UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE UM SISMÓGRAFO PARA MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES E PRESSÃO ACÚSTICA

Celso Bairros Varella Neto

Orientador: Prof. Dr. Fabio Taioli

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

Versão Corrigida

São Paulo

2017

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE UM SISMÓGRAFO PARA MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES E PRESSÃO ACÚSTICA

Celso Bairros Varella Neto

Orientador: Prof. Dr. Fabio Taioli

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

São Paulo

2017

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica preparada pelo Serviço de Biblioteca e Documentação do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo

Varella Neto,Celso Bairros
Desenvolvimento e construção de um sismógrafo para monitoramento de vibrações e pressão acústica./ Celso Bairros Varella Neto. - São Paulo, 2017.
116p.: il.

Dissertação(Mestrado):IGc/USP
Orient.:Taioli, Fabio

1. Sismologia 2. Sismógrafo 3. Desmonte de rochas 4. Vibrações do terreno I. Título

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE UM SISMÓGRAFO PARA MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES E PRESSÃO ACÚSTICA

Celso Bairros Varella Neto

Orientador: Prof. Dr. Fábio Taioli

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

COMISSÃO JULGADORA

Nome	Assinatura
Presidente: Prof. Dr. Fabio Taioli	_____
Examinadores:	_____
	_____

São Paulo
2017

Dedico este trabalho a meus pais, por serem os meus maiores incentivadores e por todo o apoio, amor e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Ao meu amigo e orientador Prof. Dr. Fábio Taioli pela paciência, orientação e amizade, pois contribuiu integralmente para realização desta pesquisa.

Ao Dr. Adriano Marchioreto pela amizade, apoio e contribuição para com a execução desta pesquisa, e por sempre instigar-me a pesquisar e a estudar cada vez mais.

À empresa Alta Resolução Geofísica e Geologia por dar-me a possibilidade e todo o apoio técnico-financeiro para realização desta pesquisa. E a todos os colegas que de alguma forma contribuíram direta ou indiretamente e especialmente ao Me. Rodrigo Machado e ao geofísico André Santana de Araújo.

Ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa, seus docentes, colegas do curso de Pós-Graduação e aos funcionários, particularmente da seção de Pós-Graduação, da Biblioteca e da Gráfica.

Aos Profs. Drs. Denise de La Corte Bacci e Jacopo Seccatore pelas sugestões e contribuições por ocasião do Exame de Qualificação.

As empresas Dagoberto Barcellos S.A. e Irmãos Cioccari e Cia Ltda, e a todos os seus funcionários por proverem as autorizações necessárias e todo o apoio técnico para a realização do monitoramento sismográfico durante os eventos de desmonte de rochas utilizando explosivos.

Ao Prof. Dr. Enrique Munaretti por partilhar seu tempo e conhecimento, deste modo, contribuindo com esta pesquisa e para com a minha formação pessoal.

Ao Dr. Luiz Coelho da empresa Lynx Tecnologia por auxiliar-me durante a etapa de desenvolvimento do protótipo.

A todos os professores e colegas do curso de especialização em "Sistemas Eletrônicos para Controle" do SENAI Anchieta, que direta ou indiretamente auxiliaram no desenvolvimento do protótipo e especialmente ao colega Pedro Crema, o qual confeccionou o layout das placas de circuito impresso.

A minha esposa Marina pela compreensão, companheirismo e amor compartilhado em todas as etapas desta caminhada e a minha afilhada Maria Eduarda, por me proporcionar momentos maravilhosos ao seu lado.

Aos meus pais Julio e Nira Varella, ao meu irmão Julio Filho as minhas tias Lucia Dagmar e Maria Elena, pelo incentivo e apoio dado durante toda a minha jornada. Aos meus Avós Celso e Elena, *in memoriam.* E aos meus primos Fabio e Luciana Varella por me apoiarem.

RESUMO

VARELLA, C. B. N. Desenvolvimento e Construção de um Sismógrafo para Monitoramento de Vibrações e Pressão Acústica. 2017. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Esta pesquisa apresenta o projeto, construção e testes, tanto de laboratório como de campo de um sismógrafo de engenharia para o monitoramento dos níveis de vibração e pressão acústica, resultantes do processo de desmonte de rocha utilizando explosivos. Desenvolveram-se filtros e amplificadores com características que atendam às especificações impostas pelo guia intitulado "*ISEE Performance Specifications for Blasting Seismographs*" (*ISEE*, 2011), bem como, foram utilizados sensores (geofones e microfone) desenvolvidos e fabricados por terceiros, mas que atendam às características impostas pelo guia. A interconexão entre a etapa analógica com a digital foi realizada através da utilização de módulos de conversão A/D com tecnologia Sigma-Delta e resolução de 24-bits. Todas as etapas de aquisição, processamento e armazenamento de dados são controladas através de um microcontrolador ARM Cortex-M de 32-bits, o qual provê os mais diversos e modernos periféricos. Os testes de laboratório demonstraram a eficácia dos circuitos analógicos, pois apresentaram resposta plana na banda de passagem, onde os filtros passa-baixa, do tipo *Butterworth*, proporcionaram uma atenuação de 36 dB/oitava a partir da frequência de corte de 500 Hz, enquanto os filtros passa-alta, do tipo passivo, proporcionaram uma atenuação de 6 dB/oitava abaixo da frequência de corte de 2 Hz. Os testes de operação confirmaram a fácil e rápida operação do conjunto sismográfico, enquanto os testes de campo demonstraram a praticidade de sua operação e confiabilidade e coerência dos resultados. Concluiu-se que o sistema é exequível, atendendo às necessidades de monitoramento de um processo de desmonte de rochas utilizando explosivos a um preço relativamente baixo, abrindo a possibilidade de utilizá-lo em monitoramentos permanentes em situações onde isto seja necessário.

Palavras-chave: Sismologia; Sismógrafo; Desmonte de Rochas; Vibrações do Terreno

ABSTRACT

VARELLA, C. B. N. Desenvolvimento e Construção de um Sismógrafo para Monitoramento de Vibrações e Pressão Acústica. 2017. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

This research presents the design, construction and laboratory and field testing of an engineering seismograph for monitoring vibration and acoustic pressure levels during rock blasting. Filters and amplifiers with characteristics that meet the specifications of ISEE *Performance Specifications for Blasting Seismographs* (ISEE, 2011) have been developed. Third part sensors (geophones and microphones) were selected to attend the characteristics suggested by the guide. The interconnection between the analog and the digital stages was accomplished with A/D conversion modules with Sigma-Delta technology and 24-bit resolution. All data acquisition, processing and storage steps are controlled by a 32-bit ARM Cortex-M microcontroller, which provides several and modern peripherals. Laboratory tests confirmed the effectiveness of the analog circuits that presented flat response between 2 and 500Hz. The low-pass filters developed are type Butterworth with an attenuation factor of 36 dB/octave for frequencies above 500 Hz. The high-pass filters are of passive type with rejection factor of 6 dB/octave below 2 Hz. The operation of the system presented to be easy and fast. Field tests demonstrated its friendliness and the results showed to be consistent. It was concluded that the system is feasible and applicable to monitor rock-blasting process. Its relatively low price opens up the possibility of using it for permanent monitoring in situations where this might be necessary.

Keywords: Seismology; Seismograph; Rock Blasting; Vibrations of the Terrain

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo de blocos da arquitetura de hardware de um sismógrafo genérico. 26
Figura 2 - Vista da estrutura interna de um geofone eletromecânico. 28
Figura 3 - Acelerômetro capacitivo do tipo MEMS. Vista macroscópica e de sua estrutura microscópica. 29
Figura 4 - Vista em corte de uma cápsula de microfone dinâmico. 30
Figura 5 - Simbologia de um Amplificador Operacional - AmpOp. 31
Figura 6 - Modos de operação de um AmpOp: a) Sem realimentação, b) Realimentação Positiva e c): Realimentação Negativa 32
Figura 7 - Configuração de um amplificador inversor. 33
Figura 8 - Configuração de um amplificador não inversor. 34
Figura 9 - Curvas de resposta em frequência (Hz) para os filtros tipo: a) Passa-Baixa, b) Passa-Alta, c): Passa-Faixa e d) Rejeita-Faixa. 36
Figura 10 - Associação em cascata de filtros. 37
Figura 11 - Diferentes tipos de aproximação para filtros em 8ª Ordem: a) Butterworth, b) Chebyshev e c) Elíptico ou Cauer.....38
Figura 12 - Circuito de um Filtro Passivo, Passa-Baixa RC de 1ª Ordem. 39
Figura 13 - Circuito de um Filtro Passivo, Passa-Alta RC de 1ª Ordem. 40
Figura 14 - Curva de Resposta em Frequência dos Filtros: a) Passa-Baixa e b) Passa-Alta. 40
Figura 15 - Filtro ativo, passa-baixa, primeira ordem, estrutura VCVS.....41
Figura 16 - Filtro ativo, passa-baixa, segunda ordem, estrutura VCVS. 43
Figura 17 - Filtro ativo, passa-alta, primeira ordem, estrutura VCVS. 44
Figura 18 - Filtro ativo, passa-alta, segunda ordem, estrutura VCVS.....45
Figura 19 - Diagrama de blocos das etapas de conversão Analógica/Digital. 46
Figura 20 - Processo de Amostragem e Retenção, em um sistema A/D.....46
Figura 21 - Amostragem de um sinal analógico respeitando o teorema de Nyquist, após sua reconstrução preservando suas características.....47
Figura 22 - Amostragem de um sinal analógico abaixo da frequência de Nyquist, após sua reconstrução com o efeito de Aliasing. 48
Figura 23 - Sinal original (verde) e quantizado a n níveis (azul). 49

Figura 24 - Sinal analógico quantificado a diferentes níveis. 49
Figura 25 - Sinal quantificado e codificado em um sistema binário. 50
Figura 26 - Estrutura básica interna de um microcontrolador. 51
Figura 27 - Representação da Arquitetura Harvard. 52
Figura 28 - Circuito da fonte de alimentação regulada 5V e 3,3V. 54
Figura 29 - Arranjo tri-axial dos geofones (vertical e horizontais). 57
Figura 30 - Microfone Dinâmico, CAD KBM412. 58
Figura 31 - Circuito dos filtros passa-baixa (destacado em vermelho) e passa-alta (destacado em verde). 60
Figura 32 - Circuito do amplificador inversor com ganho de 60dB (1000 vezes)..... 61
Figura 33 - Circuito do conjunto de conversores A/D para os 4 canais, com comunicação serial SPI. 63
Figura 34 - Placa de Desenvolvimento FRDM-K64F. 65
Figura 35 - Diagrama de blocos da interconexão entre o microcontrolador e os periféricos de hardware do sismógrafo. 65
Figura 36: A - Modelo 3D da placa de circuito impresso; B - Placa de Circuito Impresso montada. 72
Figura 37 - Resposta temporal e espectral do circuito de filtragem analógico..... 73
Figura 38 - Resposta temporal do circuito de amplificação analógico. 74
Figura 39 - Mapa geológico e indicação aproximada dos locais de testes de operação e ensaios de campo. 79
Figura 40 - Registro obtido em testes de operação no interior do Forte D. Pedro II, Caçapava do Sul - RS, fonte sísmica marreta de 3 kg, "ponto de batida" a 4 m de distância dos sensores. 82
Figura 41 - Mina Cerro, DB. Mapa de localização do Centróide de Detonação (CD) e do Centróide de Monitoramento (CM) do evento "Ev.1 - DB". Coordenadas UTM, Fuso 22J. 85
Figura 42 - Mina Cerro, DB. Local de instalação do conjunto sismográfico, detalhe dos geofones fixados à rocha através de gesso e microfone fixado a ~1 m de altura em relação aos geofones. 85
Figura 43 - Jazida Linhares, FIDA. Mapa de localização do Centróide de Detonação (CD) e do Centróide de Monitoramento (CM) do evento "Ev.2 - FIDA". Coordenadas UTM, Fuso 22J. 87

Figura 44 - Jazida Linhares - FIDA. Local de instalação do conjunto sismográfico, detalhe dos geofones enterrados e microfone fixado a ~1 m de altura em relação aos geofones e orientado em direção ao talude. 88
Figura 45 - Boletim Sísmico referente ao monitoramento sismográfico na jazida Linhares - FIDA. 89
Figura 46 – Mina Mangueirão, DB. Mapa de localização dos Centróides de Detonação (CDs) e do Centróide de Monitoramento (CM) dos eventos "Ev.31, 32 e 33 - DB". Coordenadas UTM, Fuso 22J. 90
Figura 47 - Mina Mangueirão - DB. Local de instalação do conjunto sismográfico, detalhe dos geofones fixados à rocha com gesso, microfone fixado a ~1 m de altura em relação aos geofones, e orientado em direção ao ponto comum das três detonações e operador inicializando sismógrafo.....91
Figura 48 - Boletim Sísmico referente ao monitoramento sismográfico "Ev. 31 - DB" na mina Mangueirão - DB. 94
Figura 49 - Boletim Sísmico referente ao monitoramento sismográfico "Ev. 32 - DB" na mina Mangueirão - DB. 95

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Diagrama de Bode - Resposta em frequência dos geofones. 56
Gráfico 2 - Diagrama de Bode - Resposta em frequência do microfone KBM412....58
Gráfico 3 - Curva de Bode - Resposta em frequência do filtro passa-baixa (aliasing) proposto. 69
Gráfico 4 - Diagrama de Fase - Filtro passa-baixa (aliasing). 69
Gráfico 5 - Curva de Bode - Resposta em frequência do filtro Passa-Alta proposto. 70
Gráfico 6 - Diagrama de Fase - Filtro passa-alta.....70
Gráfico 7 - Resultado da simulação do circuito de amplificação com ganho ajustado para 1000 vezes. 71
Gráfico 8 - Média dos valores de cada um dos 4 canais sem ajustes de *offset*. 76
Gráfico 9 - Média dos valores de cada um dos 4 canais com ajustes de *offset*. 77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultado estatístico do ensaio pré-ajuste do sismógrafo. 75
Tabela 2 - Resultado estatístico do ensaio pós-ajuste do sismógrafo. 76
Tabela 3 - Coordenadas e Altitude dos centróides de detonação e monitoramento. UTM - Fuso 22J.....84

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 16

2. OBJETIVOS 18

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 19

3.1 Considerações Gerais 19

3.2 Breve Histórico e Evolução dos Sismógrafos 20

3.3 Arquitetura dos Sismógrafos 25

3.3.1 Sensores 26

3.3.1.1 Geofones 27

3.3.1.2 Acelerômetros 28

3.3.1.3 Transdutor Acústico (Microfone) 29

3.3.2 Amplificadores e Filtros 30

3.3.2.1 Amplificadores 31

3.3.2.2 Filtros 34

3.3.2.2.1 Filtros Passivos 38

3.3.2.2.2 Filtros Ativos 41

3.3.3 Conversores Analógico/Digital 45

3.3.4 Microcontroladores 51

4. MATERIAIS E MÉTODOS 53

4.1 Considerações Gerais 53

4.2 Desenvolvimento do Protótipo 53

4.2.1 Eletrônica Analógica 54

4.2.1.1 Fonte de Alimentação 54

4.2.1.2 Sensores 55

4.2.1.3 Filtros 59

4.2.1.4 Amplificadores 60
4.2.2 Eletrônica Digital 62
4.2.2.1 Conversor Analógico/Digital 62
4.2.2.2 Microcontrolador 63
4.2.2.3 *Firmware* - Software Embarcado 66
5. TESTES E AJUSTES DO SISTEMA 68
5.1. Considerações Gerais 68
5.2. Simulações Computacionais - Circuitos Analógicos 68
5.3. Testes de Laboratório - Circuitos Analógicos 71
5.4. Ajustes da Tensão de Referência - *OFFSET* 74
5.5. Testes do Sistema 77
5.5.1 Geologia Geral 78
5.5.2 Testes de Operação 79
5.5.3 Testes de Campo 83
5.5.3.1 Evento 1 - DB 84
5.5.3.2 Evento 2 - FIDA 86
5.5.3.3 Eventos 31, 32 e 33 - DB 90
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES 96
6.1 Conclusões 96
6.2 Sugestões 98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 99

1. INTRODUÇÃO

Os explosivos são empregados em diversos setores da economia, sendo uma ferramenta imprescindível particularmente para a Engenharia de Minas e Civil. Porém mesmo com a evolução deste composto, desde a pólvora até as modernas e seguras emulsões explosivas, sua utilização envolve riscos consideráveis.

Umas das maneiras de se controlar e mitigar os efeitos causados pelo uso de explosivos, é um plano de fogo bem elaborado. Diante disto, o monitoramento sismográfico faz parte do controle ambiental, fornecendo informações aos especialistas em explosivos, para que os mesmos possam aprimorar o plano de fogo, visando tanto a segurança e a otimização do processo do desmonte de rochas como a proteção de estruturas adjacentes. Porém, devido aos custos elevados dos equipamentos, à burocracia de importação e pela escassez de informações, o monitoramento nem sempre é realizado.

A construção de um sismógrafo de engenharia, dentro das características sugeridas pela "*ISEE* - Sociedade Internacional de Engenheiros de Explosivos", com características similares aos produtos comerciais, que satisfaçam às normas Brasileiras (ABNT NBR:9653, 2005; CETESB DD-052, 2015) e de baixo custo modificariam este cenário, pois promoveria o fácil acesso a este tipo de equipamento e possibilitaria um monitoramento contínuo e de qualidade.

O equipamento proposto neste trabalho tem sua arquitetura baseada no estudo de diferentes sismógrafos utilizados em distintas áreas (exploração,

sismologia, engenharia), com o intuito de combinar as melhores características de cada um, porém seguindo as premissas do guia intitulado "*ISEE Performance Specifications for Blasting Seismographs*" (*ISEE*, 2011).

O equipamento aqui proposto é dividido em duas unidades básicas: Analógica e Digital. A parte analógica contém toda eletrônica responsável por filtrar e amplificar os sinais elétricos oriundos dos sensores ajustando-os para serem digitalizados. Já a parte digital é a responsável por converter os sinais elétricos contínuos no tempo em sinais discretos, processar e armazenar os dados de forma a possibilitar a análise detalhada e para eventuais auditorias.

2. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho consistiram em:

- Projetar e construir um sismógrafo de engenharia de relativo baixo custo para o monitoramento de vibrações e pressão acústica, conforme os padrões exigidos pela ISEE "International Society of Explosives Engineers";
- Realizar testes de laboratório no *hardware* desenvolvido nesta pesquisa, para se certificar que o mesmo está correspondendo conforme sugestões do guia da *ISEE* (2011);
- Realizar testes de campo no intuito de verificar o real funcionamento do equipamento desenvolvido em condições reais de operação;
- Desenvolver procedimentos e materiais para viabilizar e maximizar a qualidade dos dados coletados em campo;
- Proporcionar à comunidade nacional um equipamento de qualidade em nível internacional e com baixo custo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Considerações Gerais

Os compostos explosivos, além de seu conhecido uso para fins bélicos, têm uma grande e importante utilização na construção civil, particularmente na construção de estradas e hidroelétricas, na mineração, atuando no desmonte e cominuição das rochas, na pesquisa petrolífera e em todas as atividades que se beneficiam com este tipo de ferramenta (Valença, 2001).

Segundo a norma regulamentadora NR-19 (MTE, 2011), explosivos são definidos como materiais ou substâncias que ao sofrerem uma rápida decomposição em produtos mais estáveis, liberam grandes quantidades de energia (calor e pressão).

