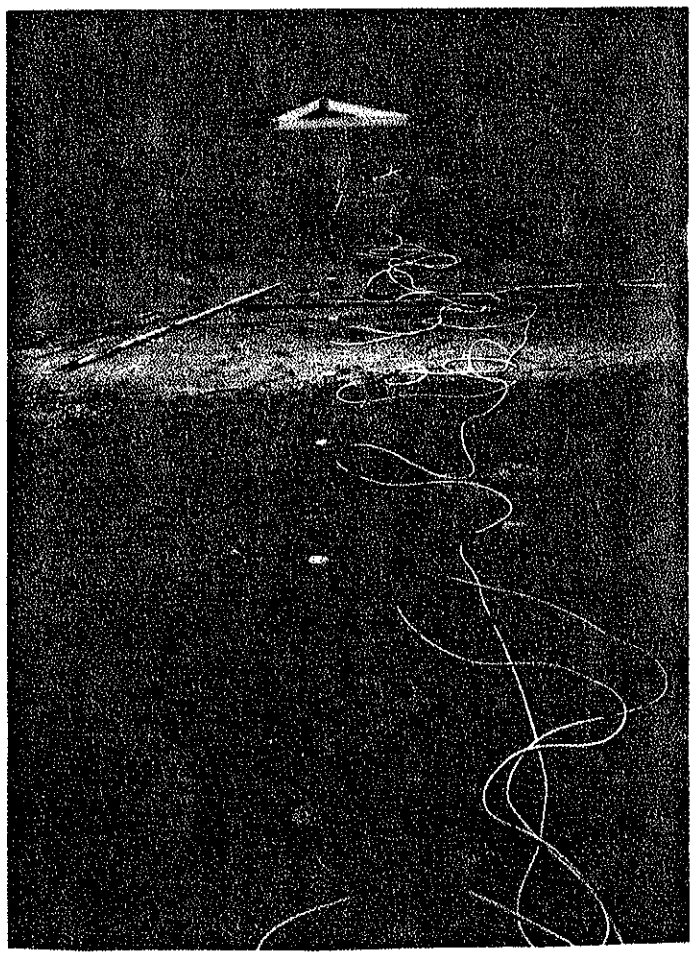


Foto 19 - Arranjo de geofones utilizado para o trabalho de Mogi Guaçu.

A N E X O 2

1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO ACELERÔMETRO

Será apresentada aqui uma breve descrição do funcionamento e princípios teóricos de um acelerômetro piezoelétrico. No entanto, para uma abordagem mais completa sugere-se a consulta a Serridge and Licht, 1986.

Uma analogia mecânica comumente utilizada para demonstrar o funcionamento de um acelerômetro consiste em considerá-lo como um sistema massa-mola, conforme apresentado na FIGURA 44.

As forças presentes no modelo são:

$F = k\,(x_s - x_b - L)$ (força na mola)

$m_b\,\ddot{x}_b = F + F_e$ (força na base)

$m_s\,\ddot{x}_s = -F$ (força na massa sísmica)

A equação de movimento para este modelo é:

$$\ddot{x}_s - \ddot{x}_b = -(F/m_s) - (F + F_e)/m_b = -(k/\mu)\,(x_s - x_b - L) - (F_e/m_b)$$

ou

$$\mu\,\ddot{r} = -k\,r - (\mu / m_b)\,F_o \text{ sen } \omega\,t$$

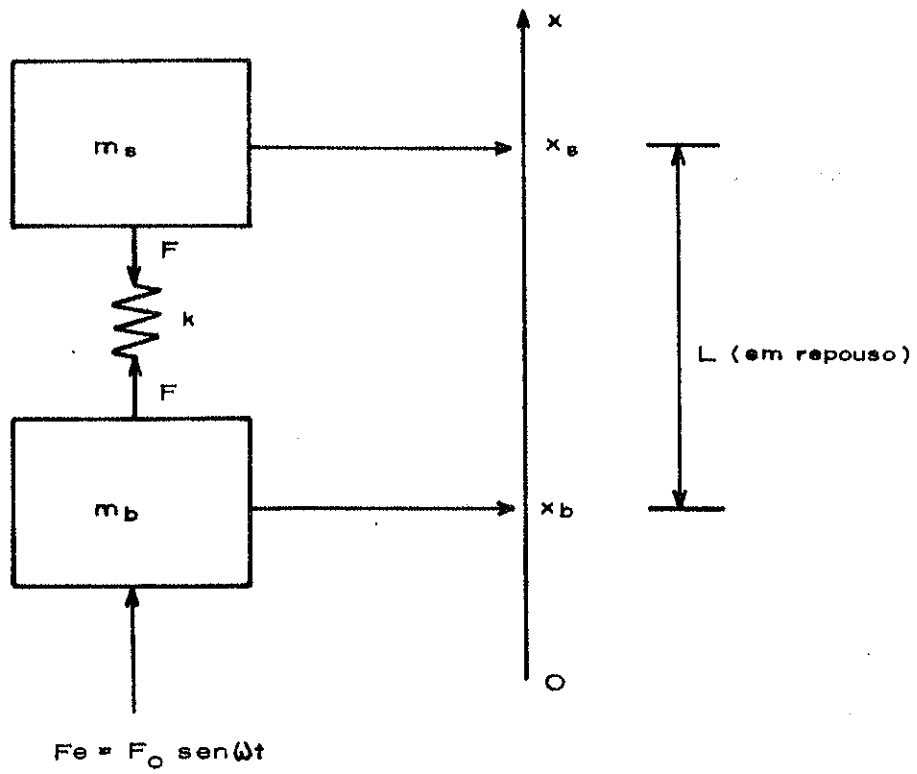
onde

$$1 / \mu = 1/m_s + 1/m_b$$

ou

$$\mu = (m_s m_b / m_s + m_b)$$

μ é frequentemente chamado de "massa reduzida" e
r é o deslocamento relativo entre a base e a massa sísmica
$r = x_s - x_b - L$



onde: m_s = massa sísmica

m_b = massa da base

k = constante de mola do elemento piezoelétrico

x_s = posição da massa sísmica

x_b = posição da base

L = distância entre a massa sísmica e a base (em repouso)

F_e = força de excitação harmônica

F_o = amplitude da força de excitação

ω = freqüência de excitação (rad/s) = $2\pi f$

f = freqüência de excitação (Hz)

Figura 44 - Analogia mecânica comumente utilizada para demonstrar o funcionamento de um acelerômetro piezoelétrico.