A descoberta acidental da pólvora se deu no século I, na China. A partir do século XIII começa a ser utilizada para fins bélicos e inicia um processo de desenvolvimento até as modernas emulsões explosivas, tornando-as cada vez mais potentes. Nos últimos 100 anos as lesões sérias e as fatalidades ocasionadas pelo uso de explosivos comerciais têm diminuído drasticamente. Isto se deve aos avanços tecnológicos dos explosivos, desenvolvimento de padrões de segurança, fiscalizações mais rigorosas e a mudança dos métodos de mineração (Santis, 2003).

Dados dos últimos 30 anos (1978 a 2010), referentes aos acidentes com explosivos em operações de mineração nos Estados Unidos, foram analisados no intuito de identificar as causas primárias responsáveis por mortes e lesões. O estudo

mostrou que 50% dos acidentes são atribuídos a falta de “Segurança da Área de Explosão”, em segundo lugar com 11.8% vem o “Lançamento de Fragmentos de Rocha”, com 11.5% as “Explosões Prematuras”, em quarto lugar vem a “Falha de Ignição” com 9.3% e por último as fumaças tóxicas com 8.6%, totalizando 90% de todos os tipos de acidentes com explosivos (Verakis & Lobb, 2012).

Atualmente, com a grande demanda por bens minerais e agregados para construção civil, o explosivo é uma alternativa aos métodos de escavação convencionais, quando estes são impraticáveis ou economicamente inviáveis (Dallora & Ferreira, 2006).

Deste modo, o monitoramento sismográfico se faz necessário, pois é uma ferramenta que visa o registro das vibrações e pressão acústica, assim fornecendo aos técnicos responsáveis pelo desmonte de rocha, informações suficientes para que os mesmos possam aperfeiçoar o desmonte, visando atenuar os efeitos deletérios provocados por estes (Koppe et al, 2001).

As metodologias referentes a propagação de ondas sísmicas, monitoramento sismográfico, processamento e interpretação de dados referentes aos eventos de desmonte de rocha utilizando explosivos não serão abordados nesta pesquisa, uma vez que existe uma ampla literatura disponível sobre o assunto, como os trabalhos de Dallora (2004), Abadi e Silva (2005), ISEE (2011 A), S.C IPROMIN S.A. (2011), Koppe (2012), Silva-Castro (2012), entre outros.

3.2 Breve Histórico e Evolução dos Sismógrafos

O histórico e a evolução dos sismógrafos é relativamente pouco documentado, portanto, este capítulo é baseado em grande parte em Reed (2005).

No termo técnico, sismógrafo refere-se ao conjunto de equipamentos (sismômetro e registrador) utilizados para registrar eventos sísmicos. O sismômetro (geofones) é o dispositivo sensor responsável por detectar o movimento das ondas sísmicas. (Shearer, 2009).

Apesar de haver referências sobre a utilização de sismógrafos antes do século XX, somente por volta dos anos de 1920 é que os sismógrafos específicos para engenharia começaram a ser desenvolvidos. O primeiro sismógrafo foi desenvolvido e construído em 1927 por Edward Rockwell, e o seu funcionamento baseava-se na quantidade de energia cinética necessária para derrubar pinos metálicos de diferentes tamanhos (Reed, 2005).

Com os avanços no campo da eletrônica, surge o primeiro sismógrafo analógico, desenvolvido por L. Don Leet da Universidade de Harvard (Leet, 1945). O aparato utilizava um conjunto de três sismômetros (geofones) arranjados ortogonalmente. Agulhas eletromecânicas (galvanômetros), dotadas de espelhos e acopladas em cada um dos sensores, vibravam conforme as diferentes correntes geradas, onde refletiam uma luz sobre um papel foto-sensível, desta forma, criando um deslocamento na forma de onda registrada. Porém o mesmo não possuía um sistema de disparo (*trigger*) automático, sendo que o operador era o responsável por disparar o equipamento. O uso mais notável deste equipamento aconteceu em 1945 durante o primeiro teste da bomba atômica, no deserto do Novo México, Estados Unidos (Reed, 2005).

Mais tarde, na década de 1960 *Sprengnether* fabricou o primeiro sismógrafo de velocidade de partícula, nomeado de SSU I. O mesmo possuía 3 geofones e um microfone para registrar a sobre pressão acústica. Este sismógrafo utilizava papel sensível à luz e não possuía sistema de *trigger* automático, fazendo com que o papel terminasse rapidamente, caso o operador iniciasse o registro com muita antecedência em relação ao evento (Reed, 2005).

Após a publicação do "*USBM Bulletin 656, Blasting Vibrations and Their Effects on Structures"* em 1972 (Reed, 2005), diversos estados norte americanos começaram a desenvolver regulamentações baseadas nas medidas de vibração, utilizando como unidade a velocidade de partícula. Logo sismógrafos utilizando fitas magnéticas para o registro começaram a aparecer, onde as formas de ondas eram registradas nestas fitas e posteriormente eram passadas para os papéis sensíveis. Uma das maiores vantagens neste sistema era a possibilidade de registrar 30 minutos de eventos, tempo este, diversas vezes maior que os conseguidos com os sismógrafos da *Sprengnether.*

A empresa *Dallas Instruments* fabricou diversos modelos de sismógrafos, porém, nenhum deles possuía um sistema de disparo (*trigger*) e ganho automático. Desta maneira o operador deveria estimar a amplitude da velocidade de partícula e configurar os níveis de amplificação e registro, porém se o valor configurado fosse muito baixo os picos do sismograma seriam cortados do registro (saturação) e, caso o nível configurado fosse alto, a forma de onda seria comprimida impossibilitando a leitura do registro (Reed, 2005).

A empresa *ETI* também fabricou sismógrafos de fita cassete, chamado de Vibra-Tape; este possuía dois medidores analógicos que proviam as leituras da velocidade de partícula e de pressão acústica (Reed, 2005).

Tempos depois a empresa *Dallas Instruments* desenvolveu o *ST-4*, considerado o primeiro sismógrafo de fita cassete com sistema de disparo (*Trigger*) automático. Também foi adicionado um código binário, que era inserido em cada um dos registros, possibilitando a extração de informações como hora e data do evento, quando a fita fosse reproduzida. Outra inovação tecnológica apresentada neste equipamento foi a inserção de um display LCD que permitia o operador visualizar os valores da velocidade de pico das partículas e de pressão acústica (Reed, 2005).

No início da década de 1980, pesquisadores do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT desenvolveram um sismógrafo de engenharia denominado “Analisador digital de velocidade de partículas – ADVP” (Taioli e Palm, 1981). Tratava-se de um sismógrafo que guardava a maior amplitude de sinal de vibração registrado em cada um dos três canais e apresentava este resultado em um display de LED. Utilizava acelerômetros triaxiais especialmente desenvolvidos como sensores de vibração. Caso necessário, a conversão do resultado em velocidade de partícula, este era obtido através de uma tabela já calculada. Esse instrumento não possuía, no entanto, medidor de pressão acústica e, portanto, era utilizado em áreas onde esse parâmetro não era importante. Foi utilizado pelo próprio IPT por cerca de uma década em inúmeras obras de infraestrutura e minerações em todo o Brasil (Taioli, 2016).

Os sismógrafos de fita cassete foram o padrão da indústria por cerca de 20 anos. Com os avanços tecnológicos, aumento na demanda por habitações, obras de infraestrutura particularmente em áreas urbanas, maior demanda por recursos energéticos (principalmente óleo e gás) e juntamente com o clamor público, mudanças ocorreram nas indústrias de desmonte e sismografia.

Em meados de 1984, a empresa *ETI* introduziu o primeiro sismógrafo digital chamado de "*Everlert Vibra-Tape 5000*", onde os registros eram salvos digitalmente em fitas magnéticas que permitiam futuras análises em computadores. Em 1985, a empresa Nomis desenvolveu o primeiro sismógrafo equipado com uma impressora, conhecido como "*SSU 1000D*", onde os dados da velocidade de partícula, sobre pressão acústica, frequência, forma de onda e outras informações do levantamento, podiam ser impressos em menos de 10 minutos após o processo de desmonte e no próprio local do ensaio (Reed, 2005).

No final dos anos 80, novamente a *ETI* introduziu inovações tecnológicas no mundo dos sismógrafos de engenharia, desta vez lançando o sismógrafo "Everlert II" que possuía um sistema de armazenamento baseado em disquetes de computadores e um display LCD gráfico que possibilitava a visualização da forma de onda logo após o ensaio (Reed, 2005).

Com o advento dos computadores pessoais ainda na década de 80, outra grande empresa começou a desenvolver sismógrafos. A *Instantel* produziu o MultiSeis V, que possuía memória interna em substituição aos disquetes e possibilitava análises em softwares baseados no sistema operacional *MSDOS*®. No

início dos anos 90 a *GeoSonics* entrou no negócio de fabricação de sismógrafos com seu "*SSU 2000DK*" (Reed, 2005).

Nos anos seguintes sismógrafos menores e de menor custo foram desenvolvidos para suprir as necessidades das indústrias de desmonte, onde a *GeoSonics* desenvolveu o *MicroSeis* e a *Instantel* o *MiniMate*, equipamentos estes que não possuem impressoras e os dados são armazenados internamente (Reed, 2005).

Posteriormente, com o avanço da tecnologia, os sismógrafos de monitoramento de desmonte sofreram diversas modificações, como a troca dos disquetes por memórias internas, impressoras mais rápidas, softwares de processamento mais amigáveis e rápidos, microfones com sensibilidade entre 2 a 250Hz, conectividade possibilitando o acesso remoto ao instrumento, entre outros (Reed, 2005).

3.3 Arquitetura dos Sismógrafos

A arquitetura de um equipamento define o conjunto de características de *hardware* e *software* empregados, com o intuito de executar uma ou várias tarefas específicas.

Se, por um lado, a literatura a respeito do monitoramento sismográfico é abundante, o mesmo não pode ser dito a respeito da arquitetura dos sismógrafos. Mesmo atualmente, com o movimento "*OpenSource Hardware*", que busca a

disponibilização irrestrita de informações sobre um projeto de *hardware*, é quase impossível se encontrar informações técnicas a respeito da arquitetura de tais equipamentos, pois os fabricantes procuram resguardar a tecnologia utilizada, no intuito de obter vantagens comerciais em relação às empresas concorrentes

Através de uma análise detalhada das poucas bibliografias encontradas, como os trabalhos de Taioli (1992), Havskov & Alguacil (2002), Marchioreto (2002), Eltschlager (2003), Ranger (2003), Hutchison et al (2005), Utheim & Casanova (2006) e Coronato (2007) e através de um processo de engenharia reversa de diferentes tipos de sismógrafos, foi possível constatar uma similaridade entre os mesmos. Na Figura 1 é apresentado um modelo de blocos genérico da arquitetura de hardware comum a todos os sismógrafos analisados. Esta arquitetura básica coincide com a proposta por Evenden & Stone (1976).

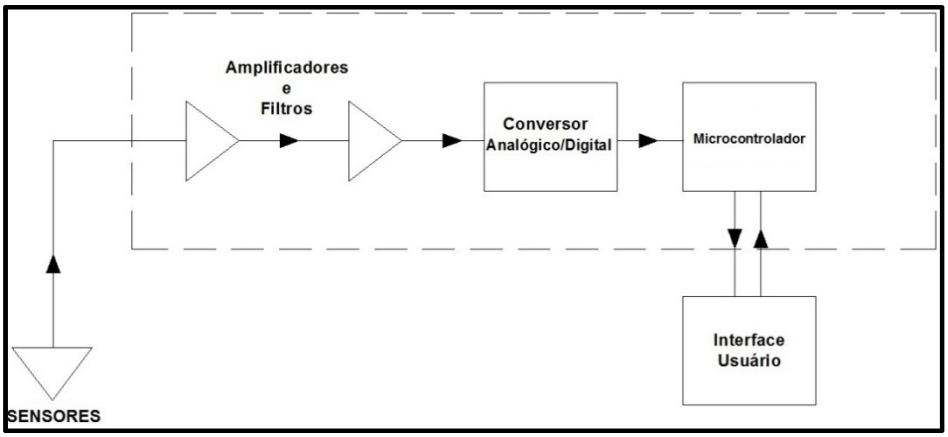


Figura 1 - Modelo de blocos da arquitetura de hardware de um sismógrafo genérico.

3.3.1 Sensores

As grandezas físicas presentes no mundo real raramente são de natureza elétrica, deste modo, se faz necessário a transformação destas por meio de sensores e/ou transdutores, os quais são responsáveis por converter tais grandezas

(deslocamento, velocidade, aceleração, pressão, temperatura, entre outros) em sinais elétricos (Puhlmann, 2015).

Atualmente, três são os tipos de sensores (geofones, acelerômetros e transdutores acústicos) utilizados em um sismógrafo de engenharia, os quais são empregados principalmente em operações que façam o uso de explosivos.

3.3.1.1 Geofones

Conforme Holden (2014), os geofones são dispositivos que detectam vibrações, convertendo-as em um sinal elétrico. O geofone eletromagnético é constituído por um sistema massa-mola, onde uma bobina móvel é suspensa por molas em torno de um núcleo magnético fixo à estrutura (Figura 2). O seu funcionamento baseia-se na indução eletromagnética de acordo com a lei de *Faraday-Neumann-Lenz,* onde o deslocamento do imã em relação à massa de prova (bobina) induz uma corrente elétrica, sendo esta, diretamente proporcional à velocidade de oscilação da bobina. Deste modo, a tensão elétrica (Volts) presente nos terminais de um geofone é igual ao produto da sensibilidade pela velocidade de oscilação da massa de prova (bobina). Sendo que a sensibilidade é governada pelo número de espiras da bobina e pela força do campo magnético do imã. Já a frequência de resposta é dada em função das constantes elásticas das molas e da massa da bobina (Taioli, 1992; Hons, 2008).

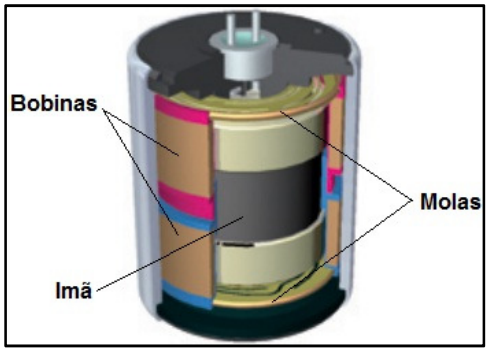


Figura 2 - Vista da estrutura interna de um geofone eletromecânico.
(Modificado de: ION Product).

3.3.1.2 Acelerômetros

Os acelerômetros são dispositivos capazes de medir a aceleração através de medidas do deslocamento de sua massa de prova, por meio de diferentes mecanismos de transdução (Capacitivo, Piezoelétrico, entre outros).

Os acelerômetros do tipo piezoelétrico, são constituídos de um cristal piezoelétrico ou uma cerâmica piezoelétrica e de uma massa de reação. Toda vez que este conjunto for excitado mecanicamente, uma corrente elétrica é gerada nos terminais do cristal. A frequência de resposta deste tipo de sensor é inversamente proporcional às massas do cristal e de reação, sendo que, quanto menor forem as massas, maior será a frequência de ressonância, enquanto a amplitude do sinal é diretamente proporcional às massas (Taioli, 1992).

Já os acelerômetros do tipo capacitivo são formados por uma massa de prova móvel, suspensa por molas entre duas placas de um capacitor, sendo estas separadas por um pequeno espaço, normalmente preenchido com ar. O conjunto, ao ser acelerado, sai de sua posição de repouso alterando a capacitância do conjunto massa de prova/placa, sendo que esta variação é medida por um circuito elétrico,

onde a tensão de saída é relativa à aceleração. A sensibilidade deste tipo de acelerômetro é proporcional ao tamanho da massa de prova e da capacitância da área de sobreposição e é inversamente proporcional à constante da mola. Normalmente este tipo de acelerômetro é montado em sistemas microeletromecânicos (Figura 3) ou MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems), sistema este adaptado da indústria de circuitos integrados (Yazdi et al., 1998; Teves, 2013;).

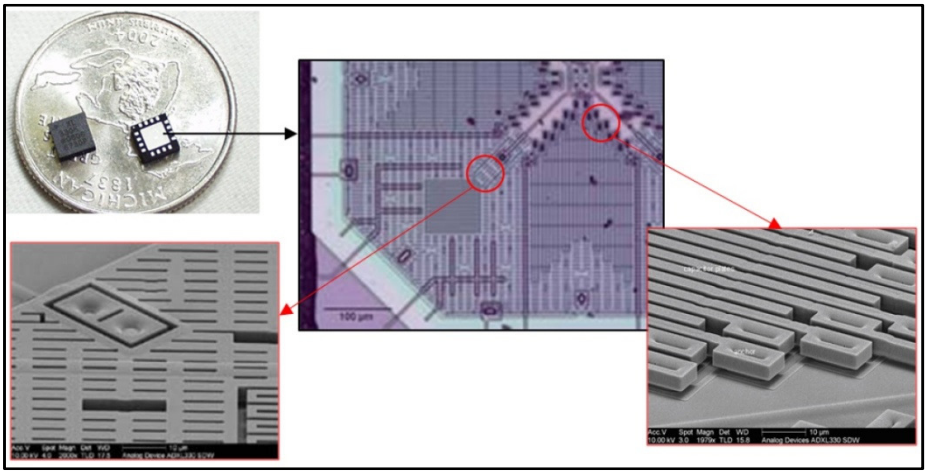


Figura 3 - Acelerômetro capacitivo do tipo MEMS. Vista macroscópica e de sua estrutura microscópica.
(Modificado de: Teves, 2013).

3.3.1.3 Transdutor Acústico (Microfone)

O microfone é um transdutor composto por uma membrana que vibra em resposta a uma pressão sonora incidente, deste modo, convertendo-a em um sinal elétrico, onde a tensão de saída é proporcional ao movimento do elemento sensor (León, 2009).

Os microfones são implementados de diferentes formas, de acordo com o tipo do elemento sensor, tais como: dinâmico, eletreto, piezoelétrico, entre outros.

Os microfones do tipo dinâmico (Figura 4) são os que possuem as características mais próximas à de um geofone, onde uma membrana é conectada diretamente a uma bobina, a qual é centrada em um campo magnético (imã), deste modo, quando as ondas sonoras atingem a membrana, a bobina movimenta-se no campo magnético, induzindo uma corrente em seus terminais, a qual é diretamente proporcional à pressão sonora. Já os microfones do tipo piezoelétrico, a membrana é colocada sobre um cristal piezoelétrico, a qual gera uma corrente elétrica quando submetido a uma tensão mecânica, isto ocorre quando as ondas sonoras no ar imprimem forças sobre a membrana. Os microfones de eletreto são formados por duas placas, uma fixa e outra muito fina e móvel que funciona como uma membrana. Uma onda sonora ao incidir sobre esta membrana movimenta-a alterando a capacitância e a corrente no circuito. A polarização é obtida por meio de um material quase permanentemente carregado no dipolo do capacitor, o eletreto (De Oliveira, 2010).

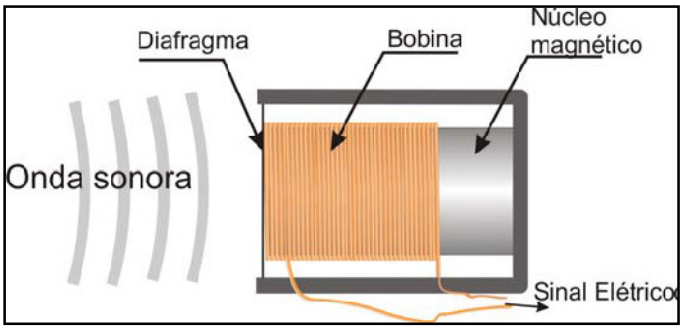


Figura 4 - Vista em corte de uma cápsula de microfone dinâmico.
(De Oliveira, 2010).

3.3.2 Amplificadores e Filtros

Os sinais provenientes dos sensores (geofones, microfones, entre outros) na maioria das vezes são multi-frequenciais e de baixa amplitude, desta forma, se faz

necessário a adequação destes sinais por meio da amplificação e filtragem, antes que os mesmos possam passar pelo processo de digitalização pelo sistema de conversão analógica/digital.

3.3.2.1 Amplificadores

Conforme Da Silva Jr (2013), os amplificadores, em geral, são circuitos capazes de aumentar em amplitude uma determinada grandeza, seja ela tensão ou corrente.

Na década de 1940 foi introduzido o amplificador operacional (AmpOp), visando inicialmente a implementação de operações matemáticas. O AmpOp é um amplificador multiestágio, com entrada diferencial, alta impedância de entrada, baixa impedância de saída, ganho (A) elevado e ampla resposta em frequência (BW). Na Figura 5 é apresentada a simbologia de um AmpOp (Klimach, 2012).

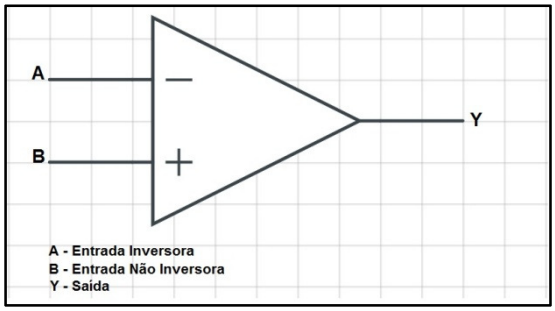


Figura 5 - Simbologia de um Amplificador Operacional - AmpOp.
(Modificado de: Pertence Jr, 2015).

Basicamente os AmpOp possuem três modos de operação: sem realimentação, realimentação positiva e realimentação negativa, conforme os arranjos apresentados na Figura 6 (Pertence Jr, 2015).

- **Sem realimentação:** Também denominado de operação em malha aberta, o ganho é definido pelo fabricante, ou seja, sem a

possibilidade de controle sobre o mesmo. Este modo de operação é empregado quando se utiliza em circuitos comparadores de tensão;

- **Realimentação Positiva:** Operação em malha fechada, não funciona como amplificador, pois sua resposta não é linear e possui o inconveniente de acarretar instabilidades no circuito. Este modo de operação é empregado quando se utiliza em circuitos osciladores.
- **Realimentação Negativa:** Operação em malha fechada, resposta linear, ganho de tensão controlado pelo projetista. Este modo de operação é empregado em diversos circuitos, tais como: amplificador inversor, amplificador não inversor, filtros ativos, entre outros.

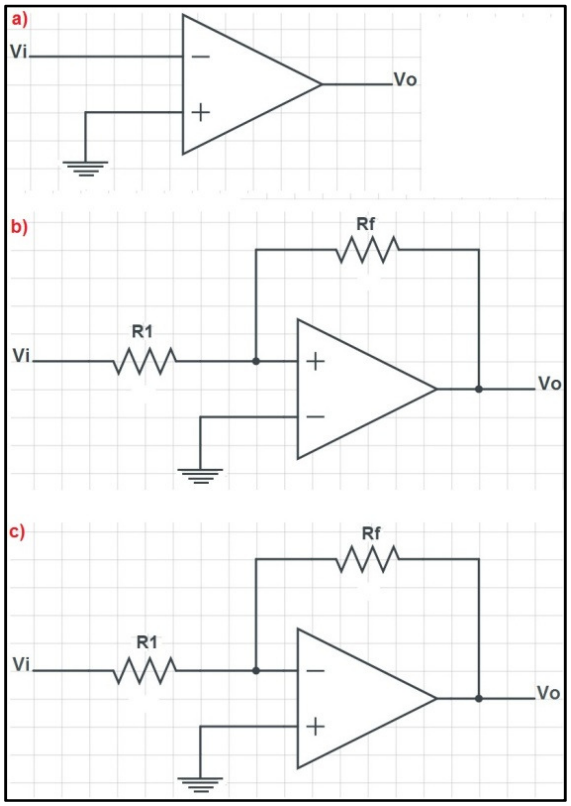


Figura 6 - Modos de operação de um AmpOp: a) Sem realimentação, b) Realimentação Positiva e c): Realimentação Negativa
(Modificado de: Pertence Jr, 2015).

As aplicações de um amplificador operacional são inúmeras, porém, no presente trabalho, serão somente abordados os usos do AmpOp como amplificador inversor, não inversor, e filtros ativos.

O amplificador inversor tem essa denominação, pois o sinal de saída estará 180º defasado em relação ao sinal de entrada. Na Figura 7 é apresentada a configuração padrão de um amplificador inversor. Como este tipo de implementação é feita sob o modo de realimentação negativa, o ganho (A) de tensão pode ser controlado por:

$$A = -\frac{Rf}{R1} \tag{1}$$

onde Rf é a resistência de realimentação e R1 a de entrada.

Uma das desvantagens deste tipo de implementação, é que a impedância de entrada do circuito amplificador é determinada única e exclusivamente pelo valor do resistor R1.

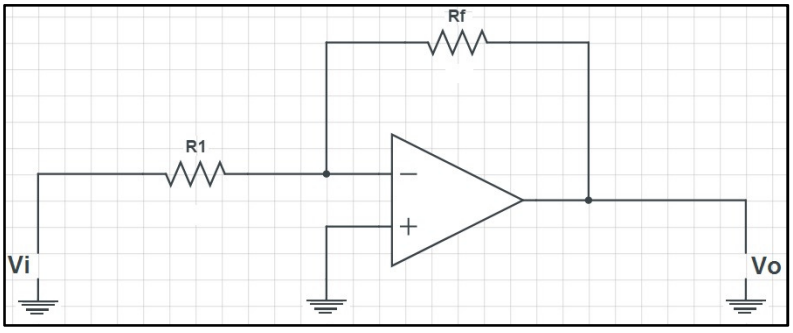


Figura 7 - Configuração de um amplificador inversor.
(Modificado de: Pertence Jr, 2015).

Já o amplificador não inversor (Figura 8), não apresenta defasagem no sinal de saída e possui alta impedância de entrada. Como este tipo de implementação também se utiliza do modo em malha fechada com realimentação negativa, seu ganho (A) também pode ser controlado por:

$$A = 1 + \frac{Rf}{R1} \tag{2}$$

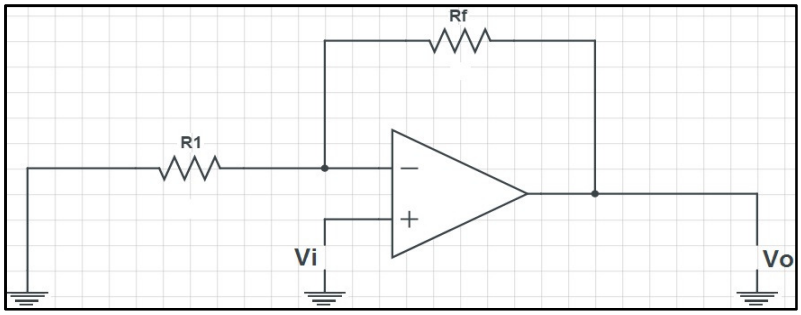


Figura 8 - Configuração de um amplificador não inversor.
(Modificado de: Pertence Jr, 2015).

No intuito de se obter ganhos maiores é possível realizar a associação em cascata de diferentes estágios, com ganhos diferentes (seguidor de tensão, amplificador não inversor e amplificador inversor com R1 de alto valor), porém os mesmos devem possuir uma alta impedância de entrada, de modo a não servir de carga ao estágio anterior, o que comprometeria a amplitude do sinal a ser medido. O ganho (A) neste tipo de associação é dado por:

$$A = \frac{Vo1}{Vi} X \ldots X \frac{Vo}{Vo_{(n-1)}} \tag{3}$$

onde n é o número de estágios, Vo é a tensão de saída e Vi é a tensão de entrada.

Em decibéis temos:

$$A(dB) = A(dB)_1 + \cdots + A(dB)_n \tag{4}$$

No entanto, neste tipo de implementação em cascata não interagente, ocorre o fenômeno de estreitamento da largura de faixa de frequência $(BW)_n$, (Pertence Jr, 2015).

$$(BW)_n = (BW)\sqrt{2^{1/n} - 1} \tag{5}$$

onde BW é a largura da faixa de cada estágio e n é o número de estágios idênticos.

3.3.2.2 Filtros

Por definição, um filtro elétrico é um quadripolo capaz de atenuar determinadas frequências do espectro do sinal de entrada e permitir a passagem das demais frequências do sinal (Pertence Jr, 2015).

Os filtros são subdivididos quanto à tecnologia empregada, tais como:

- **Filtros Passivos:** São construídos através da utilização de elementos passivos, ou seja, resistores, capacitores e indutores;
- **Filtros Ativos:** Além de empregarem elementos passivos, usam elementos ativos como válvulas, transistores e atualmente em sua maioria amplificadores operacionais (AmpOp);
- **Filtros Digitais:** São implementados empregando tecnologia digital de microprocessadores e/ou microcontroladores, através da programação destes.

Os filtros também são divididos quanto à função executada, onde consideramos os quatro principais:

- **Passa-Baixa (PB):** Permite a passagem somente de frequências, abaixo de uma frequência de corte (fc), onde as frequências acima desta serão atenuadas (Figura 9a).
- **Passa-Alta (PA):** Permite a passagem somente de frequências, acima de uma frequência de corte (fc), onde as frequências abaixo desta serão atenuadas (Figura 9b).
- **Passa-Faixa (PF):**Também chamados de Passa-Banda (PB), permite somente a passagem de frequências situadas numa faixa entre uma frequência de corte inferior (fc1) e outra superior (fc2), onde as frequências situadas abaixo da frequência de corte inferior ou acima da frequência de corte superior serão atenuadas (Figura 9c).
- **Rejeita-Faixa (RF):** Permite somente a passagem de frequências situadas abaixo de uma frequência de corte inferior (fc1) ou acima de uma frequência de corte superior (fc2), sendo que a faixa de

frequências delimitadas por fc1 e fc2 serão atenuadas, conforme a Figura 9d (Mussoi, 2004; Pertence Jr, 2015).

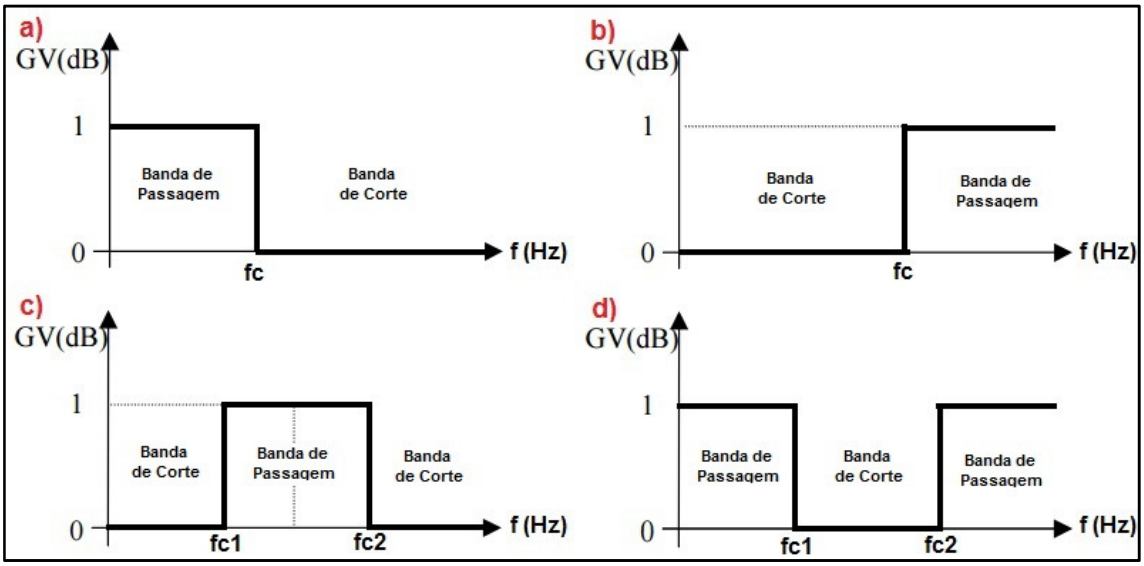


Figura 9 - Curvas de resposta em frequência (Hz) para os filtros tipo: a) Passa-Baixa, b) Passa-Alta, c): Passa-Faixa e d) Rejeita-Faixa.
(Modificado de: Mussoi, 2004).

Vale ressaltar que na prática é impossível obter um filtro ideal. Desta maneira os filtros reais possuem transições entre as bandas de passagem e de corte mais suaves. Assim para se obter respostas mais próximas à de um filtro ideal, são implementados filtros de maior complexidade (ordem). Em termos físicos a ordem de um filtro é dada pelo número de redes de atraso presentes em sua estrutura.

A associação em cascata nos permite obter filtros de ordem superior à segunda, onde um filtro passa-baixa ou passa-alta de sexta ordem é obtido através da associação de três estágios de segunda ordem, já um filtro de quinta ordem (ordem ímpar), pode ser obtido através da associação de dois estágios de segunda ordem e mais um estágio de primeira ordem (Figura 10). Os filtros de ordem ímpar possuem melhor resposta quando o estágio de primeira ordem é colocado como o último estágio. Outro ponto importante é quanto ao ganho da associação em

cascata, pois o mesmo é dado pelo produto dos ganhos, deste modo, é necessário distribuir o ganho total entre os estágios (Pertence Jr, 2015; Simas, 2014).

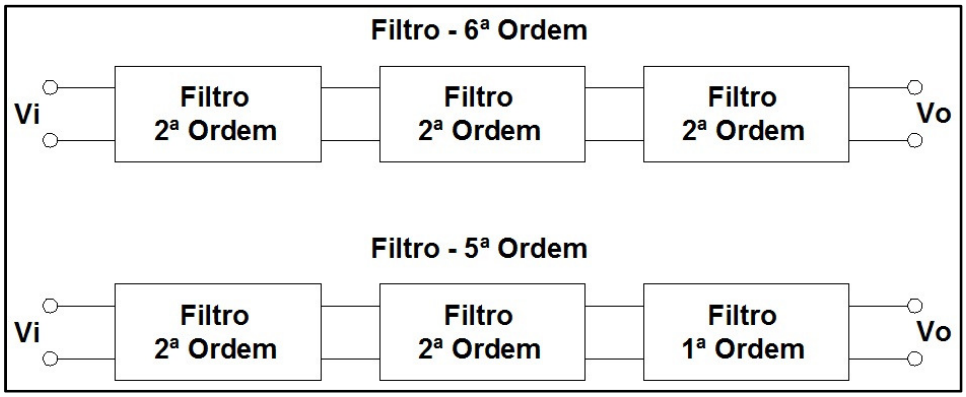


Figura 10 - Associação em cascata de filtros.
(Modificado de: Pertence Jr, 2015).

De acordo com Klimach et al (2014), existem diversas funções no domínio da frequência (Laplace) que podem ser usadas para implementar um filtro. Assim filtros podem ser classificados pela forma de síntese ou aproximação. Os tipos mais comuns de aproximação, são:

- **Butterworth:** Resposta plana, apresentando máxima planura na banda passante, monotonicamente decrescente na banda de rejeição. Sendo que próximo à frequência de corte, a resposta não é muito boa em implementações de baixa ordem (Figura 11a);
- **Chebyshev:** Apresenta ondulações (*ripples*) na banda passante, porém com resposta melhor em termos de frequência de corte, ou seja, possuí uma rampa de atenuação mais aguda se comparada a um filtro de mesma ordem do tipo Butterworth (Figura 11b);
- **Elíptico (Cauer):** Apresenta ondulações (*ripples*), tanto na banda passante como na de rejeição. Porém é o filtro que apresenta a melhor definição em termos de frequência de corte, possuindo uma faixa de transição bastante estreita como demonstrado na Figura 11c (Klimach et al, 2014; Pertence Jr, 2015)

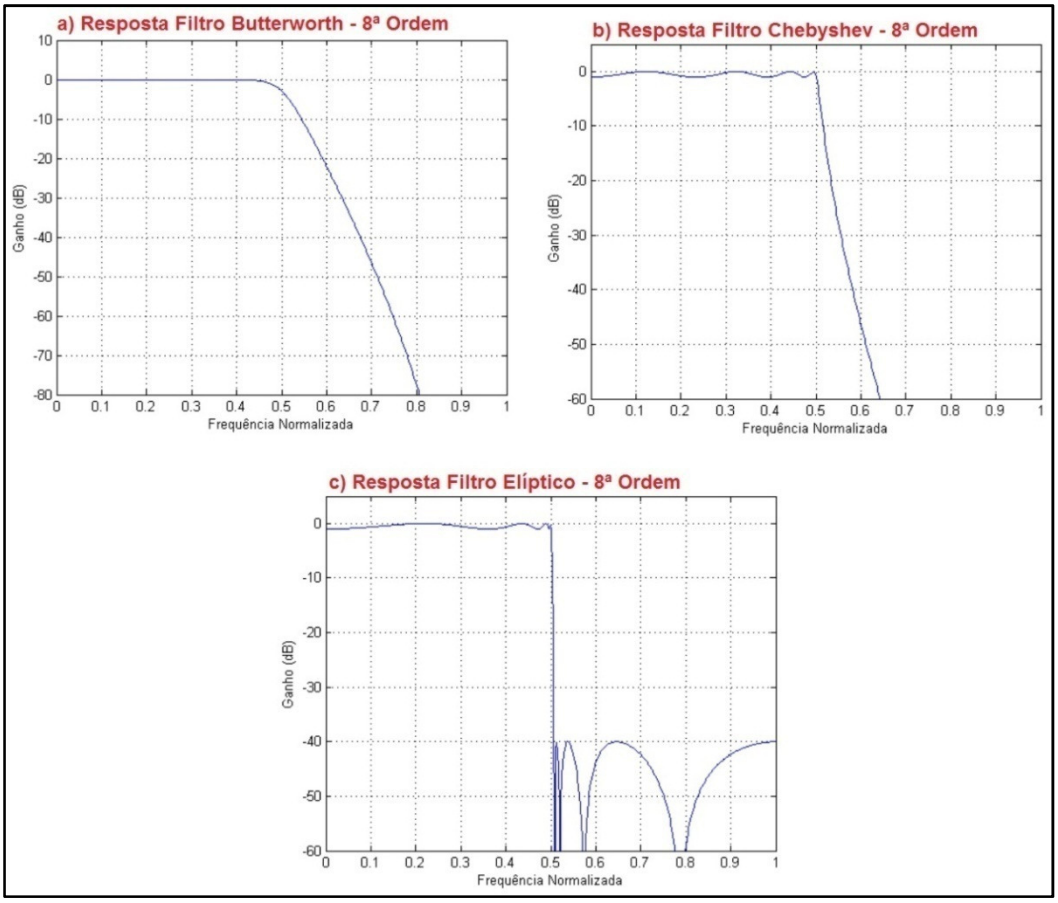


Figura 11 - Diferentes tipos de aproximação para filtros em 8ª Ordem: a) Butterworth, b) Chebyshev e c) Elíptico ou Cauer.
(Modificado de: De Oliveira, 2011).