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - USP
Biblioteca

Quando o acelerômetro está livremente suspenso, e não está sendo excitado por forças externas (F_e=0), a equação de movimento para esta vibração livre se reduz a:

$$\mu\ddot{r} = -kr$$

Esta equação diferencial pode ser resolvida assumindo que o deslocamento de m_s em relação a m_b varia harmonicamente com a amplitude R, ou:

$$r = R \text{ sen } \omega t$$
$$-\mu R \omega^2 \text{ sen } \omega t = -k R \text{ sen } \omega t$$

Desta forma, a freqüencia de ressonância, ω_n, pode ser escrita:

$$\omega_n^2 = k/\mu$$

As implicações deste resultado podem ser vistas reescrevendo a equação:

$$\omega_n^2 = k (1/m_s + 1/m_b)$$

Se o acelerômetro é montado com perfeita rigidez sobre uma estrutura muito mais pesada do que êle próprio, então m_b torna-se muito maior do que m_s. Tomando-se o limite ($m_b \to \infty$) a equação se reduz a:

$$\omega_m^2 = k/m_s \qquad \text{(eq. 1)}$$

Esta é a freqüência natural do sistema massa sísmica-mola e é definida como a freqüência de ressonância da montagem (ω_m) do acelerômetro. Esta propriedade irá definir a faixa de freqüência utilizável do acelerômetro. Deve-se lembrar, no entanto, que o acoplamento do acelerômetro com a estrutura deve ser rígido para que seja verdadeira a aproximação adotada ($m_b \to \infty$).

A dedução apresentada permite concluir que para se obter maior freqüência de ressonância da montagem deve-se utilizar elemento piezoelétrico de maior rigidez ou u'a massa sísmica menor. Considerando que a rigidez da cerâmica piezoelétrica é

constante, dever-se-á adotar menor massa sísmica. Isto fará, no entanto, que a sensibilidade do acelerômetro decresça, uma vez que menor força será exercida no elemento piezoelétrico.

Portanto fica claro que se deve estabelecer um compromisso entre a sensibilidade desejada e a freqüência de ressonância do acelerômetro, a qual vai definir a faixa de freqüência de utilização.

2. CONSIDERAÇÕES SOBRE O PRÉ-AMPLIFICADOR

A FIGURA 45 apresenta o circuito equivalente de um acelerômetro conectado a um pré-amplificador de voltagem.

Do circuito equivalente pode-se dizer que se o acelerômetro não sofre influência do cabo e pré-amplificador, a voltagem presente na saída (V_a) será:

$$V_a = Q_a / C_a$$

Sabe-se que R_a é uma resistência em paralelo extremamente alta (vários GΩ), podendo, portanto, ser ignorada. Ao mesmo tempo, a voltagem na entrada do pré-amplificador pode ser escrita diretamente pela relação:

$$V_i = Q_a/(C_a+C_c+C_p)$$

e

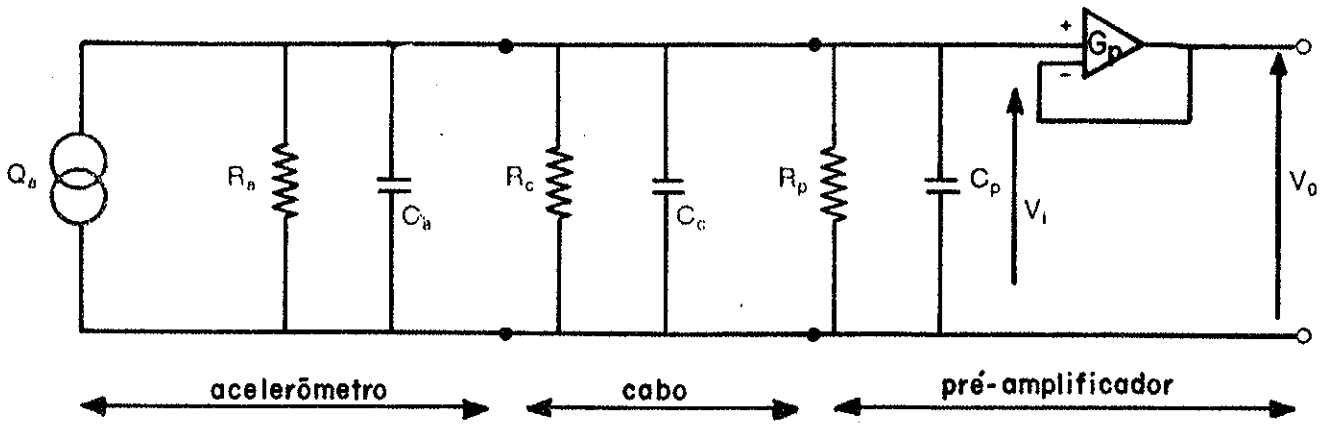
$$V_o = GV_i = G\ V_a\ C_a/(C_a+C_c+C_p)$$

Esta expressão, por sua vez, pode ser escrita em termos de sensibilidade S_{va}, e ter-se-á:

$$S_{va} = S_{va(aberto)}\ C_a/(C_a+C_c+C_p) \qquad \text{(eq. 2)}$$

onde $S_{va(aberto)}$ é a sensibilidade do acelerômetro em circuito aberto, ou seja, sem carga.

Esta expressão mostra que a sensibilidade do acelerômetro é dependente da capacitância do cabo elétrico utilizado entre a unidade sensora propriamente dita e o pré-amplificador, e a própria capacitância deste. Portanto fica claro que grandes comprimentos de cabo irão diminuir a sensibilidade do acelerômetro.



onde:

R_a = resistência do acelerômetro

C_a = capacitância do acelerômetro

R_c = resistência do cabo

C_c = capacitância do cabo

R_p = resistência do pré-amplificador

C_p = capacitância do pré-amplificador

Q_a = carga gerada pelo acelerômetro piezoelétrico

G_p = ganho do pré-amplificador

Figura 45 - Circuito equivalente de um acelerômetro conectado a um pré-amplificador de voltagem.

3. LIMITE A BAIXAS FREQÜÊNCIAS

Outra consideração importante a ser feita quando se utiliza acelerômetros diz respeito ao limite de operação a baixas freqüências. Esta freqüência pode ser calculada por:

$$f_b = 1/(2\pi R_t C_t) \qquad \text{(eq. 3)}$$

onde:

$C_t = C_a + C_c + C_p$

e

$1/R_t = ((1/R_a)+(1/R_c)+(1/R_p))$

Portanto para tornar o acelerômetro sensível a baixas freqüências pode-se aumentar a capacitância do cabo e do pré-amplificador, uma vez que a do acelerômetro é intrínseca do elemento piezoelétrico, ou utilizar um pré-amplificador com alta resistência de entrada.

Evidentemente, se a capacitância total for aumentada, isto provocará um decréscimo na sensibilidade do sistema (eq. 2). Portanto, o caminho normalmente utilizado, é se construir um pré-amplificador com alta resistência de entrada.