Como neste trabalho serão empregados somente os filtros do tipo Passa-Alta e Passa-Baixa, apenas estes serão discutidos a seguir.

3.3.2.2.1 Filtros Passivos

Como citado anteriormente, os filtros passivos são compostos somente por elementos passivos (resistores, capacitores e indutores). Neste tipo de implementação, o ganho (A) é geralmente menor ou igual a 1, com algumas exceções.

Um circuito RC (Resistor-Capacitor), como demonstrado na Figura 12, pode se comportar como um filtro passa-baixa de primeira ordem em que para sinais de baixa frequência o capacitor apresenta alta reatância (oposição a passagem de uma corrente alternada), deste modo, comportando-se como um circuito aberto, onde a maior parcela da tensão de entrada estará sobre este, assim permitindo a passagem somente de sinais de baixa frequência. Já para os sinais de alta frequência o capacitor apresenta baixa reatância, tendendo a um comportamento de curto-circuito, onde a maior parcela da tensão de entrada estará sobre o resistor, deste modo, impedindo a passagem de sinais de alta frequência.

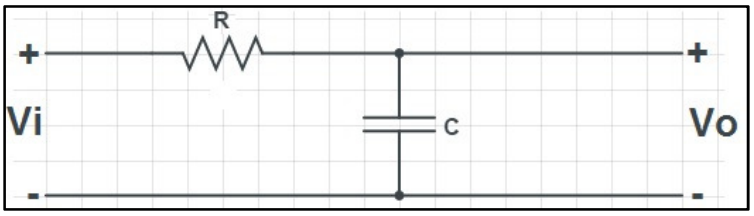


Figura 12 - Circuito de um Filtro Passivo, Passa-Baixa RC de 1ª Ordem.
(Modificado de: Mussoi, 2004)

Já em um circuito RC, como demonstrado na Figura 13, este pode se comportar como um filtro passa-alta de primeira ordem. Sendo que o capacitor apresenta baixa reatância (oposição a passagem de uma corrente alternada) para sinais de alta frequência comportando-se como um curto-circuito, onde a maior parcela de tensão de entrada estará sobre o resistor, deixando passar os sinais de alta frequência. Enquanto para os sinais de baixa frequência, o capacitor tende a se comportar como um circuito aberto, assim a maior parcela de tensão de entrada estará sobre o capacitor e somente uma pequena parcela estará sobre o resistor, assim impedindo a passagem de sinais de baixa frequência.

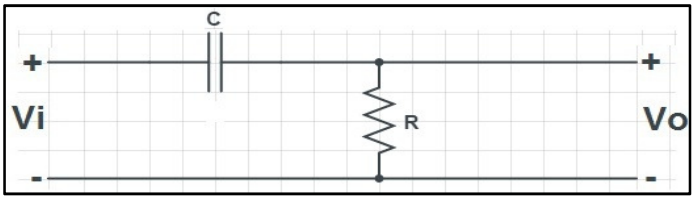


Figura 13 - Circuito de um Filtro Passivo, Passa-Alta RC de 1ª Ordem.
(Modificado de: Mussoi, 2004).

A frequência de corte (f_c) para ambos os tipos de filtro, pode ser dada por:

$$\omega_c = \frac{1}{RC} \quad ou \quad f_c = \frac{1}{2\pi RC} \tag{6}$$

onde$R$ é a resistência em Ohms e C é a capacitância em Farads.

A taxa de atenuação dos filtros passivos passa-baixa e passa-alta é de 20dB/década (6 dB/oitava) da frequência do sinal de entrada (Figura 14). O sinal de saída destes circuitos possui uma defasagem em relação ao sinal de entrada, onde para o filtro passa-baixa é de -45º na frequência de corte, tendendo a -90º a frequências infinitas, enquanto no filtro passa-alta estes valores são positivos (Mussoi, 2004).

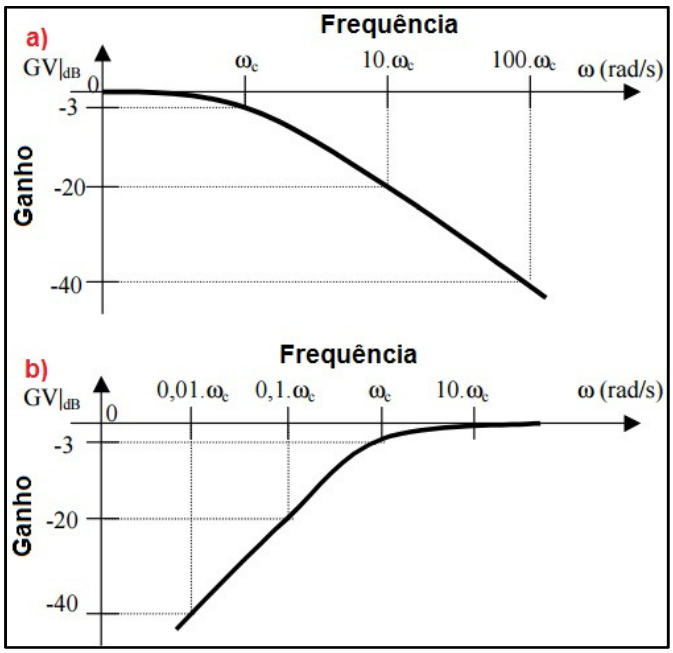


Figura 14 - Curva de Resposta em Frequência dos Filtros: a) Passa-Baixa e b) Passa-Alta.
(Modificado de: Mussoi, 2004).

3.3.2.2.2 Filtros Ativos

Ao contrário dos filtros passivos, os filtros ativos além de empregarem elementos passivos, também empregam elementos ativos como, válvulas, transistores e os amplificadores operacionais (AmpOp).

A implementação de um filtro ativo pode ser realizada por meio de diferentes estruturas existentes, porém neste trabalho será abordada somente a estrutura do tipo “fonte de tensão controlada por tensão”, também conhecida por “*Sallen - Key*” ou VCVS (*Voltage-controlled voltage source*). Este tipo de estrutura possui algumas vantagens, tais como: baixa impedância de saída, ajuste fácil de ganho e frequência e a necessidade de poucos componentes externos.

Como citado anteriormente, a obtenção de filtros superiores a segunda ordem é possível através da associação em cascata de diversos estágios, porém filtros de primeira ordem só serão utilizados quando for necessária a implementação de um filtro de ordem ímpar ≥ a 3.

Um filtro de primeira ordem, passa-baixa, utilizando a estrutura VCVS é implementado conforme a Figura 15.

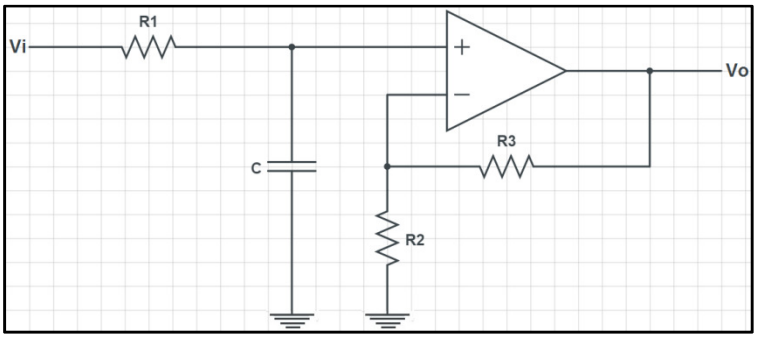


Figura 15 - Filtro ativo, passa-baixa, primeira ordem, estrutura VCVS.
(Modificado de: Pertence Jr, 2015).

O ganho (A) deste circuito é dado por:

$$A = 1 + \frac{R_3}{R_2} \tag{7}$$

A frequência de corte pode ser relacionada a R1, através da seguinte fórmula:

$$R_1 = \frac{1}{b\omega_c C} \tag{8}$$

onde b é uma constante que irá determinar o tipo de aproximação para filtros de ordem impar ≥ 3, C é a capacitância em *farad* e ω_c é a frequência de corte em rad/s.

O valor de C pode ser encontrado por meio de uma regra empírica para projetos de filtros ativos, onde se estabelece para o capacitor um valor comercial em torno de 10/fc, onde, fc (frequência de corte) é dado em Hertz, deste modo se obtêm C em microfarad.

Os valores de R2 e R3 podem ser calculados através das seguintes fórmulas, porém nota-se que se o ganho (A) for igual a 1, R2 pode ser aberto e R3 substituído por um curto.

$$R_2 = \frac{A}{A-1} R_1 \tag{9}$$

$$R_3 = AR_1 \tag{10}$$

Já um filtro ativo, passa-baixa de segunda ordem, pode ser implementado utilizando a estrutura VCVS como indicado na Figura 16.

Neste caso, o ganho (A) é dado por:

$$A = 1 + \frac{R_4}{R_3} \tag{11}$$

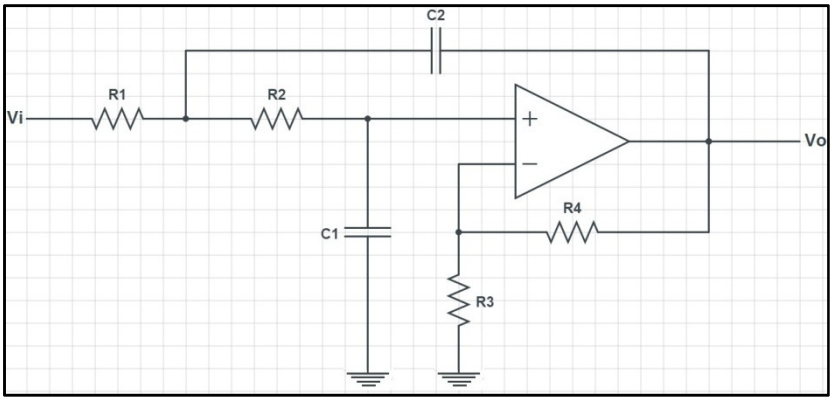


Figura 16 - Filtro ativo, passa-baixa, segunda ordem, estrutura VCVS.
(Modificado de: Pertence Jr, 2015).

Onde os valores de R1 e R2 podem ser encontrados pelas seguintes equações:

$$R_1 = \frac{2}{aC_2 + \sqrt{[a^2 + 4b(A-1)C_2^2 - 4bC_1C_2]\omega_c}} \tag{12}$$

$$R_2 = \frac{1}{bC_1C_2R_1\omega_c^2} \tag{13}$$

onde a e b, são os parâmetros obtidos de tabelas disponíveis na literatura, pois definem o tipo de aproximação (Butterworth, Chebyshev, entre outros) desejada.

Já os valores de R3 e R4, são dados por:

$$R_3 = \frac{A(R_1+R_2)}{A-1} \tag{14}$$

$$R_4 = A(R_1 + R_2), \tag{15}$$

porém se o ganho (A) for igual a 1, R3 deverá ser aberto e R4 será um curto.

O valor comercial de C_2 pode ser encontrado próximo de 10/fc, onde, fc é a frequência de corte do filtro, por meio deste pode-se determinar o máximo valor comercial de C_1, que atenda a seguinte condição:

$$C_1 \leq \frac{[a^2+4b(A-1)]C_2}{4b} \tag{16}$$

A implementação de filtros ativos, passa-alta, utilizando a estrutura VCVS é muito próxima à implementação de filtros passa-baixa. A Figura 17, mostra a implementação de um filtro passa-alta de primeira ordem.

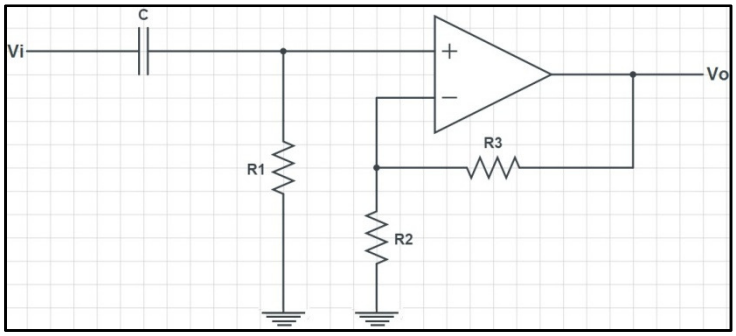


Figura 17 - Filtro ativo, passa-alta, primeira ordem, estrutura VCVS.
(Modificado de: Pertence Jr, 2015).

Da mesma maneira que no filtro passa-baixa de primeira ordem, o ganho (A) deste filtro é dado pela equação (7). Já o valor de R1 pode ser encontrado por:

$$R_1 = \frac{b}{\omega_c C} \tag{17}$$

Onde os valores de R2 e R3, são obtidos também pelas fórmulas (9) e (10) respectivamente, e caso o ganho (A) for igual a 1, R2 deverá ser aberto e R3 será colocado em curto.O valor de C é estimado empiricamente pela relação de 10/fc, onde, fc (frequência de corte) é em Hertz, deste modo, C é dado em microfarad.

A Figura 18 apresenta a implementação VCVS, de um filtro ativo, passa-alta de segunda ordem. O ganho deste filtro pode ser encontrado por meio da equação (11), já os valores de R1, R2, R3 e R4 são dados pelas seguintes equações:

$$R_1 = \frac{4b}{\left[a+\sqrt{a^2+8b(A-1)}\right]\omega_c C} \tag{18}$$

$$R_2 = \frac{b}{\omega_c^2 C^2 R_1} \tag{19}$$

$$R_3 = \frac{AR_1}{A-1} \tag{20}$$

$$R_4 = AR_1 \tag{21}$$

Da mesma maneira que nas outras implementações, se o ganho (A) for 1, R3 deverá ser suprimido do circuito e R4 deverá ser substituído por um curto. Os valores de C são arbitrários, porém é conveniente determinar um valor comercial próximo a 10/fc. Já os valores de a e b, como em todos os casos anteriores, são obtidos de tabelas conforme a aproximação (Butterworth, Chebyshev, entre outros) desejada (Pertence Jr, 2015).

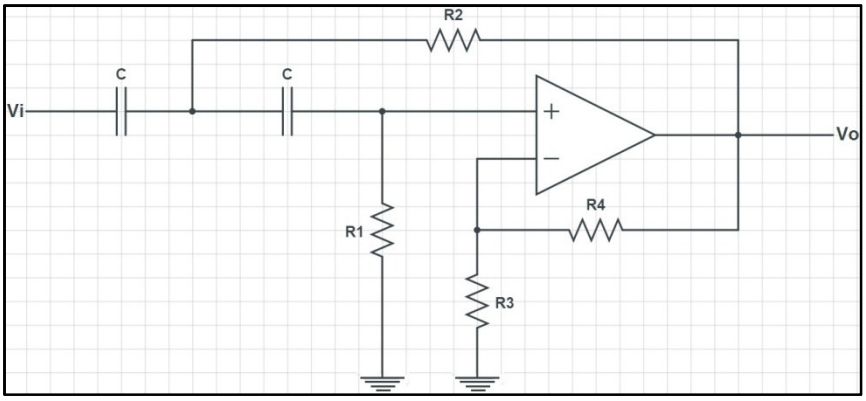


Figura 18 - Filtro ativo, passa-alta, segunda ordem, estrutura VCVS.
(Modificado de: Pertence Jr, 2015).

3.3.3 Conversores Analógico/Digital

As grandezas físicas após serem transformadas em sinais elétricos pelos sensores (transdutores) também são filtradas e amplificadas, porém, ainda assim possuem natureza analógica, a qual pode assumir diversos valores (amplitude) ao longo de um tempo contínuo. Para que os dados analógicos sejam tratados e processados digitalmente, os mesmos devem passar pelo processo de digitalização,

o qual irá representar estes sinais, de modo, que as amplitudes fiquem dentro de um conjunto finito de valores que variam de forma discreta com o tempo. A digitalização de um sinal analógico é realizada através de três etapas: amostragem, quantificação e codificação, como demonstrado na Figura 19 (De Lima, 2013; Fernandes & Panazio, 2009; Puhlmann, 2015).

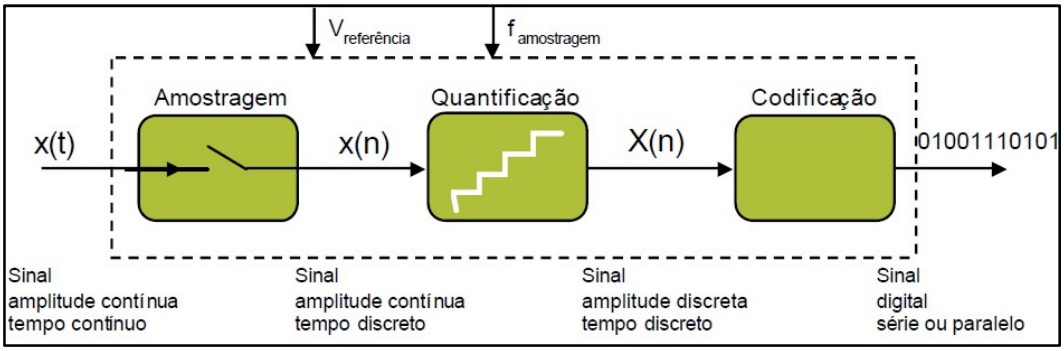


Figura 19 - Diagrama de blocos das etapas de conversão Analógica/Digital.
(Da Silva & Tavares, 2005).

O processo de amostragem consiste na obtenção de amostras de um sinal contínuo, em instantes discretos de tempo. Além disso, o sinal deve ser retido por um instante de tempo, para que o quantizador possa medir a tensão da amostra (Figura 20), este processo é chamado de "*Sample & Hold*" (Amostragem e Retenção).

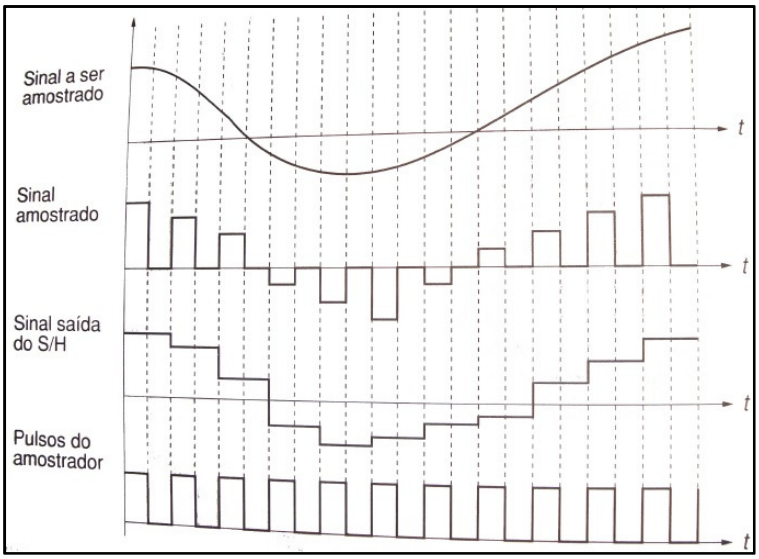


Figura 20 - Processo de Amostragem e Retenção, em um sistema A/D.
(Modificado de: Eyglys, 2009).

A amostragem de um sinal deve obedecer o Teorema de *Nyquist,* que estabelece as condições para que um sinal analógico seja amostrado, de modo que possa ser perfeitamente reconstruído a partir de suas amostras (Figura 21). Para isso, a frequência de amostragem (f_s) deve ser maior ou igual a 2 vezes a largura de banda (BW) do sinal analógico, conforme:

$$f_s \geq 2BW \tag{22}$$

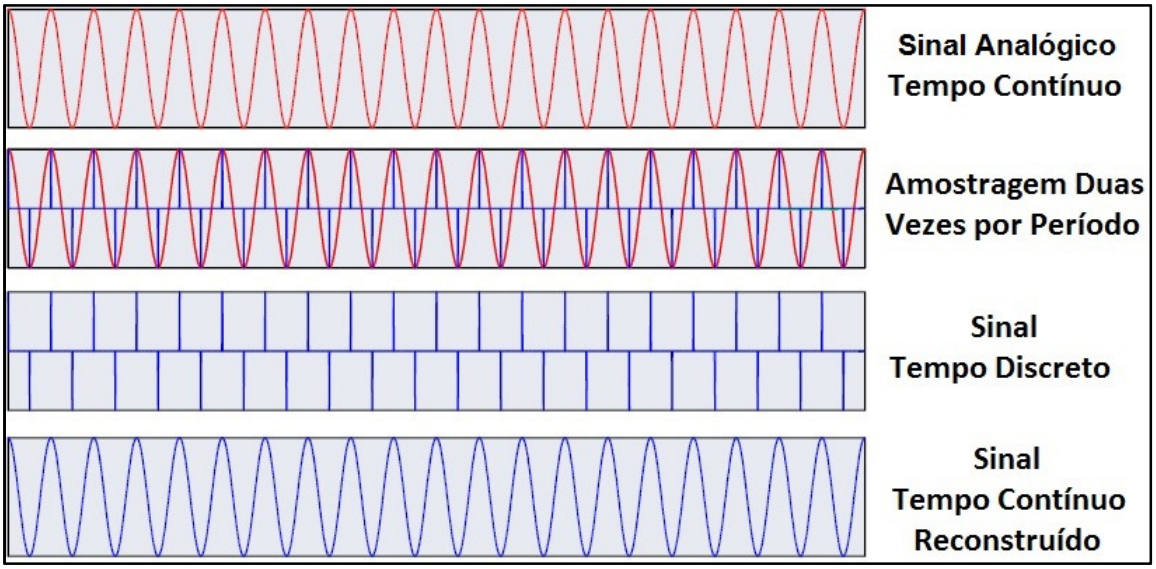


Figura 21 - Amostragem de um sinal analógico respeitando o teorema de Nyquist, após sua reconstrução preservando suas características.
(Modificado de: Ynoguti, 2004).

Um dos maiores problemas durante a amostragem de um sinal é o efeito de *Aliasing*, que ocorre quando a frequência de amostragem é menor que a frequência estipulada pelo teorema *Nyquist*, deste modo, ocorre a sobreposição de réplicas espectrais, onde o espectro fica distorcido devido ao aparecimento de novas frequências (*Alias*), assim impossibilitando a reconstrução do sinal original, conforme é demonstrado na Figura 22 (Do Nascimento, 2013; Fernandes & Panazio, 2009; Ynoguti, 2004).

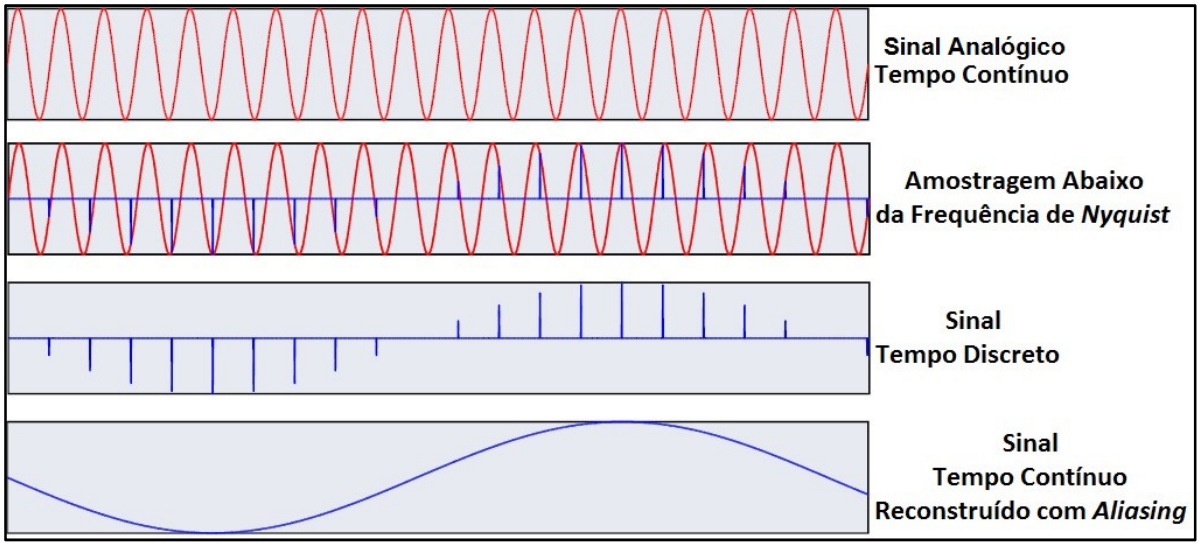


Figura 22 - Amostragem de um sinal analógico abaixo da frequência de Nyquist, após sua reconstrução com o efeito de Aliasing.
(Modificado de: Ynoguti, 2004).

Conforme Ynoguti (2004), depois de amostrados, os sinais mudam de valor apenas em instantes discretos de tempo, mas assumem valores em uma faixa contínua.

O processo de quantização consiste na quantificação das amplitudes das amostras, as quais estão num intervalo contínuo de valores, deste modo, obtendo-se um conjunto finito de valores possíveis (níveis de quantização) conforme Figura 23. O número de bits (b) em um sistema de conversão A/D define o conjunto de níveis possíveis para quantizar uma amostra, bem como a resolução, conforme a equação 23 (Da Silva, 2012; Fernandes & Panazio, 2009). A exemplo disto, um conversor A/D de 12-bits possuirá 4096 níveis possíveis de quantização, enquanto um A/D de 24-bits possuirá mais de dezesseis milhões de níveis de quantização.

$$V_o = \frac{\Delta V}{2^b} \tag{23}$$

onde V_o é a resolução, ΔVé a faixa de entrada e b é o número de bits do conversor.

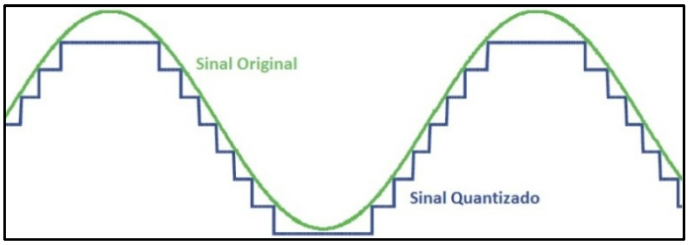


Figura 23 - Sinal original (verde) e quantizado a n níveis (azul).
(Modificado de: Ynoguti, 2004).

Diferentemente da amostragem, onde sob certas condições é possível reconstruir o sinal sem perda de informações, o processo de quantização geralmente é irreversível e resulta na perda de informações, onde ruídos são introduzidos no sinal quantizado. Assim, quanto maior for o número de níveis ou quanto maior for o número de bits do sistema ADC (menor distância entre níveis) menor será o erro de quantização (Figura 24), deste modo, a razão sinal/ruído (*SNR*) aumenta em aproximadamente 6 dB a cada bit (b) acrescentado ao conversor, onde a *SNR* é dada pela equação 24 (Craig, 2011; Eyglys, 2009; Kulkarni, 2002).

$$SNR = 20\log_{10}(2^b) \tag{24}$$

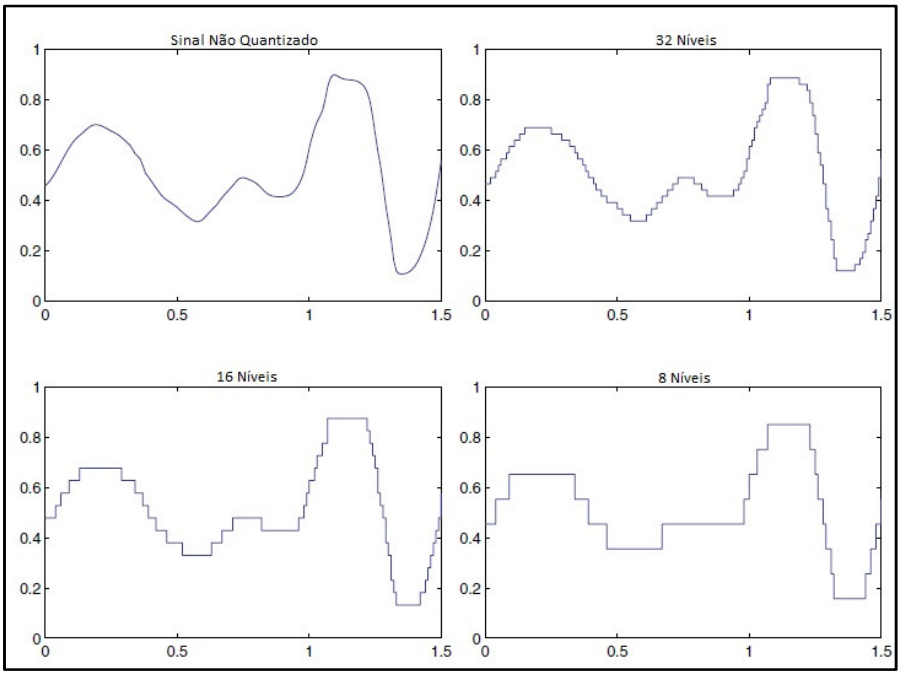


Figura 24 - Sinal analógico quantificado a diferentes níveis.
(Modificado de: Kulkarni, 2002).

O terceiro e último passo no processo de digitalização de um sinal é conhecido como codificação, onde simplesmente, cada um dos níveis quantificados é convertido em um código binário, conforme exemplificado na Figura 25 (Eyglys, 2009).

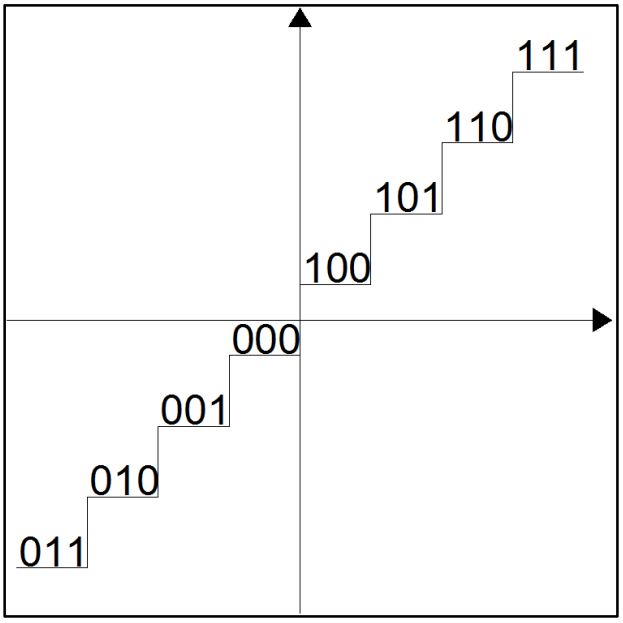


Figura 25 - Sinal quantificado e codificado em um sistema binário.
(Modificado de Eyglys, 2009).

Os conversores Analógico/Digital são classificados quanto à taxa de sobreamostragem (*OSR*) em que os mesmos trabalham.

$$OSR = \frac{f_s}{2BW} \tag{25}$$

Os conversores do tipo *Nyquist* operam com uma taxa de sobreamostragem tipicamente entre 1.5 a 10 vezes, neste caso, temos os conversores do tipo integradores dupla-rampa, pipeline, flash e aproximação sucessiva (SAR), sendo este último um dos tipos mais comuns e importantes nas arquiteturas de conversão AD. Já os conversores sobreamostrados, trabalham com taxas que variam de 10 a 512 vezes, possibilitando um aumento significativo na razão sinal/ruído, por meio da

filtragem do ruído de quantização fora da banda do sinal, exemplo desta arquitetura, são os conversores AD Sigma-Delta (Da Silva & Tavares, 2005; De Aguirre, 2014).

3.3.4 Microcontroladores

Um microcontrolador, nada mais é, do que um microcomputador em um único chip. Esta solução (Figura 26) tipicamente incluí:

- CPU (Unidade Central de Processamento);
- Barramentos (Linha de comunicação entre a CPU e as memórias, periféricos, I/Os, entre outros);
- Memória de Dados RAM (Memória de Acesso Randômico - Volátil);
- Memória de Dados EEPROM (Não volátil);
- Memória de Programa FLASH;
- Dispositivos de I/O (Entrada e Saída);
- Periféricos (UART, SPI, I2C, ADC, DAC, CAN, LAN, entre outros);
- Contador/Temporizadores
- Controladores de Interrupção

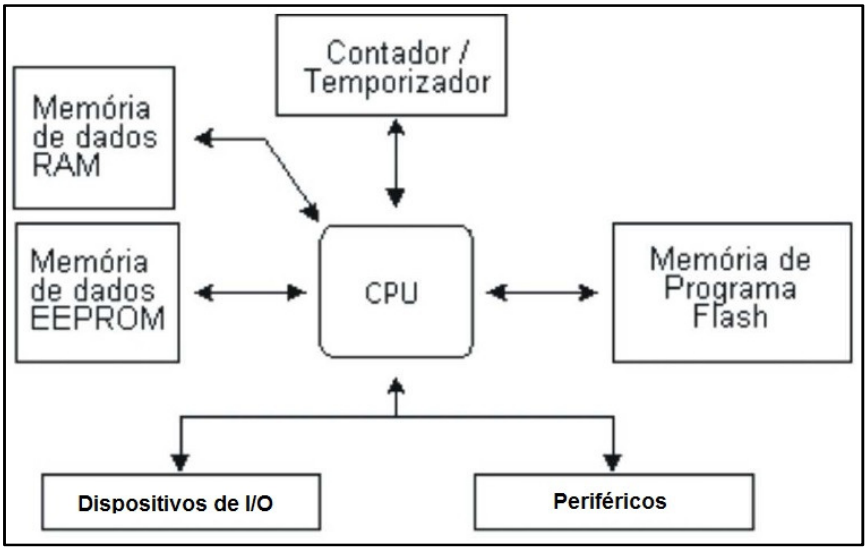


Figura 26 - Estrutura básica interna de um microcontrolador.
(Modificado de:Fambrini, 2015).

Atualmente a maioria dos microcontroladores é desenvolvida sob a arquitetura *Harvard Estendida* (Figura 27), a qual possui barramento de dados e instruções separados, o que permite acesso simultâneo às memórias de dados e programas. E devido ao emprego de um set de instruções reduzidos (*RISC – Reduced Instruction Set Computer*) a maioria das instruções pode ser executada em somente um ciclo de c*lock* (Hollenthoner, 2007; Oki & Mantovani, 2013).

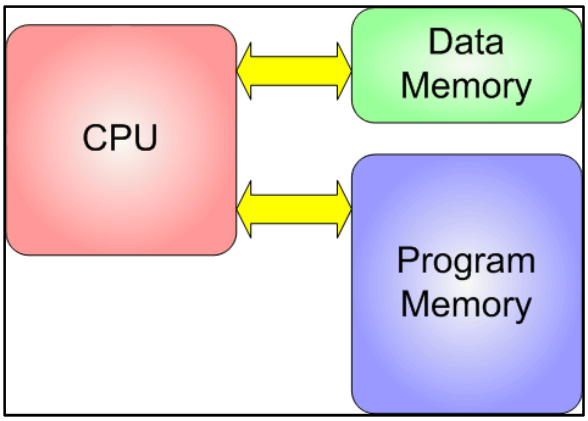


Figura 27 - Representação da Arquitetura Harvard.
(Earl, 2013).

Atualmente, devido a uma demanda crescente por produtos eletrônicos com desempenho satisfatório e um controle eficiente de energia, diversos fabricantes optaram por implementar microcontroladores com alto poder de processamento e barramento de 32 bits. Sendo que hoje em dia, 90% dos processadores embarcados RISC de 32 bits são processadores *ARM* (Advanced RISC Machine LTDA), empresa esta, especializada em licenciar os seus núcleos a empresas parceiras, responsáveis por fabricarem e comercializarem tais processadores (De Souza, 2015).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Considerações Gerais

Durante o desenvolvimento de qualquer equipamento procura-se respeitar certas especificações que visam otimizar e padronizar os mesmos. Atualmente no Brasil não existem normas especificas a respeito do desenvolvimento e fabricação de sismógrafos de engenharia utilizados no monitoramento do desmonte de rocha com explosivos, porém, a ABNT:NBR 9653 (2005) e a CETESB DD-052 (2015), sugerem certas características que devem estar presentes nos sismógrafos de engenharia e nos transdutores de vibrações empregados no monitoramento. Já a "Sociedade Internacional de Engenheiros de Explosivos" disponibiliza um guia intitulado "*ISEE Performance Specifications for Blasting Seismographs*" (*ISEE*, 2011) que fornece diretrizes básicas de projeto para a fabricação de sismógrafos de engenharia, no intuito de promover o registro consistente das vibrações e pressão acústica, sendo este último utilizado como norma balizadora nesta pesquisa.

4.2 Desenvolvimento do Protótipo

A arquitetura de um sismógrafo pode ser dividida em duas unidades básicas: Analógica e Digital. A parte analógica além de incluir toda eletrônica necessária para filtrar e amplificar os pequenos sinais elétricos provenientes dos sensores (geofones e microfones), também contempla todos os circuitos necessários aos ajustes dos níveis de tensões provenientes da fonte de alimentação (bateria 12V).

A parte digital é composta pelo sistema de conversão A/D, microcontrolador e

pelo *firmware* (conjunto de instruções operacionais programadas diretamente no hardware de um equipamento eletrônico) que será o responsável por gerenciar a aquisição, processar e armazenar os dados.

4.2.1 Eletrônica Analógica

4.2.1.1 Fonte de Alimentação

A fonte de alimentação é uma das principais partes de qualquer equipamento eletrônico, seja ele, portátil ou não, pois é responsável por fornecer energia para o correto funcionamento de todos os componentes.

O sismógrafo objeto desta pesquisa, por ser portátil, é alimentado por uma única bateria de 12V, 7Ah, porém uma vez que os circuitos analógicos e digitais funcionam com diferentes níveis de tensão (5V e 3,3V respectivamente), se faz necessário o uso de reguladores, a fim de se obter os níveis corretos de tensão para cada uma das etapas. Para isto foi utilizada uma fonte regulada do tipo DC-DC, com corrente máxima de saída igual a 0,7A. O circuito eletrônico da fonte é apresentado na Figura 28.

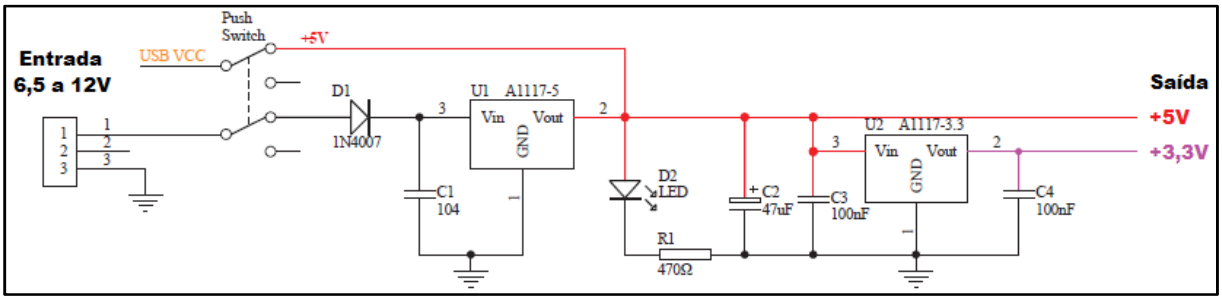


Figura 28 - Circuito da fonte de alimentação regulada 5V e 3,3V.
(Modificado de Addicore, 2015).