4. ACELERÔMETRO DESENVOLVIDO NESTE TRABALHO

O acelerômetro desenvolvido para este trabalho consiste em um acelerômetro piezoelétrico cujo elemento sensor é uma cerâmica de zirconato-titanato de bário e chumbo, com diâmetro de 23 mm e espessura de 4 mm. Suas faces são polarizadas e revestidas por um óxido de prata. Com informações fornecidas pelo fabricante e medições efetuadas nos laboratórios do IPT, foi possível definir valores aproximados para certas características, a saber:

$k \simeq 200*10^6$ N/m

$C_a \simeq 1300$ pF (@ 1000 Hz)

$R_a \simeq 30$ GΩ (100 VDC)

$S_{va(aberto)} \simeq 50$ mV/(m*s^{-2})

Com estes dados é possível calcular com razoável aproximação a freqüência de ressonância da montagem (ω_m) de um acelerômetro que utilizasse uma massa sísmica da ordem de 0,03kg (equivalente a um disco de latão de diâmetro de 23 mm e altura de 8 mm. Aplicando-se a eq. 1 tem-se:

$\omega_m^2 = 200*10^6/0,03$

portanto

$f_n \simeq 13$ kHz (freqüência natural ou de ressonância)

Também é possível calcular a sensibilidade S_{va}. Uma vez que o pré-amplificador foi incorporado no corpo do acelerômetro, pode-se considerar a capacitância do cabo igual a zero. Portanto utilizando-se a eq. 2, tem-se:

$S_{va} = 50*1300*10^{-12}/(1300*10^{-12}+0+20*10^{-12})$,

uma vez que $C_p = 20$ pF (@ 1000 Hz)

a solução leva à sensibilidade $S_{va} = 49,2$ mV/(m*s^{-2}), ou seja uma eficiência de aproximadamente 98 %. Optou-se por dar um ganho no pré-amplificador a fim de tornar o sinal de saída em todos os acelerômetros calibrados em 1 V/g, onde g é o valor da aceleração da gravidade. Portanto o ganho aplicado foi de aproximadamente 20 vezes, regulado por um potenciômetro de realimentação no amplificador. Não foi utilizado um resistor fixo para a aplicação de ganho devido à ligeira variação das características das pastilhas piezoelétricas de um exemplar para outro. Esta solução também torna o acelerômetro mais versátil, pois permite variar a sensibilidade se for necessário para algum trabalho específico.

A utilização da eq. 3 permite calcular o limite de utilização em baixas freqüências, ou seja:

$f_b = 1/(2\pi R_t C_t)$

sabe-se que $C_p = 20$ pF, enquanto a R_p pode ser considerada igual a 100 MΩ, uma vez que a impedância de entrada do operacional é da

ordem de TΩ, e a resistêcia a entrada, ao terra, é de 100 MΩ. Utilizanndo-se os valores definidos, tem-se:

f_b = 1,12 Hz

Portanto, pode-se resumir as características teóricas do acelerômetro desenvolvido em:

a. freqüência de ressonância = 13 kHz;
b. sensibilidade = 1 V/g;
c. limite de resposta em baixas freqüências = 1,12 Hz.

5. CONCLUSÕES

Os valores calculados estão bem próximos dos encontrados experimentalmente, exceto o limite de resposta em baixas freqüências, que não foi possível definir com precisão, porém, por estar, o valor calculado, bastante distante da faixa de trabalho e por serem posteriormente filtradas as freqüências abaixo de 20 Hz, foi considerado aceitável para as aplicações propostas.

A N E X O 3

1. FUNÇÕES DO PROGRAMA DE CONTROLE

Para o desenvolvimento do programa de controle para este trabalho considerou-se como meta a demonstração da viabilidade do sistema como um sismógrafo de alta resolução. Para isto foi desenvolvida uma série de rotinas que procuram simular de maneira bem próxima o funcionamento e operação básica de um sismógrafo digital de alta resolução convencional.

O conjunto de rotinas procurou abranger apenas as funções de aquisição dos dados, uma vez que para o processamento dos dados é possível adquirir no mercado programas dedicados bastante poderosos. No entanto, foram incluídas as rotinas que permitem executar um "pré-processamento", ou seja, as necessárias para efetuar somatório ("stacking"), muito utilizado em trabalhos em áreas urbanas, onde o ruído ambiental é elevado, e não é possível o uso de fontes de energia de grande potência.

Como foi apresentado no Capítulo 4, o programa foi escrito em linguagem Pascal, por meio do compilador Turbo Pascal versão 5.5, da Borland International no ambiente MS-DOS (versão 3.1).

As funções básicas compreendidas pelo programa de controle podem ser resumidas em:

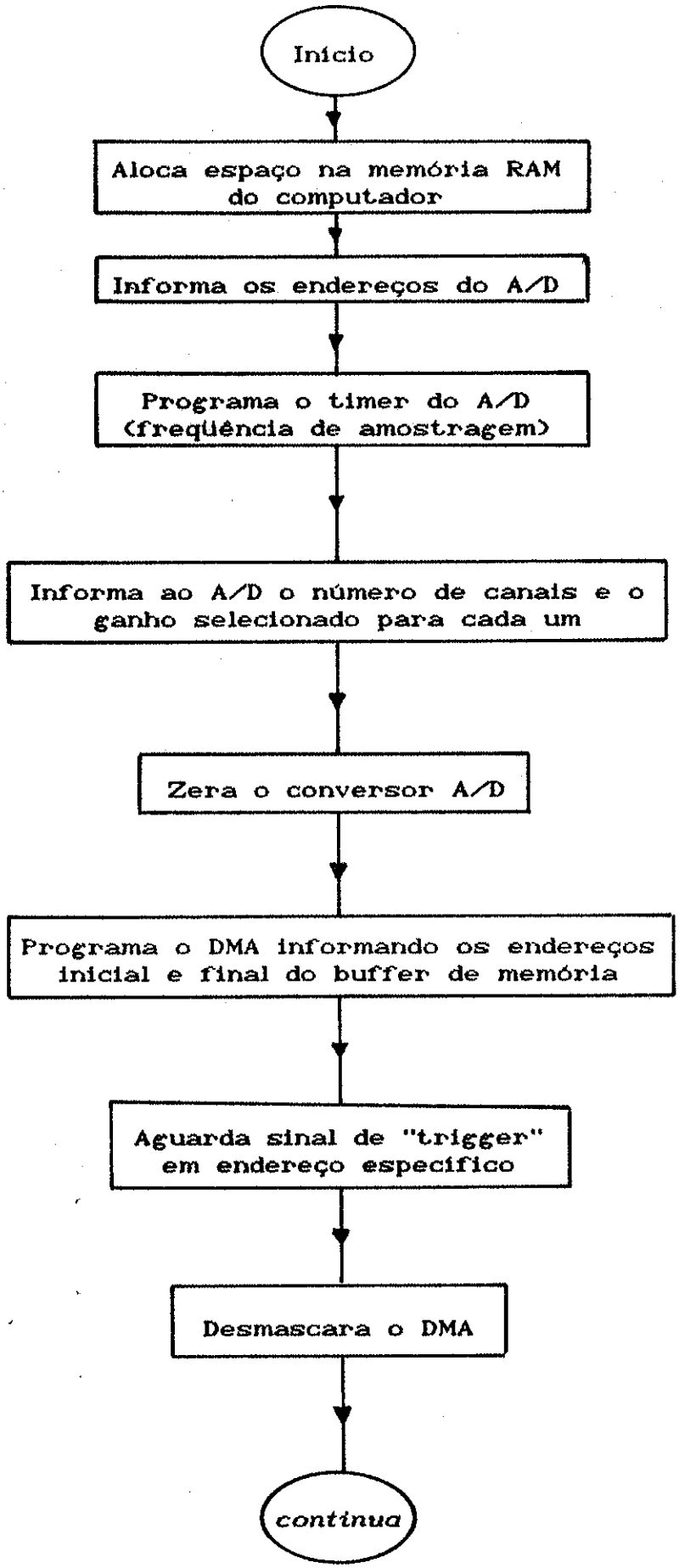
a) Selecionar os parâmetros globais de aquisição, ou seja, o nome do trabalho (para sua inserção no cabeçalho do arquivo), o tempo de atraso entre o tiro e o início da aquisição, o filtro passa-altas selecionado, o "offset" que será utilizado, o espaçamento entre os geofones, a posição do ponto de tiro em relação ao início da linha, a direção da linha, o diretório em que os arquivos de dados devem ser gravados, e finalmente o ganho (em hardware) individual de cada canal;

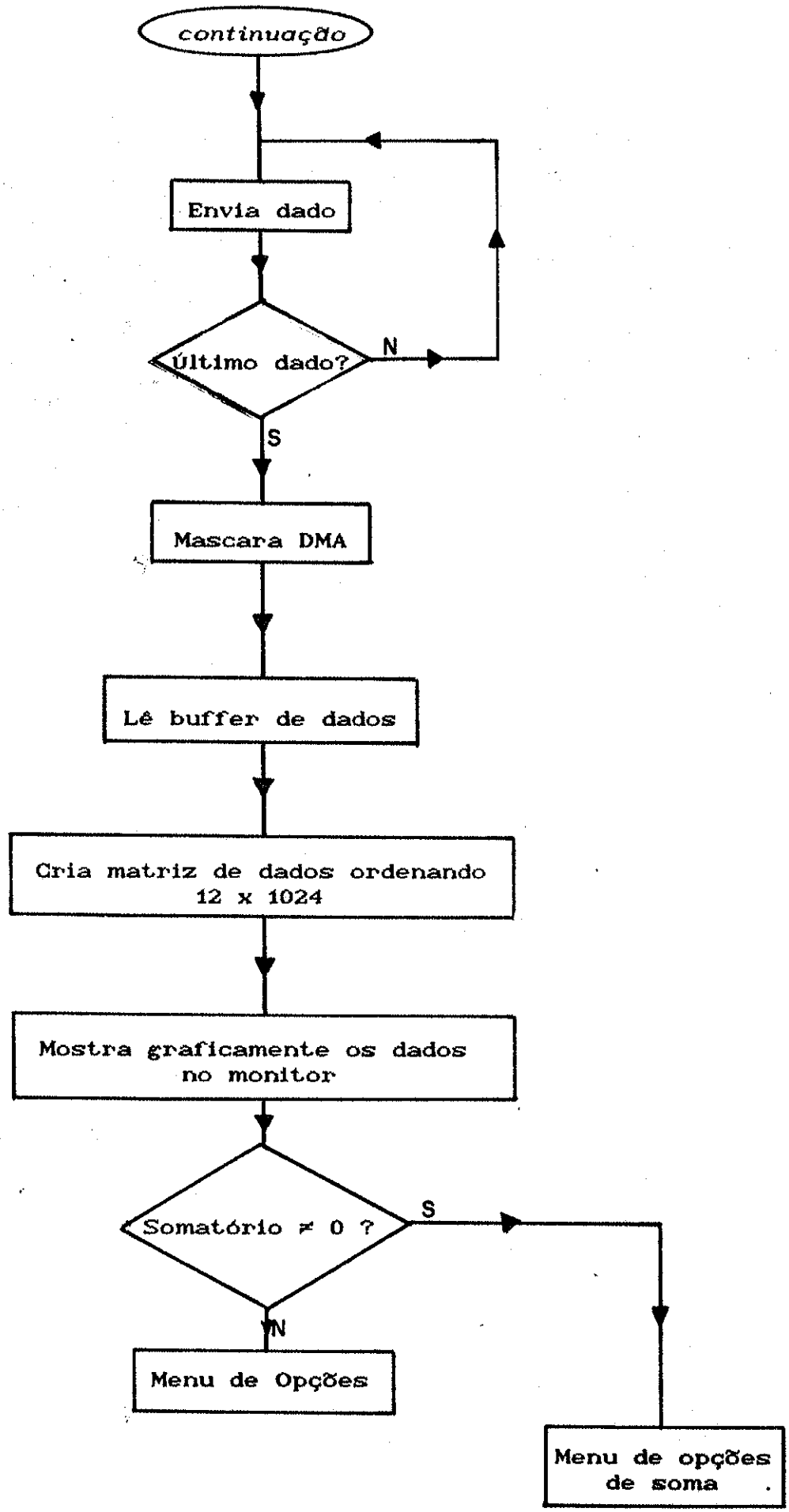
b) recuperar um arquivo pré-existente e possibilitar a amplificação dos seus traços para efeito de observação e/ou impressão do sismograma;

c) adquirir um novo registro, ou seja, a função principal do sismógrafo.

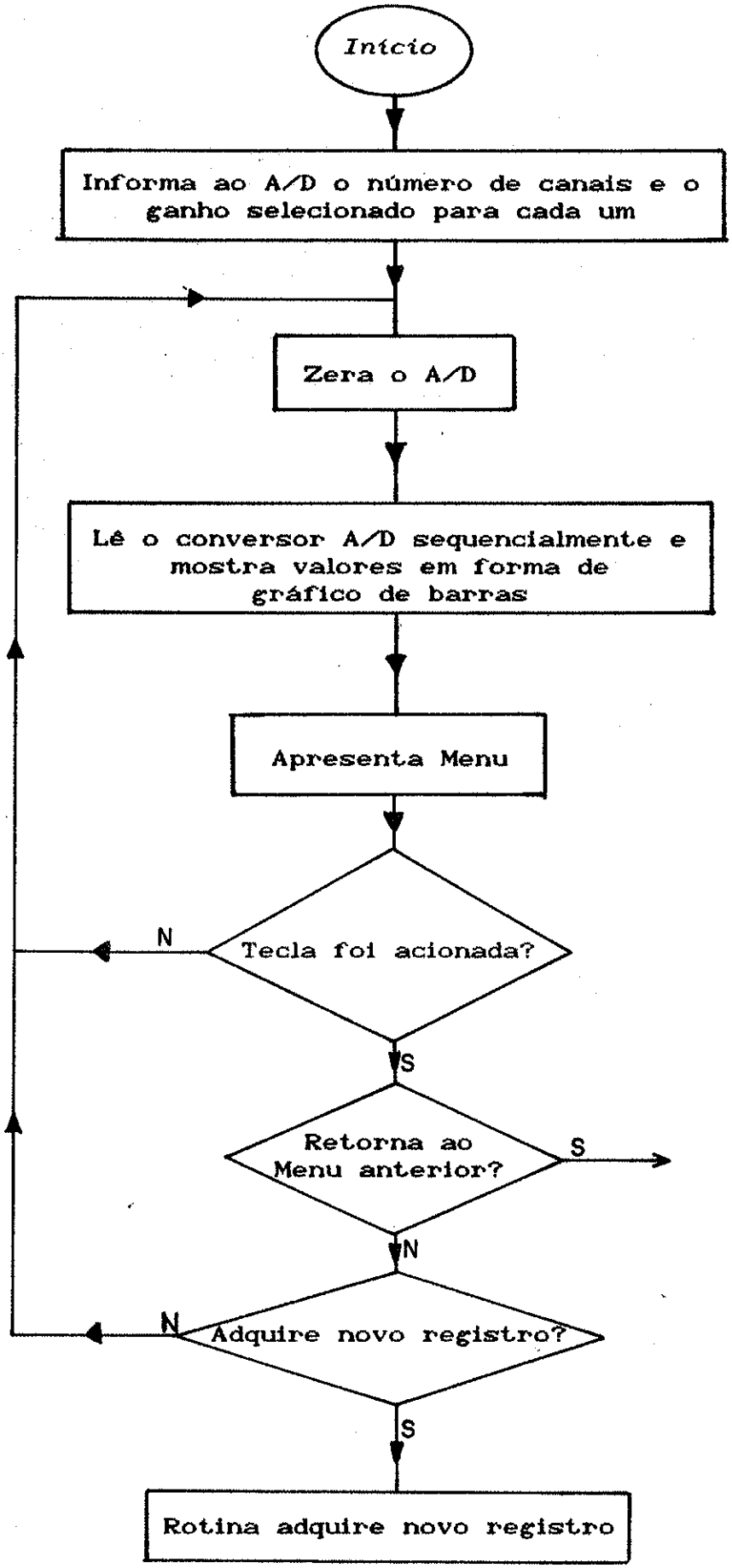
A seguir são apresentados os fluxogramas de cada módulo do programa. Deve ser notado que são apresentados nestes fluxogramas apenas as funções a serem executadas, e sua cronologia. Evidentemente a implementação será função da linguagem utilizada.