4.2.1.2 Sensores

Como neste trabalho o foco principal é a construção dos circuitos eletrônicos, os sensores (geofones e microfones) utilizados são fabricados por empresas especializadas e estão disponíveis no mercado. Porém, tais dispositivos, devem possuir características que atendam às necessidades de um monitoramento de desmonte de rochas.

Conforme o guia da *ISEE,* os geofones (sensores de vibração do solo) devem possuir as seguintes características:

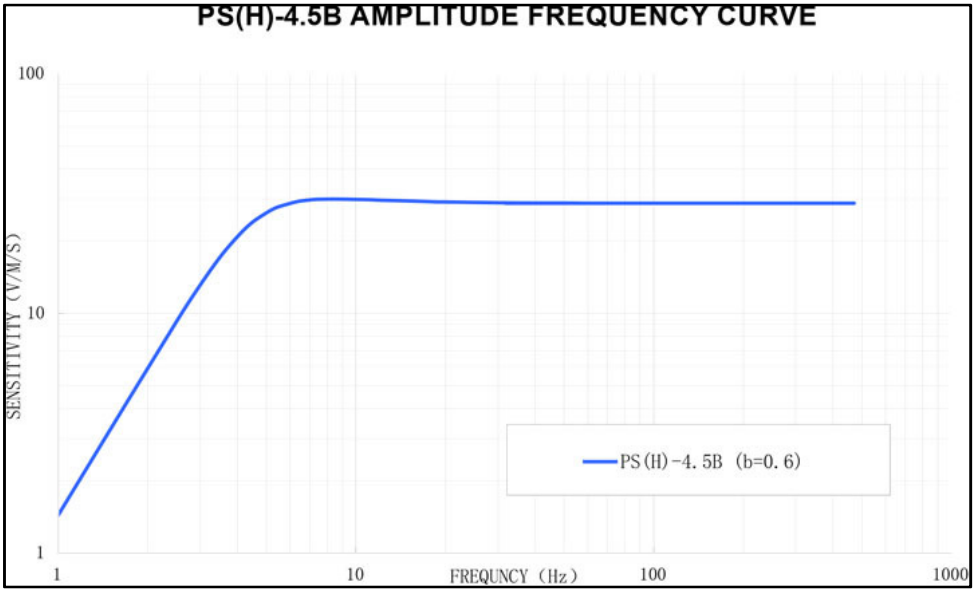
- Limites de Frequência: 2 a 250 Hz, dentro dos limites de 0 a -3 dB de uma resposta plana ideal;
- Acurácia: ± 0.5 mm/s (milímetros por segundo) entre 4 e 125 Hz;
- Resposta de Fase: Deslocamento de fase entre 2.5 a 250 Hz, não devendo causar um erro maior que 10% do valor máximo absoluto de duas harmônicas sobrepostas;
- Resposta de *Cross-Talk* (interferência de sinais entre sensores): Menor que 5% que a indicação do eixo excitado em outro canal mutuamente perpendicular quando excitado à frequência natural do sensor;

Os geofones selecionados e empregados nesta pesquisa são fabricados pela "Sunfull Geophysical Exploration Equipment Co., Ltd" e possuem as seguintes características (fornecidas pelo fabricante):

- Frequência Natural: 4,5 Hz ±10%;
- Sensibilidade: 28,8 V/m/s;
- Temperatura Operação: -40 ~+70ºC;
- Resistência da Bobina: 375Ω±5%;
- Massa de Prova: 11,3g

O Gráfico 1 apresenta diagrama de *Bode* (frequência versus amplitude do sinal) dos geofones, onde é possível observar que sua resposta plana está compreendida entre 4,5 e aproximadamente 500Hz, demonstrando, que este modelo de sensor corresponde o suficiente para ser empregado no monitoramento de vibrações provocadas pelo desmonte de rochas com explosivos.

Gráfico 1 - Diagrama de Bode - Resposta em frequência dos geofones.
(Sunfull, 2016).



Como estes sensores são do tipo uniaxial (vertical ou horizontal), os mesmos foram montados sob uma estrutura, de tal forma, que os dois geofones horizontais estão rotacionados (azimute) em 90º um em relação ao outro e 90º (inclinação) em relação ao geofone vertical (Figura 29), deste modo, possibilitando o registro das ondas sísmicas nas três direções de propagação (longitudinal, transversal e vertical).

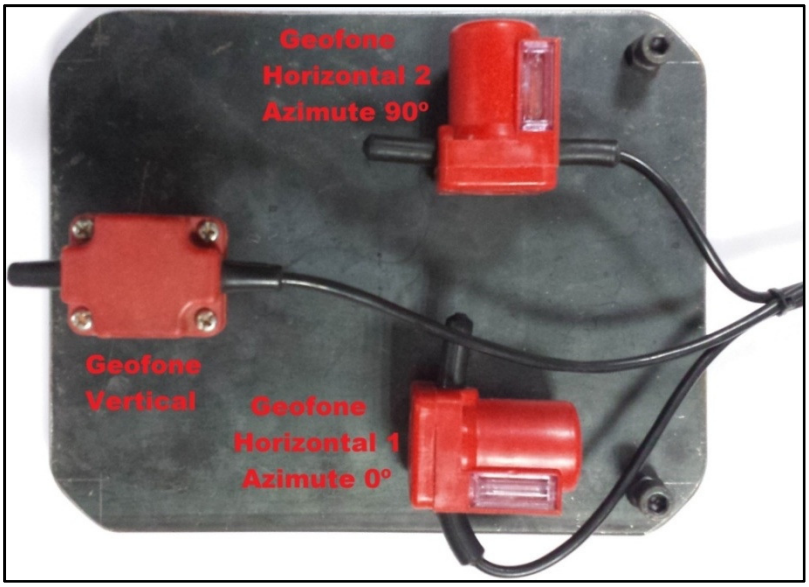


Figura 29 - Arranjo tri-axial dos geofones (vertical e horizontais).
(Modificado de Sunfull, 2016).

Já com relação ao microfone empregado no monitoramento da pressão acústica, o mesmo deve possuir as seguintes características, conforme o guia da *ISEE*:

- Limites de Frequência: 2 a 250 Hz, -3 dB em 2 e 250 Hz, ± 1 dB;
- Acurácia: ± 1 dB entre 4 e 125 Hz;
- Sensibilidade Sísmica do Microfone: A resposta para vibrações mecânicas de 50 mm/s a 30 Hz de qualquer ângulo deve ser menor que 40 dB abaixo da máxima saída do microfone ou 106 dB,a que for menor.

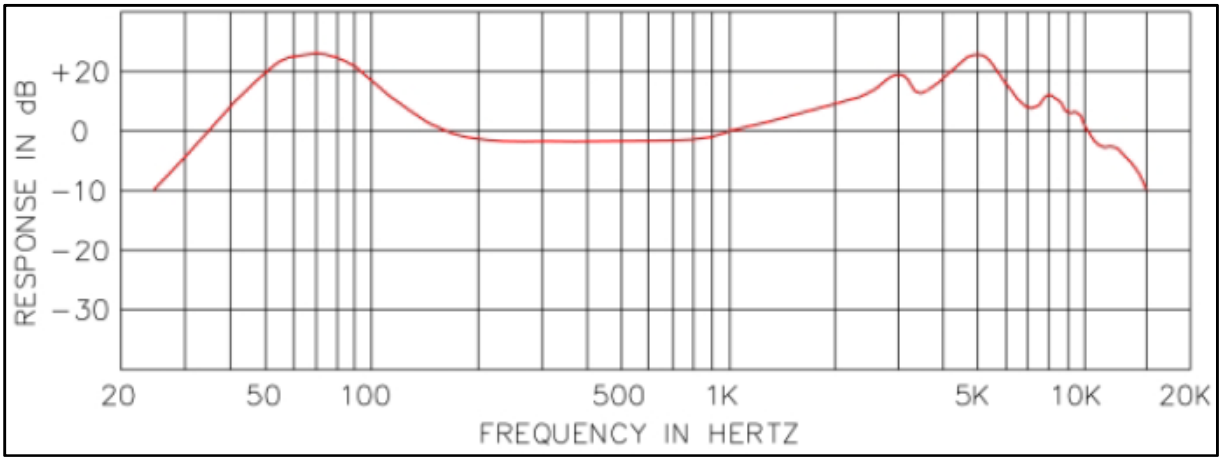
Deste modo, um dos modelos de microfone com características próximas às sugeridas e de fácil acesso no mercado nacional, é o CAD KBM412 (Figura 30), fabricado pela CTI Audio, Inc., sendo o mesmo do tipo dinâmico, com padrão polar do tipo unidirecional (cardióide), projetado especificamente para responder a baixas frequências, conforme as especificações técnicas abaixo:

- Limites de Frequência: 25 Hz a 15 kHz;
- Sensibilidade: 0.56 mV/Pa;
- Resistência da Bobina: 150Ω±30% a 1kHz;

Figura 30 - Microfone Dinâmico, CAD KBM412.
(CTI Audio, 2000).

Através do diagrama de *Bode* (Gráfico 2) do microfone CAD KBM412 podemos verificar que sua resposta plana encontra-se entre 200 e 800 Hz aproximadamente. Porém, nas frequências abaixo de 200 Hz, observamos uma sobre elevação na amplitude do sinal, alcançando seu máximo (maior que 20 dB) na região dos 70 Hz, posteriormente decaindo abaixo do 0 dB.

Gráfico 2 - Diagrama de Bode - Resposta em frequência do microfone KBM412.
(CTI Audio, 2000).



4.2.1.3 Filtros

Durante o procedimento de desmonte de rochas com explosivos, as frequências de vibração e pressão acústica registradas, em sua maioria estão compreendidas entre 2 e 250 Hz, porém em casos extremos podem chegar próximo a 500 Hz, deste modo, se faz necessário a implementação de filtros (passa-baixa e passa-alta), que garantam somente a presença de sinais que correspondam ao procedimento de desmonte, bem como, outros aspectos técnicos de *hardware*.

De modo a garantir que as frequências acima de 500 Hz sejam atenuadas, no intuito de respeitar a frequência máxima registrada durante um evento de desmonte, bem como, o teorema de *Nyquist*, foi desenvolvido um filtro ativo, passa-baixa (filtro *anti-aliasing*), do tipo *Butterworth,* de sexta ordem que irá proporcionar uma atenuação de aproximadamente 36 dB/oitava acima da frequência de corte de 500 Hz. De modo a facilitar e otimizar o desenvolvimento e os cálculos dos parâmetros do filtro ativo, foi utilizado o software *FilterPro Desktop* (Texas Instruments Inc, 2010).

O segundo filtro implementado é do tipo passivo, passa-alta de primeira ordem, com uma taxa de atenuação de 6 dB/oitava e frequência de corte em aproximadamente 2 Hz. O objetivo deste filtro é bloquear a passagem de quaisquer sinais DC, bem como, limitar o limiar inferior da banda do sinal, para que o mesmo respeite as sugestões do guia da *ISEE* (2011).

O circuito dos filtros passa baixa (*anti-aliasing*) e passa alta desenvolvidos é

apresentado na Figura 31.

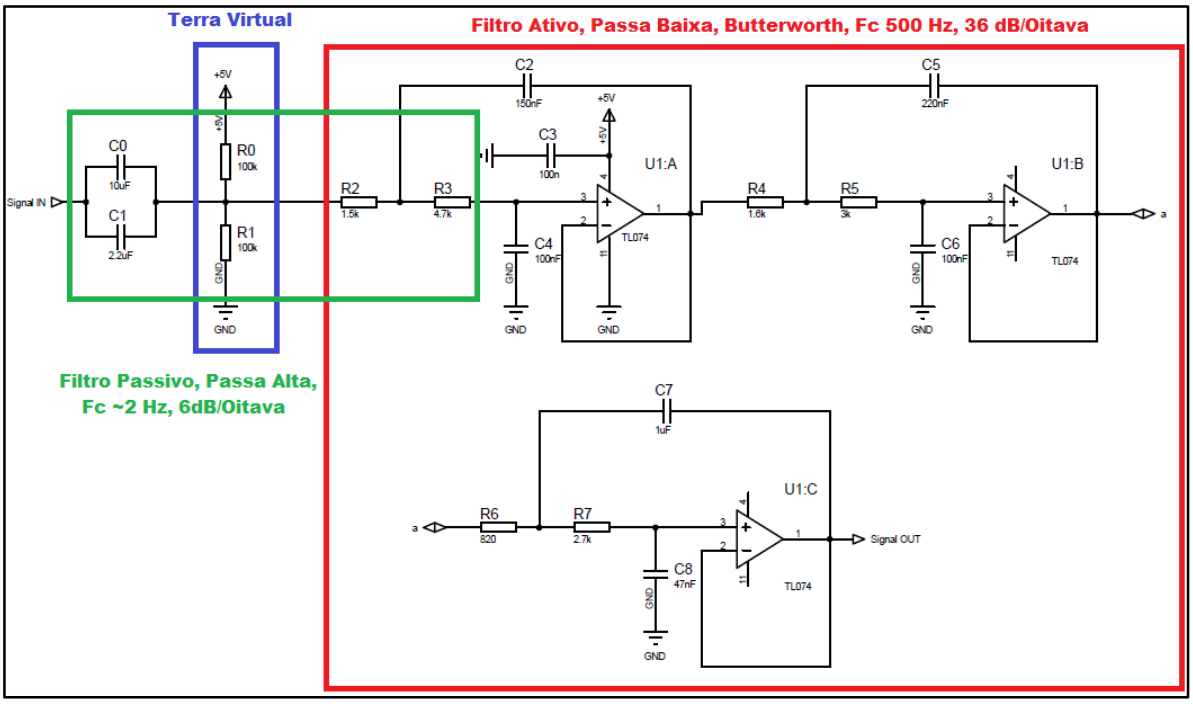


Figura 31 - Circuito dos filtros passa-baixa (destacado em vermelho) e passa-alta (destacado em verde).

Como este sismógrafo foi desenvolvido para ser o mais portátil possível e de baixo custo, toda sua alimentação é provida por uma única bateria de 12V/7Ah, deste modo, toda a etapa analógica é alimentada somente por uma tensão positiva de 5V. Diante disto, se faz necessário o deslocamento do sinal AC proveniente dos sensores, através da utilização de um terra virtual (destacado em azul, Figura 31), igual à metade da tensão de alimentação analógica (5V/2 ou 2,5V), possibilitando assim, que todas as variações positivas e negativas dos sinais, possam ser filtradas e amplificadas, utilizando-se para isso amplificadores operacionais alimentados por uma simples fonte de alimentação (Texas Instruments Inc, 2000).

4.2.1.4 Amplificadores

Os diferentes sensores (geofones e microfones) utilizados em um sismógrafo de engenharia possuem diferentes sensibilidades, fazendo com que, sejam necessários ganhos diferenciados. Os geofones utilizados nesta pesquisa, possuem uma alta sensibilidade (28.8 V/m/s), assim para um melhor aproveitamento de sua faixa dinâmica, não foi implementada nenhuma etapa de amplificação.

Já o microfone escolhido, possuí uma relativa baixa sensibilidade, da ordem de 0.56 mV/Pa, fazendo com que seja necessária uma etapa de amplificação. Para isto foi desenvolvido um amplificador (Figura 32) com ganho de 60 dB (1000X), do tipo inversor, deste modo, possibilitando o controle da impedância de entrada. Neste circuito, novamente foi empregado um terra virtual para possibilitar a amplificação das parcelas positivas e negativas do sinal AC.

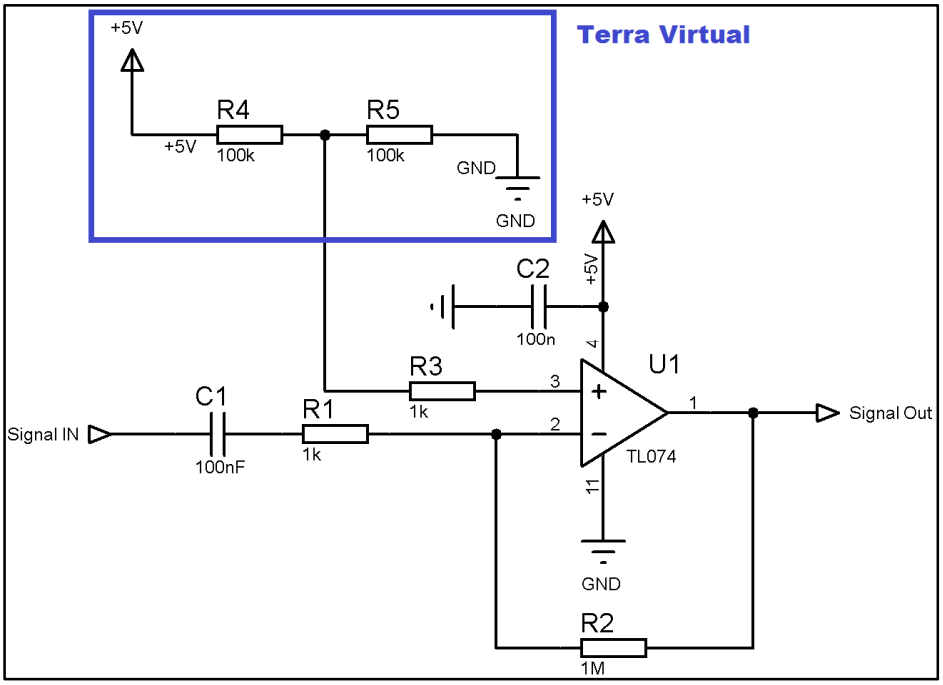


Figura 32 - Circuito do amplificador inversor com ganho de 60dB (1000 vezes).

4.2.2 Eletrônica Digital

4.2.2.1 Conversor Analógico/Digital

A etapa de conversão analógica para digital é uma das mais importantes, deste modo, as características do conversor devem ser bem exploradas e estudadas, a fim de satisfazer as condições sugeridas no guia da *ISEE*, (2011) e digitalizar os sinais analógicos com qualidade e resolução.

Diante disto, o conversor A/D escolhido foi o ADS1220 (Texas Instruments Inc, 2016), o qual possui as seguintes características:

- Arquitetura: Delta-Sigma;
- Resolução: 24 bits, 23-bits efetivos;
- Taxa de Amostragem: Máximo 2.000 SPS;
- Canais: 4 Single-Ended ou 2 Diferencial (Multiplexados);
- Comunicação: Serial SPI;
- Alimentação Analógica: 5 Volts;
- Alimentação Digital: 3.3 Volts;
- Ganho Programável por Software: 1 a 128 V/V;
- Filtro Digital Simultâneo de 50 e 60 Hz a 20 SPS;

Como o sismógrafo possuí quatro canais (3 geofones e 1 microfone), foi desenvolvido um circuito (Figura 33) utilizando dois módulos de conversão A/D ADS1220 (2 canais single-ended por módulo), pois cada um dos módulos possuí frequência máxima de aquisição de 2 kHz. Tal configuração possibilitou uma taxa de amostragem de 1000 amostras por segundo, por canal. No intuito de suavizar as transições bruscas, suprimir os excessos e proteger contra sobre-tensões nos pinos de entrada e saída do canal de comunicação serial síncrona, foram utilizados

resistores em série, de modo que toda a comunicação entre microcontrolador/ADC ocorra sem ruídos e interrupções que poderiam vir a contaminar os valores amostrados, ou até mesmo interromper o processo de amostragem.

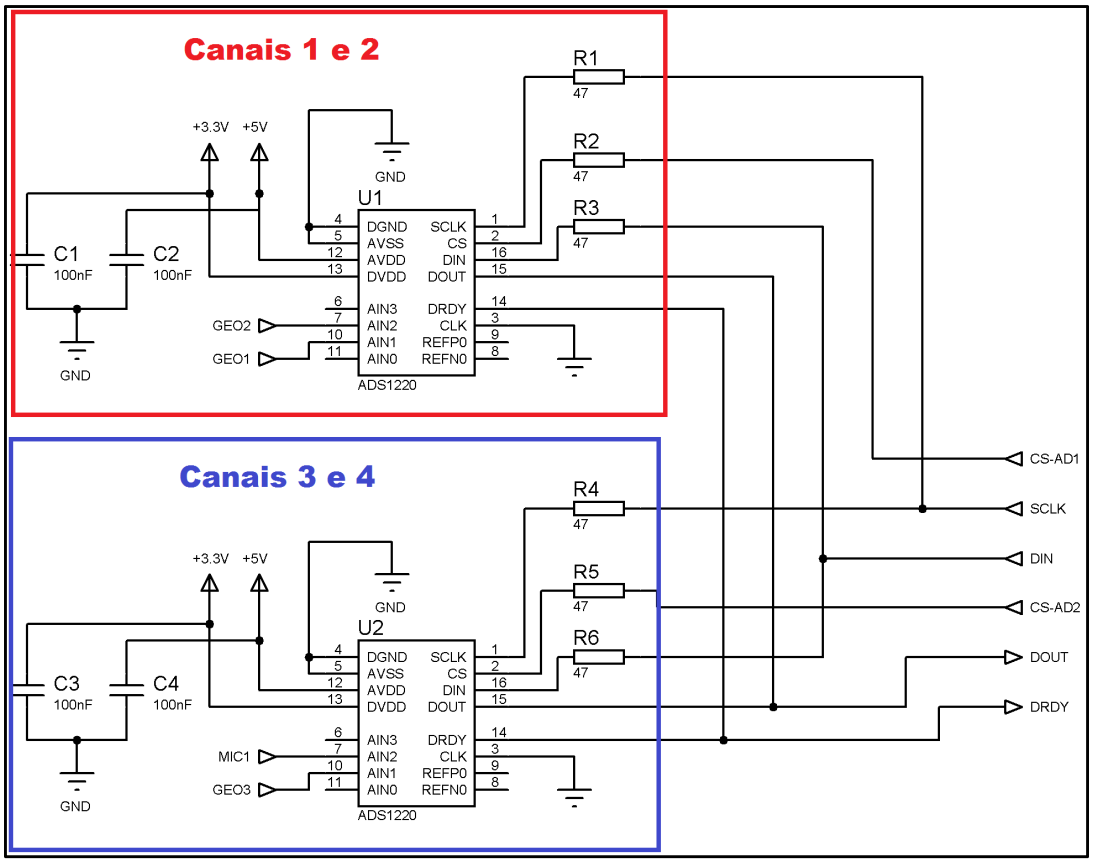


Figura 33 - Circuito do conjunto de conversores A/D para os 4 canais, com comunicação serial SPI.

4.2.2.2 Microcontrolador

Atualmente, a demanda crescente por equipamentos portáteis e cada vez mais interconectados, leva ao uso de microcontroladores/microprocessadores cada vez mais poderosos, com um conjunto crescente de periféricos, porém de baixo consumo.

Diante do exposto, e no intento de prover uma solução que se beneficie dos mais modernos dispositivos de *hardware* e *software* disponíveis no mercado e que

possuam características (*clock* do núcleo, memórias RAM e Flash, periféricos de comunicação, entre outros) que satisfaçam as necessidades de um sismógrafo de engenharia, o microcontrolador utilizado conta com um núcleo *ARM* de 32-bits, fabricado atualmente pela *NXP Semiconductors*, modelo MK64FN1M0VLL12 (Freescale, 2014a) o qual possui as seguintes características:

- Núcleo: ARM Cortex-M4, com conjunto de instruções DSP (*Digital Signal Processing*), *FPU*, *DMA*, entre outros;
- Velocidade (Clock): 120 MHz;
- Memória Flash: 1024 kB
- Memória RAM: 256 kB de SRAM
- Conversor A/D Interno: SAR ,16 Bits
- Conexões: USB, 5 UARTs, 3 SPI, 3 I2C, 1 CAN, 1 Ethernet, 1 SDHC;
- Pinos de Entrada/Saída: 66

Porém, como este microcontrolador possui um encapsulamento do tipo LQFP (*Low Profile Quad Flat Package*) e necessita de um sistema específico de gravação de *firmware*, optou-se por utilizar a placa de desenvolvimento FRDM-K64F Freedom (Freescale, 2014b), a qual provê o suporte necessário ao encapsulamento deste microcontrolador, bem como a interface necessária de gravação, interface de debug, conectores (micro USB, cartão de memória SD, rede RJ45, entre outros), acelerômetro, magnetômetro, botões, LED RGB, entre outros. A Figura 34 apresenta uma visão geral da placa de desenvolvimento com a posição dos seus componentes, enquanto na Figura 35 é apresentado um diagrama de blocos contendo o esquema de interconexão dos módulos de conversão A/D, relógio de tempo real, cartão SD, entre outros, com o microcontrolador presente na placa.

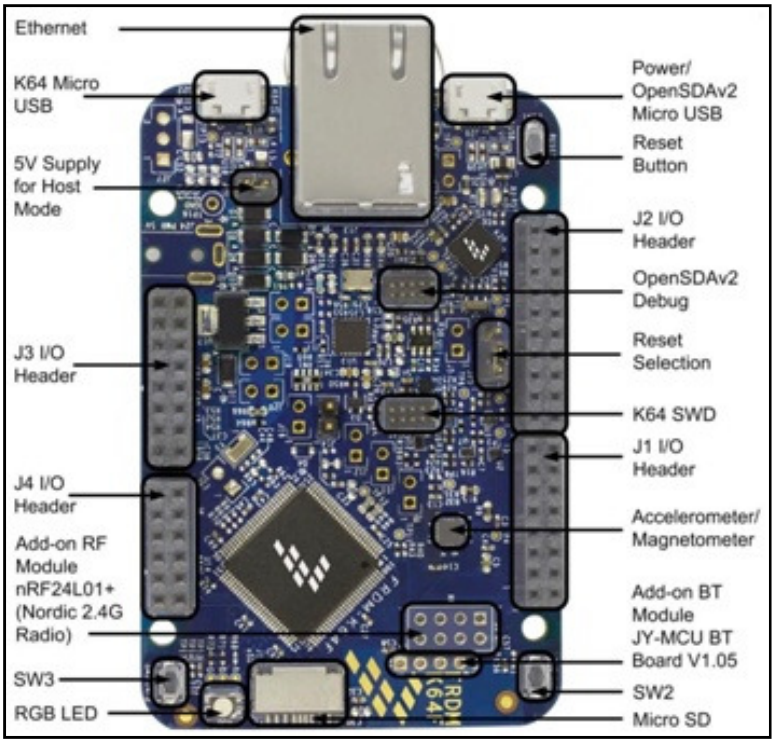


Figura 34 - Placa de Desenvolvimento FRDM-K64F.
(Freescale, 2014b).

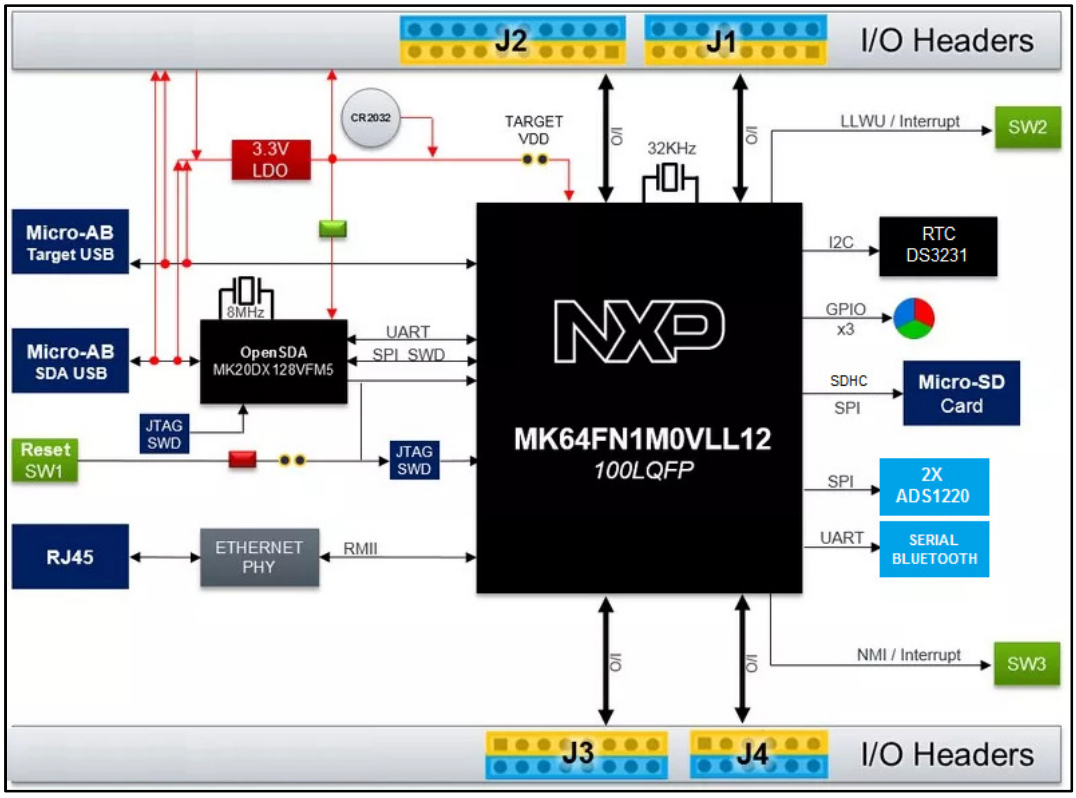


Figura 35 - Diagrama de blocos da interconexão entre o microcontrolador e os periféricos de hardware do sismógrafo.
(Modificado de ARM mbed, 2016a).

4.2.2.3 *Firmware* - Software Embarcado

Como se sabe, para que um microcontrolador possa executar certas tarefas, é necessário a implementação de um algoritmo específico e nesta pesquisa o *firmware* do sismógrafo de engenharia foi totalmente desenvolvido através da plataforma *mbed* (ARM mbed, 2016b) em linguagem C/C++, pois a mesma, além de disponibilizar uma *IDE* (Ambiente de Desenvolvimento Integrado) própria e on-line, também disponibiliza camadas de abstração de *hardware* para diferentes placas de desenvolvimento e microcontroladores, o que permite a migração entre estas sem problemas de compatibilidade, onde fornece também diversas bibliotecas próprias, bem como bibliotecas disponibilizadas pela comunidade.

Como o objetivo principal do *firmware* é fazer com que o microcontrolador realize tarefas específicas, em conjunto com os periféricos de *hardware* adotados, na intenção de adquirir, processar e armazenar os dados dos eventos de desmonte, assim foi desenvolvido um *firmware* próprio, o qual executa as seguintes tarefas de forma quase totalmente transparente ao usuário:

1) Inicializa o microcontrolador, todos seus periféricos e portas;
2) Inicializa as variáveis de ambiente;
3) Inicializa e configura os módulos de hardware externo (Relógio de Tempo Real – RTC DS3231, Conversores Analógico/Digitais ADS1220, Cartão de Memória SD);
4) Cria Buffer Circular, utilizado no sistema de Pré-Trigger Automático;
5) Cria Vetor bidimensional, utilizado para armazenar amostras, pós-trigger;
6) Verifica se a chave de configuração está pressionada, se sim, configura o sismógrafo via interface serial, se não, inicia a aquisição;
7) Inicia Aquisição: Zera o Buffer Circular e o Vetor bidimensional;

8) Lê os dados dos conversores A/D a cada 1ms, coloca no buffer circular e verifica se algum dos canais obteve amostras com valores acima do valor de trigger configurado (threshold), se sim, passa para próxima etapa, se não, repete o procedimento;
9) Lê os dados dos conversores A/D a cada 1ms, coloca no vetor bidimensional, até preencher o mesmo com o número de amostras configurado;
10) Organiza os dados do buffer circular, e do vetor bidimensional e grava no cartão de memória SD;
11) Re-inicia a Aquisição.

O fluxograma do *firmware* de controle é apresentado no Anexo A.

5. TESTES E AJUSTES DO SISTEMA

5.1. Considerações Gerais

De modo a verificar o correto funcionamento do sismógrafo desenvolvido, vários níveis de testes foram realizados. Primeiramente, cada um dos principais módulos analógicos foram simulados computacionalmente e em seguida testados em laboratório. Após a integração de todas as partes (hardware analógico/digital e firmware), foram realizados ajustes (calibração) e posteriormente testes de campo para comprovar se todo o sistema funciona satisfatoriamente em condições reais de operação.

5.2. Simulações Computacionais - Circuitos Analógicos

A fim de comprovar que os circuitos eletrônicos (Filtros e Amplificadores) propostos correspondem matematicamente às necessidades do projeto, os mesmos foram simulados no software PROTEUS DESIGN SUITE 8.1 (Labcenter Electronics, 2014).

O filtro passa-baixa (*Aliasing)* foi projetado de modo a atenuar em 36 dB/oitava as frequências acima de 500 Hz, com uma aproximação do tipo *Butterworth*. O Gráfico 3 apresenta a resposta em frequência do filtro (Curva de Bode), obtido por meio de simulação, no qual mostra exatamente o comportamento esperado, pois observa-se um comportamento plano na banda de passagem (1 a 500 Hz) e a atenuação das frequências acima de 500 Hz, onde em 1, 2 e 4 kHz as taxas de atenuação são de aproximadamente 36, 72 e 108 dB respectivamente o

que corresponde a 36 dB/oitava.

Já o Gráfico 4 apresenta o resultado da simulação computacional relativo ao diagrama de fase do filtro passa-baixa.

Gráfico 3 - Curva de Bode - Resposta em frequência do filtro passa-baixa (aliasing) proposto.

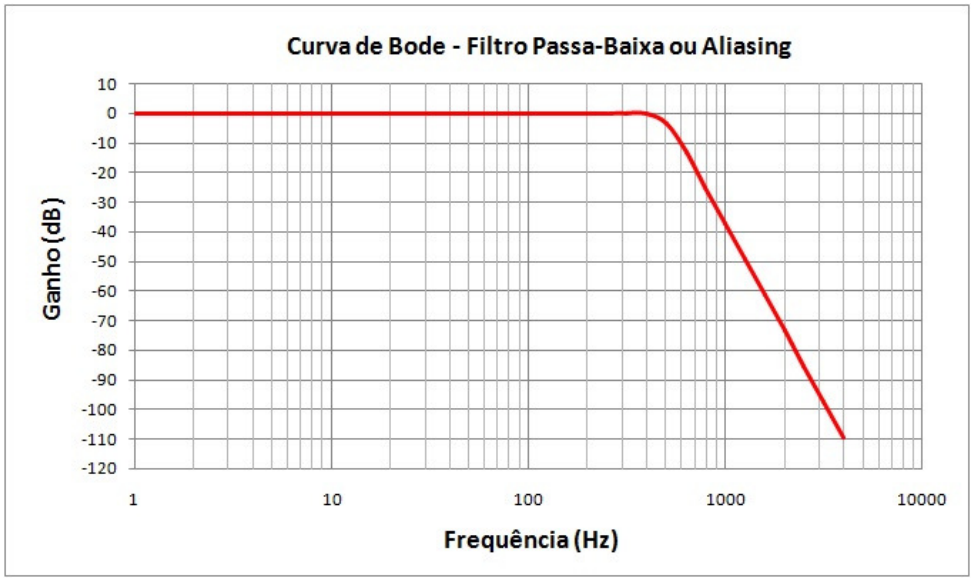
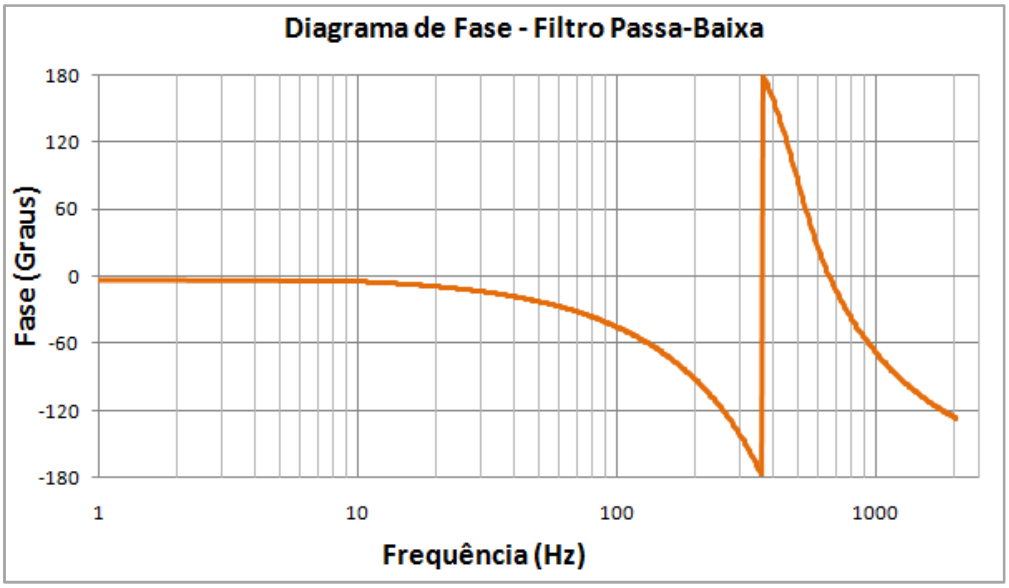


Gráfico 4 - Diagrama de Fase - Filtro passa-baixa (aliasing).



Já o filtro passa-alta possui características mais moderadas se comparado ao

filtro passa-baixa, pois o mesmo é do tipo passivo, frequência de corte em aproximadamente 2 Hz, com taxa de atenuação em 6 dB/oitava. No Gráfico 5 é apresentada a Curva de Bode, onde é possível observar que o filtro cumpre com o esperado, atenuando as frequências abaixo do 2 Hz a aproximadamente 6 dB/oitava. Já no Gráfico 6 é apresentado o diagrama de fase do filtro passa-alta desenvolvido.

Gráfico 5 - Curva de Bode - Resposta em frequência do filtro Passa-Alta proposto.