2. ROTINA ADQUIRIR NOVO REGISTRO

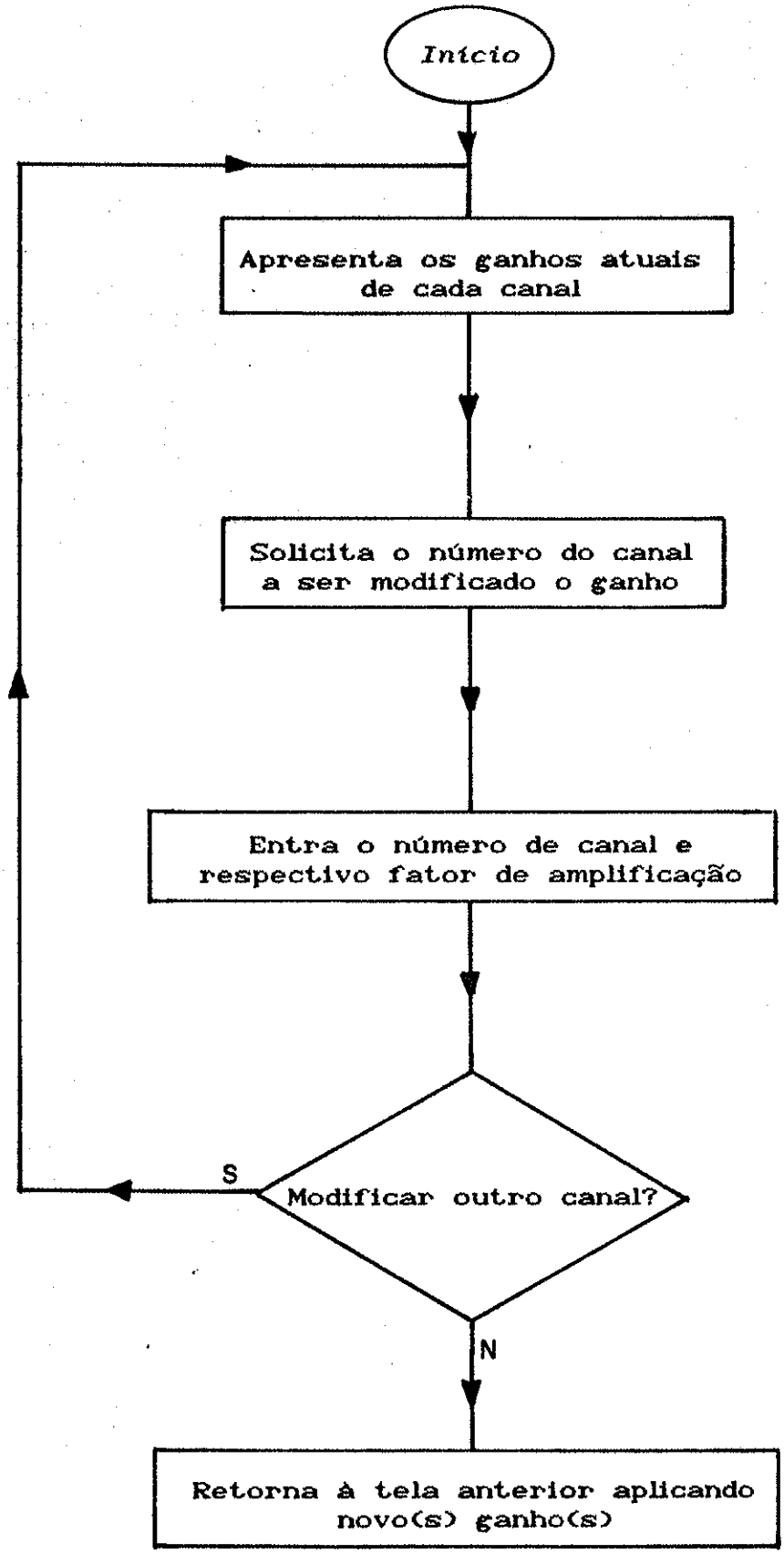



continuação
Envia dado
Último dado?
N
S
Mascara DMA
Lê buffer de dados
Cria matriz de dados ordenando
12 x 1024
Mostra graficamente os dados
no monitor
Somatório ≠ 0 ?
S
N
Menu de Opções
Menu de opções
de soma

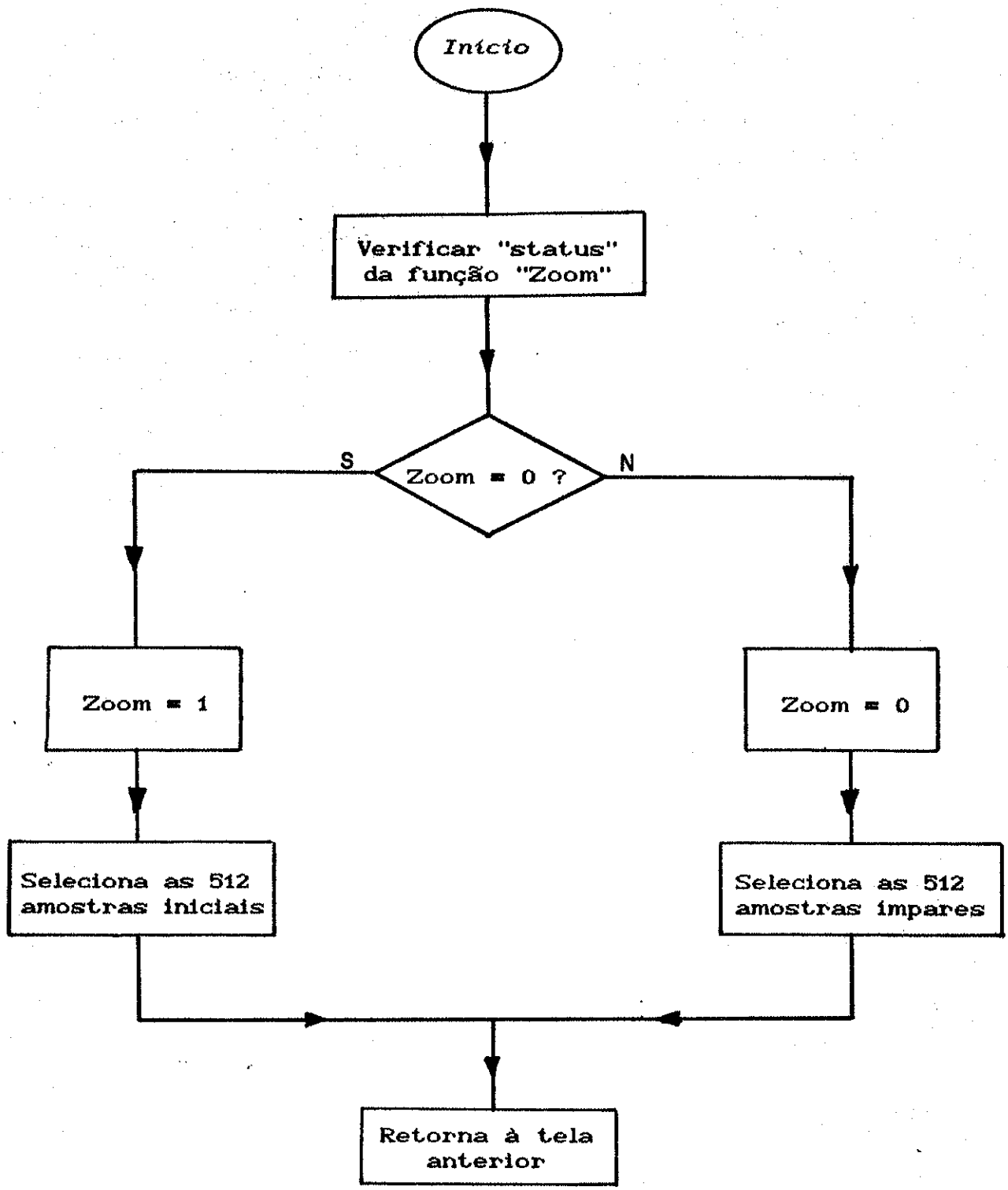
3. ROTINA RUÍDO DE LINHA



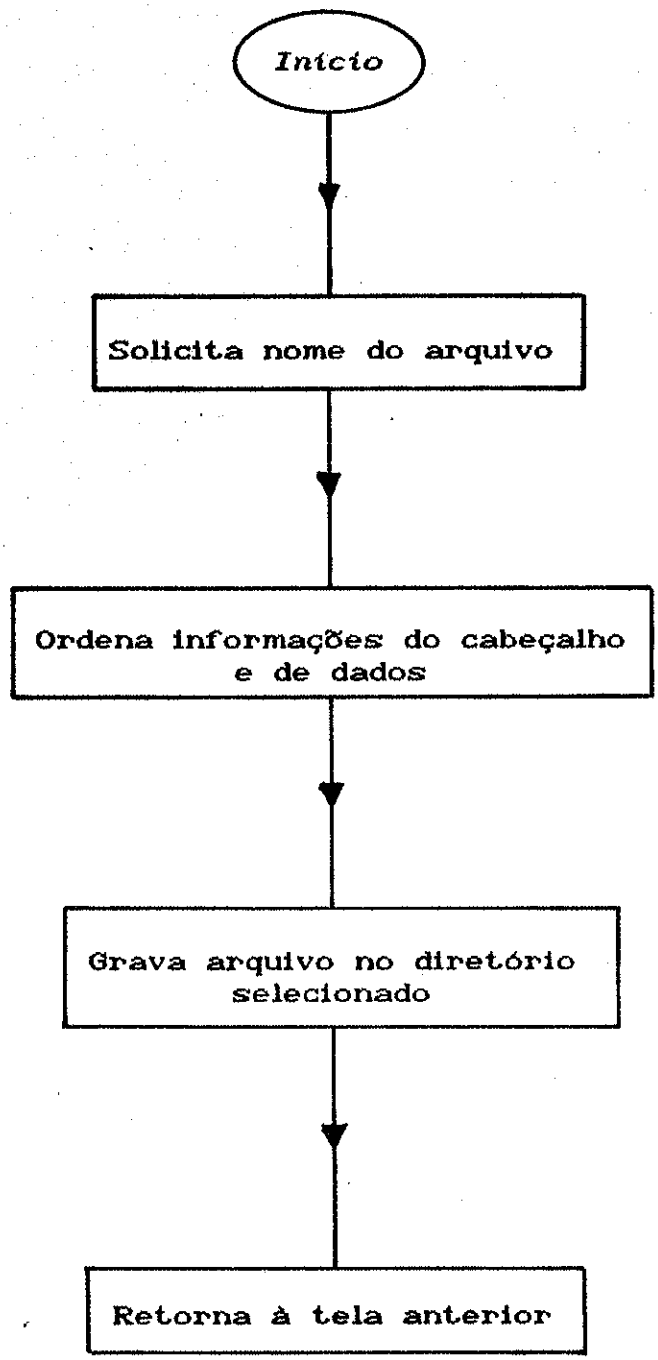
4. ROTINA AMPLIFICAR TRAÇOS



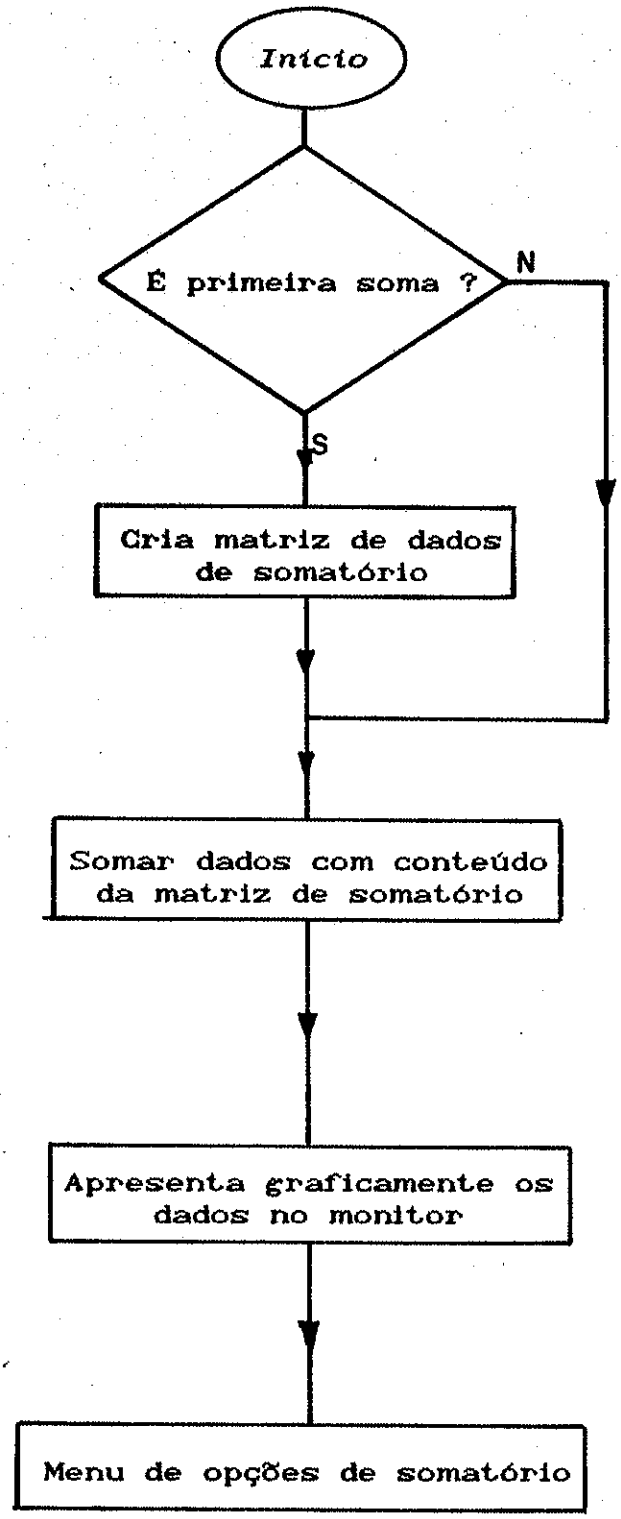
5. ROTINA ZOOM



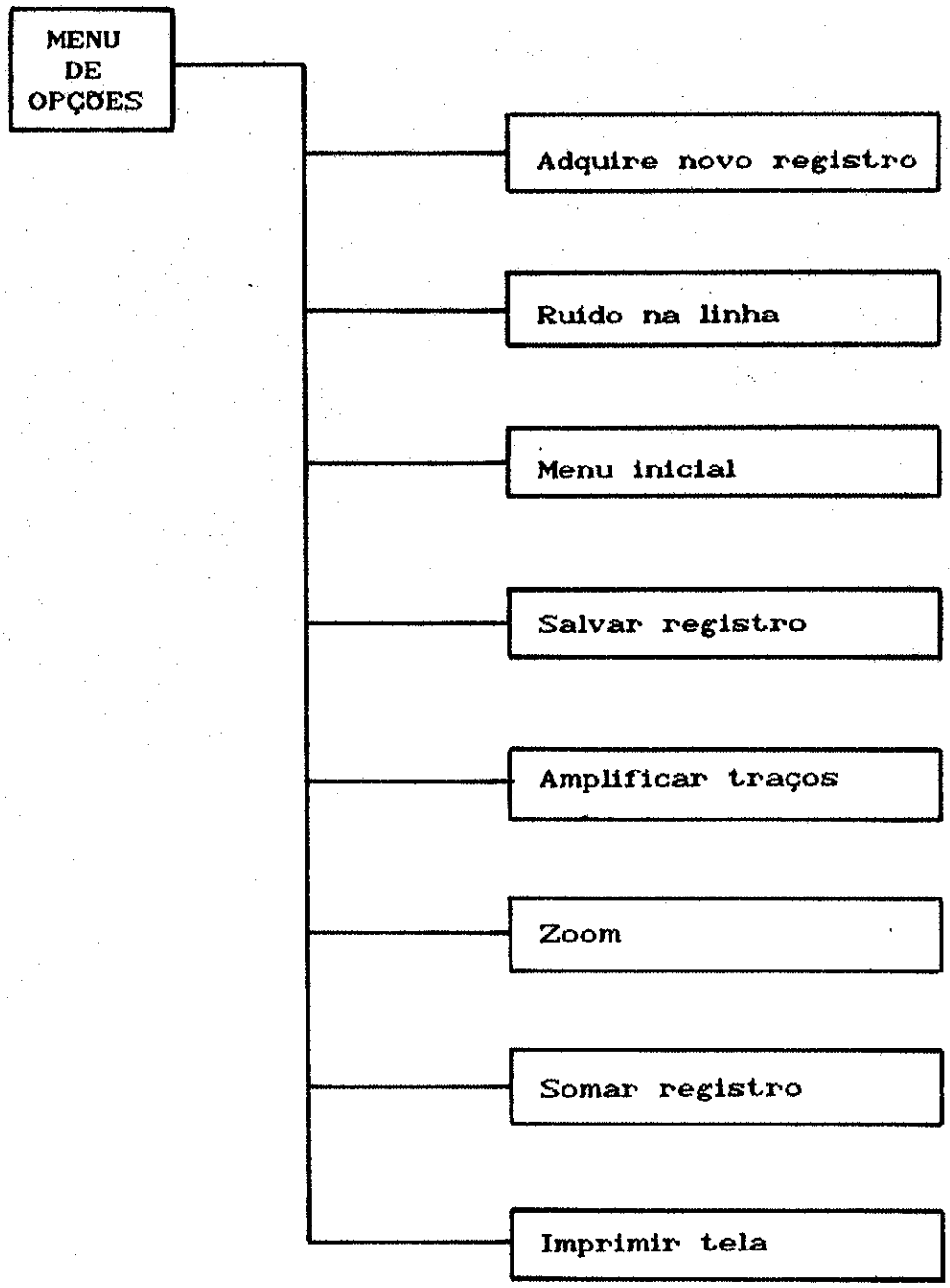
6. ROTINA SALVAR REGISTRO



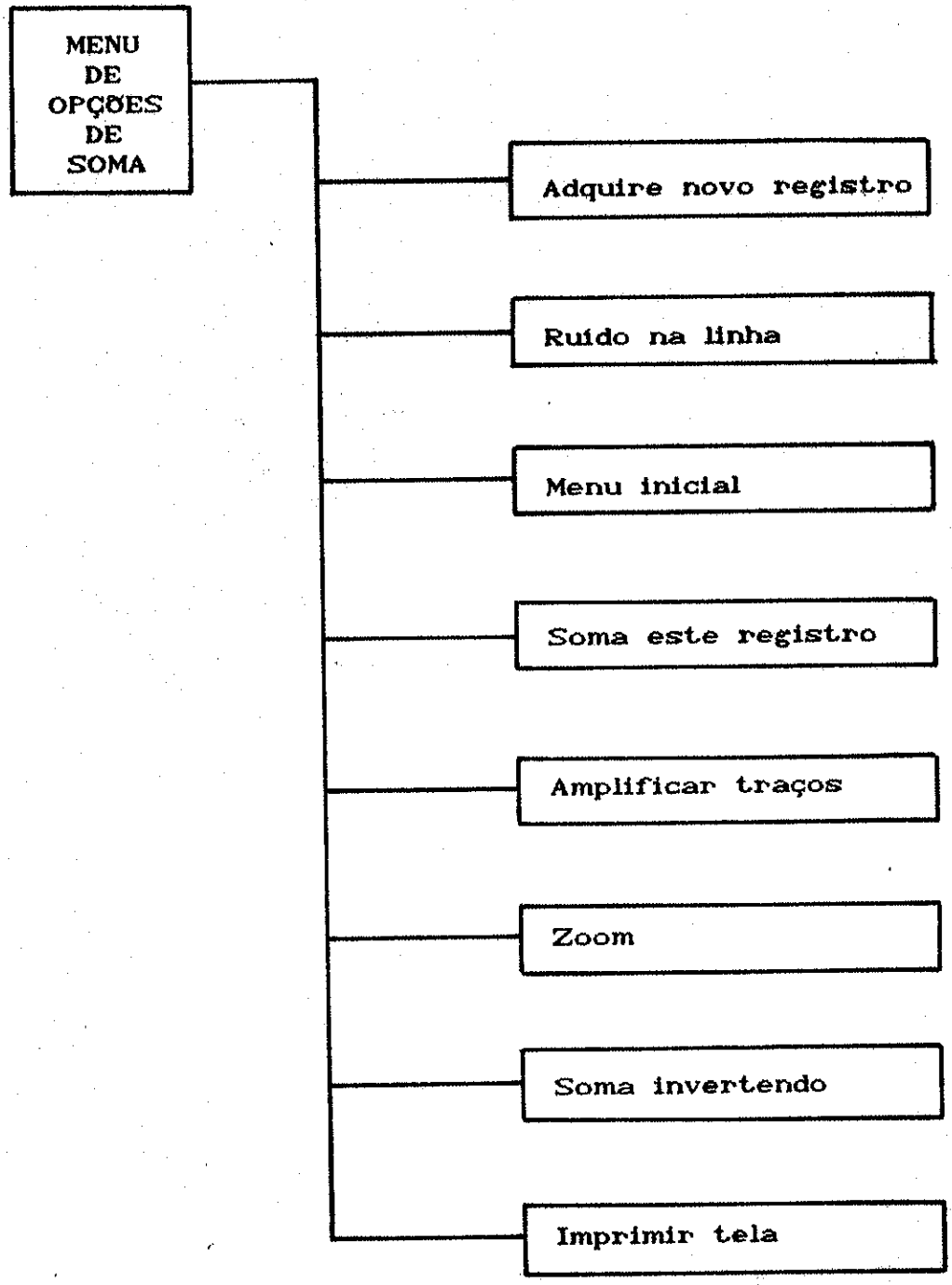
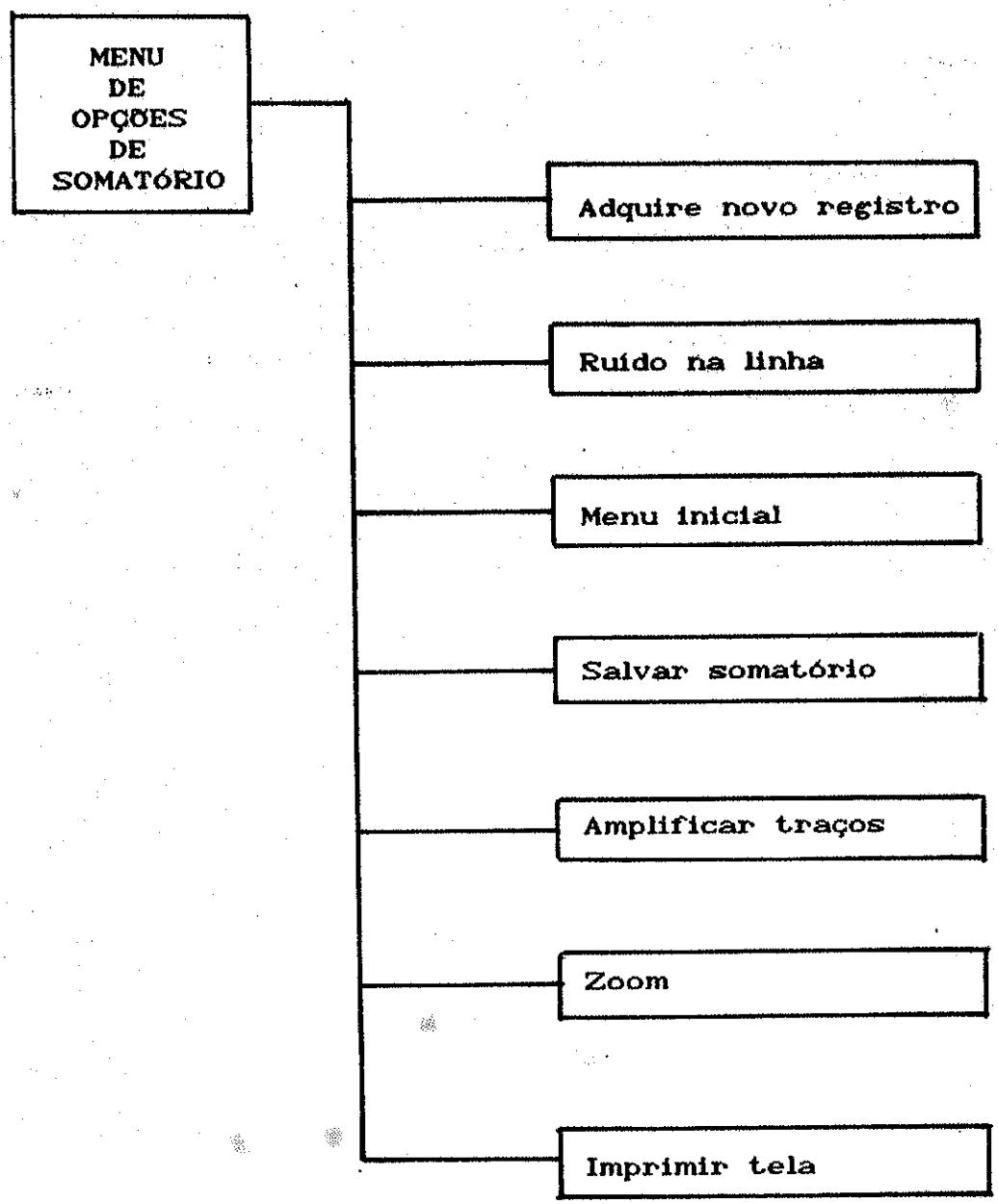
7. ROTINA DE SOMATÓRIO



8. ROTINA MENU DE OPÇÕES



9. ROTINA MENU DE OPÇÕES DE SOMA



10. ROTINA MENU DE OPÇÕES DE SOMATÓRIO