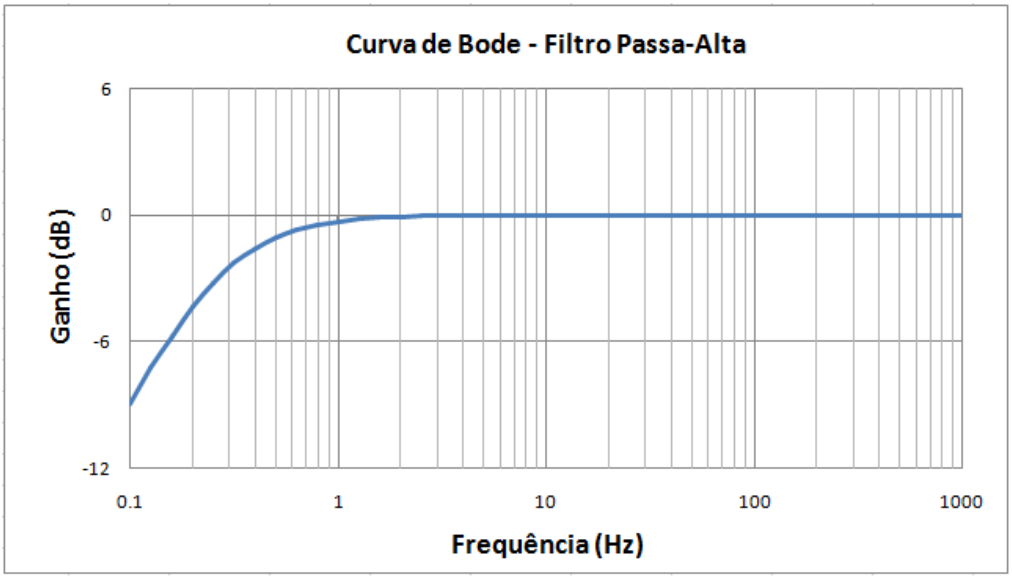
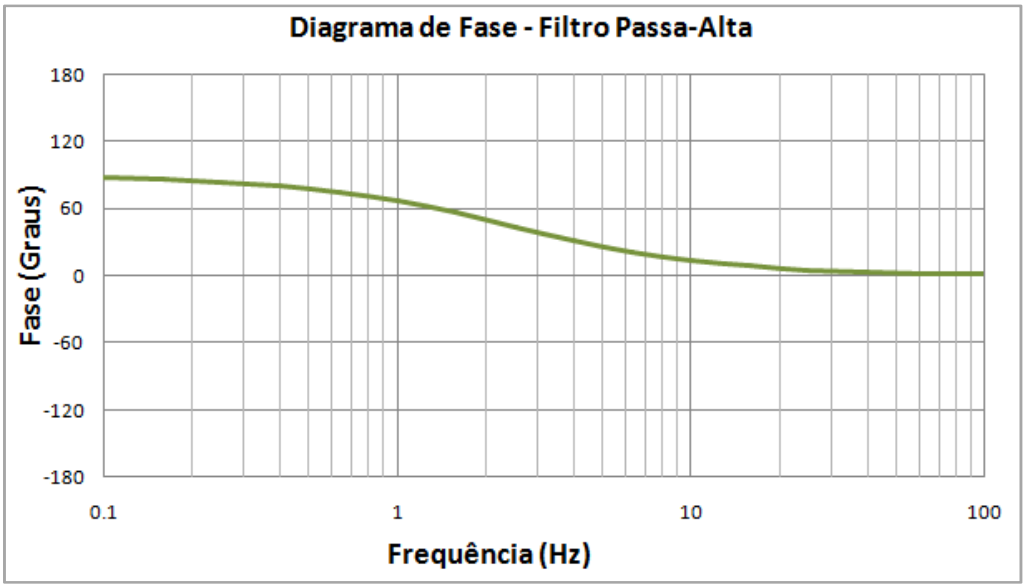
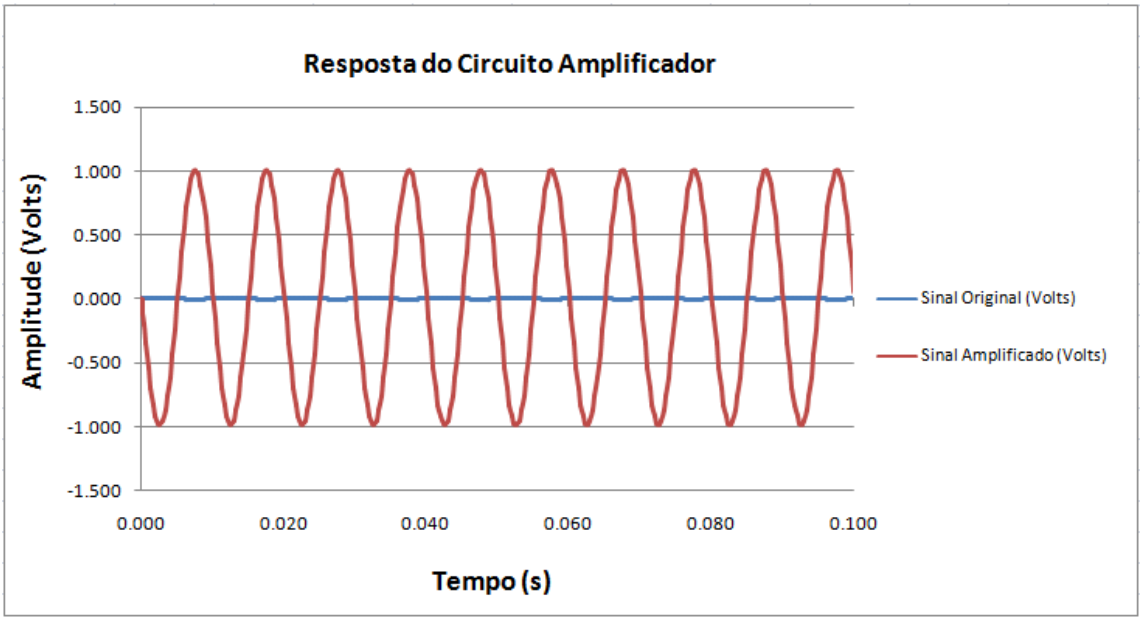


Gráfico 6 - Diagrama de Fase - Filtro passa-alta.



O amplificador desenvolvido é do tipo inversor, com ganho (A) ajustado para 1000 vezes (60 dB). A simulação foi realizada utilizando-se um sinal senoidal com 1mili-Volt de amplitude e uma frequência de 100 Hz, o Gráfico 7 mostra o sinal original (azul) e o mesmo sinal após ser amplificado (vermelho), deste modo, demonstrando a amplificação do sinal em aproximadamente 1000 vezes conforme o circuito proposto.

Gráfico 7 - Resultado da simulação do circuito de amplificação com ganho ajustado para 1000 vezes.



5.3. Testes de Laboratório - Circuitos Analógicos

Após a comprovação de que os circuitos desenvolvidos (filtros e amplificador) corresponderam matematicamente através de simulações computacionais, os mesmos foram implementados em placas de circuito impresso criados especialmente para este projeto, através do software PROTEUS DESIGN SUITE 8.1 (Labcenter Electronics, 2014). Na figura 36A é apresentado um modelo 3D da placa, e na Figura 36B é apresentada a placa confeccionada, onde os circuitos analógicos

foram implementados utilizando resistores de precisão (1%), capacitores cerâmicos multicamadas e o amplificador operacional utilizado foi o TL074 (Texas Instruments Inc, 2015), este foi escolhido por apresentar uma alta impedância de entrada, banda de frequências que atende o escopo da pesquisa e pode ser alimentado por uma simples fonte de alimentação.

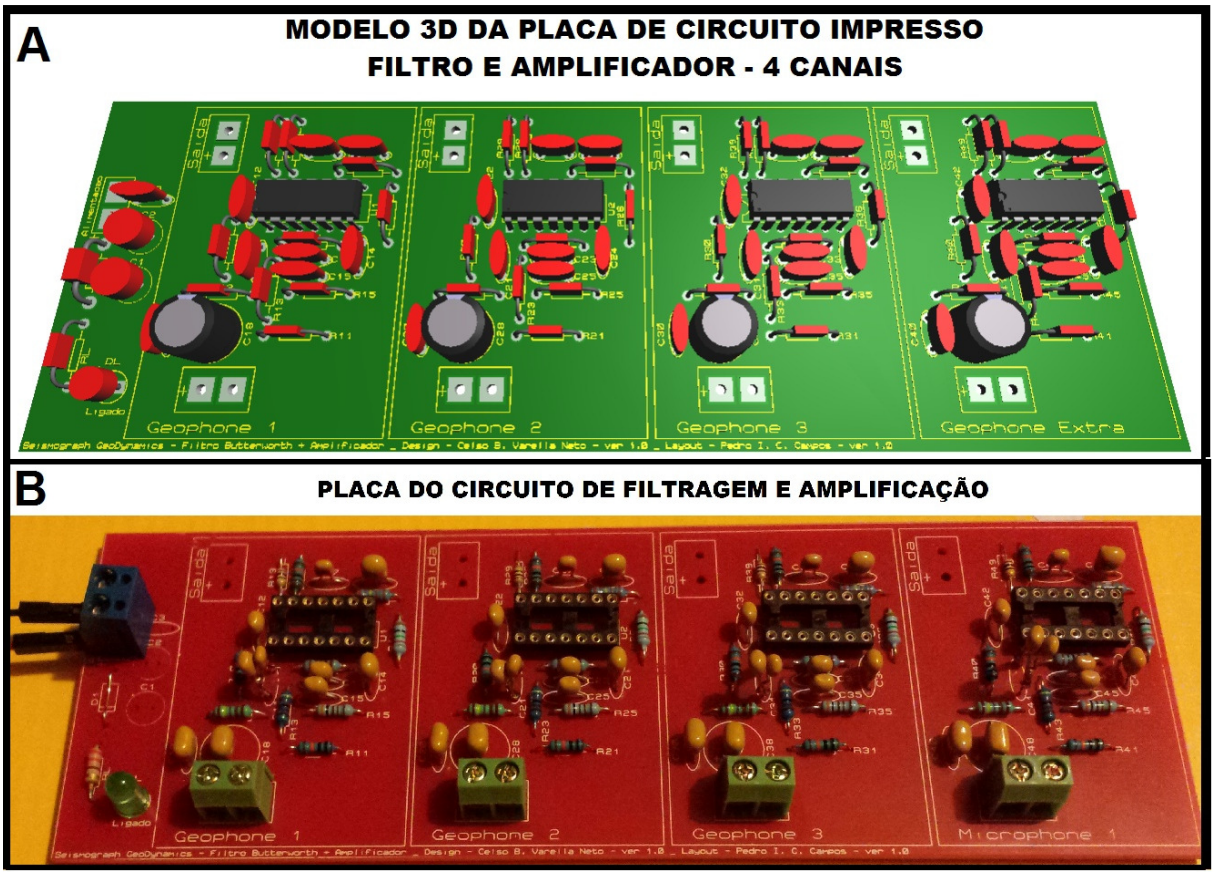


Figura 36: A - Modelo 3D da placa de circuito impresso; B - Placa de Circuito Impresso montada.

Uma vez que os circuitos foram implementados fisicamente, os mesmos foram testados, quanto a sua resposta em relação a um sinal aplicado. Para isso, dois sinais senoidais, com a mesma amplitude e diferentes frequências, foram injetados no circuito. Primeiramente foi fixada a frequência principal em 50 Hz, posteriormente o sinal secundário teve sua frequência variada (150, 500, 1014 e 2048 Hz) ao longo do ensaio. O sinal original foi comparado ao sinal resultante, tanto no domínio do tempo como no da frequência.

A Figura 37 apresenta os resultados deste teste, nos ensaios A e B as frequências secundárias aplicadas são menor ou igual à frequência de corte e através do espectro de frequência dos sinais é possível observar que ambas permanecem inalteradas pelo filtro. Já nos ensaios C e D é possível observar, tanto no domínio do tempo, como no da frequência que os sinais acima da frequência de corte são atenuados, demonstrando assim a eficácia e o correto funcionamento do conjunto de filtros desenvolvidos.

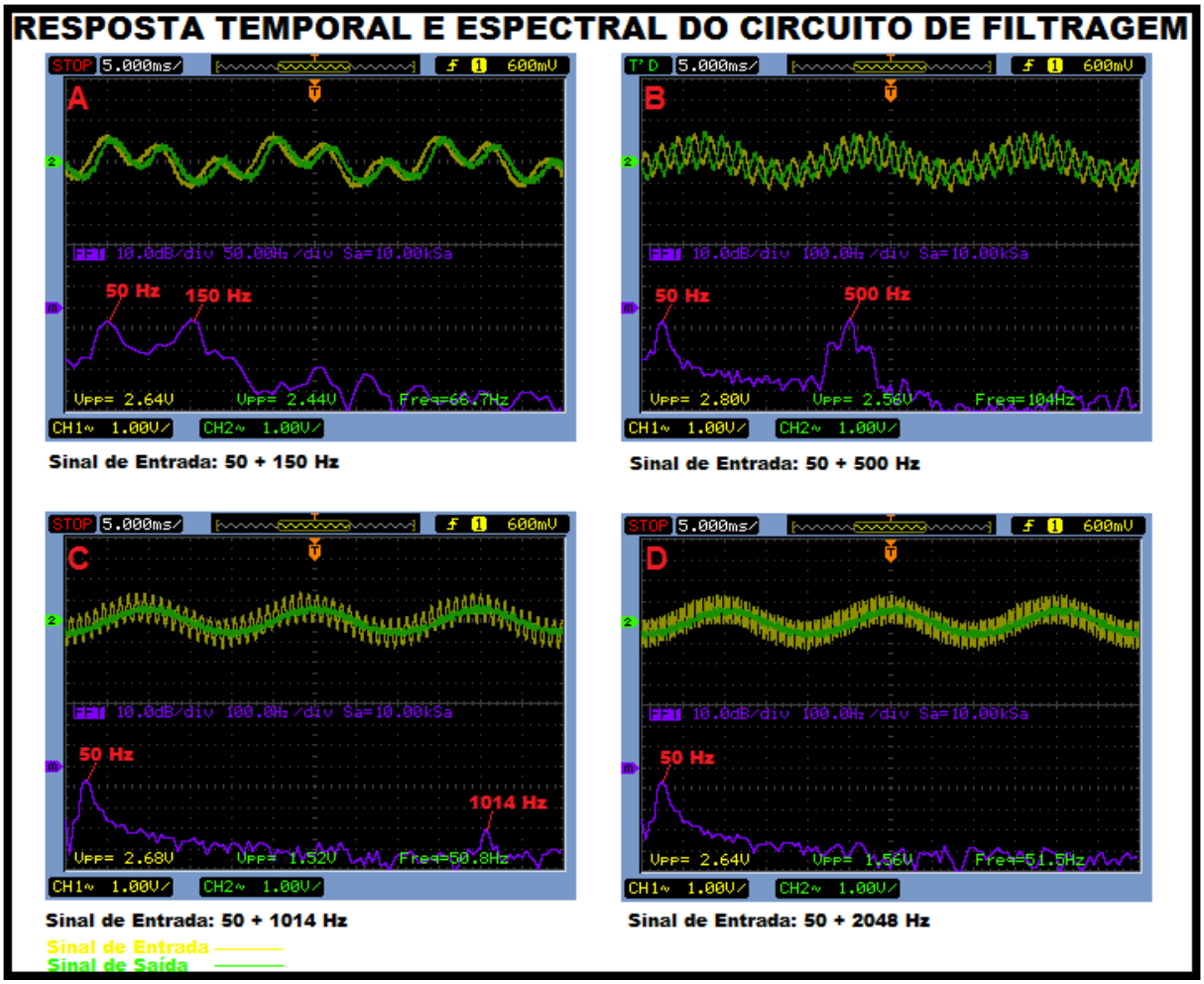


Figura 37 - Resposta temporal e espectral do circuito de filtragem analógico.

Em relação ao circuito de amplificação utilizado no microfone, como o mesmo possui um ganho extremamente elevado (60 dB), o teste consistiu na aplicação de um sinal DC de aproximadamente 2 mili-Volts, após o capacitor de acoplamento. A

Figura 38 apresenta o resultado deste teste, onde o sinal na cor verde representa a saída do circuito de amplificação sem nenhum sinal de entrada, já o sinal na cor amarelo apresenta o resultado após a amplificação do sinal de entrada em aproximadamente 1000 vezes, demonstrando que o circuito de amplificação, está correspondendo como esperado.

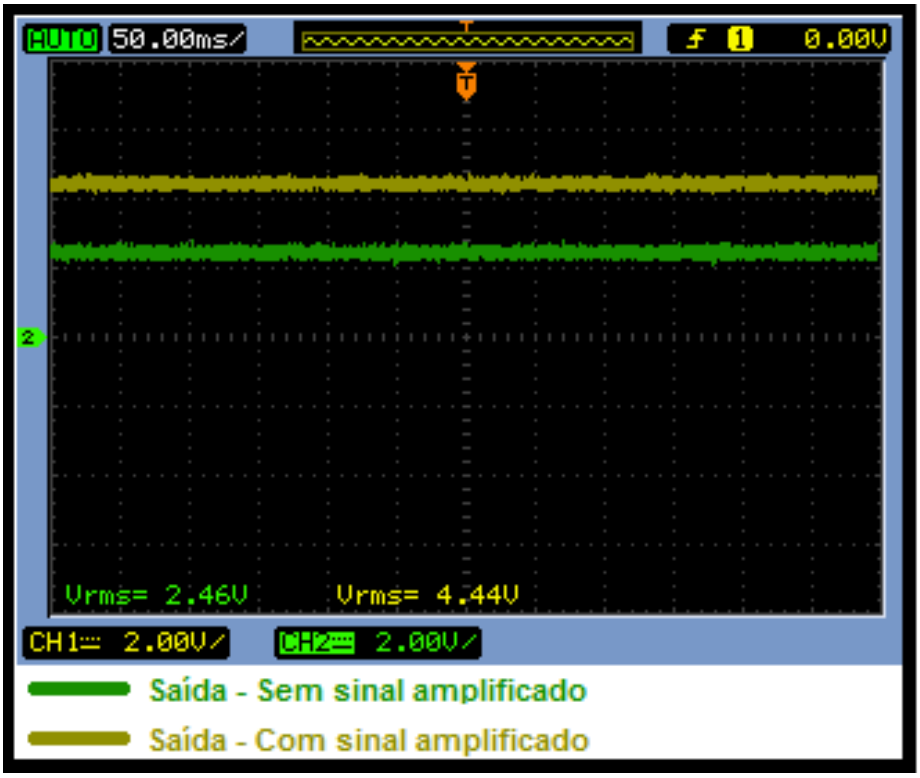


Figura 38 - Resposta temporal do circuito de amplificação analógico.

5.4. Ajustes da Tensão de Referência - *OFFSET*

Com a confirmação de que todas as etapas analógicas (filtros e amplificador) e digitais (A/D e firmware microcontrolador) correspondiam as especificações do projeto e após a montagem de todo o conjunto eletrônico em uma caixa (Anexo B) especialmente adaptada para o sismógrafo, foram realizados ajustes na tensão de referência (*OFFSET*) de cada um dos canais individuais, de modo a equalizá-los.

Uma vez que todos os canais possuem o mesmo hardware (filtros e amplificadores), espera-se que todos apresentem a mesma resposta a um mesmo sinal aplicado, porém, devido a pequenas diferenças entre os componentes (resistores, capacitores, amplificador operacional), ruído eletrônico, placa de circuito impresso, processo de soldagem, fiações, conexões, entre outros, nem sempre isto ocorre. Deste modo, cada um dos canais apresenta um comportamento próprio, neste caso, deslocando um certo valor para mais ou para menos em relação a tensão de referência do sistema, neste caso 2500 mV (2.5 V).

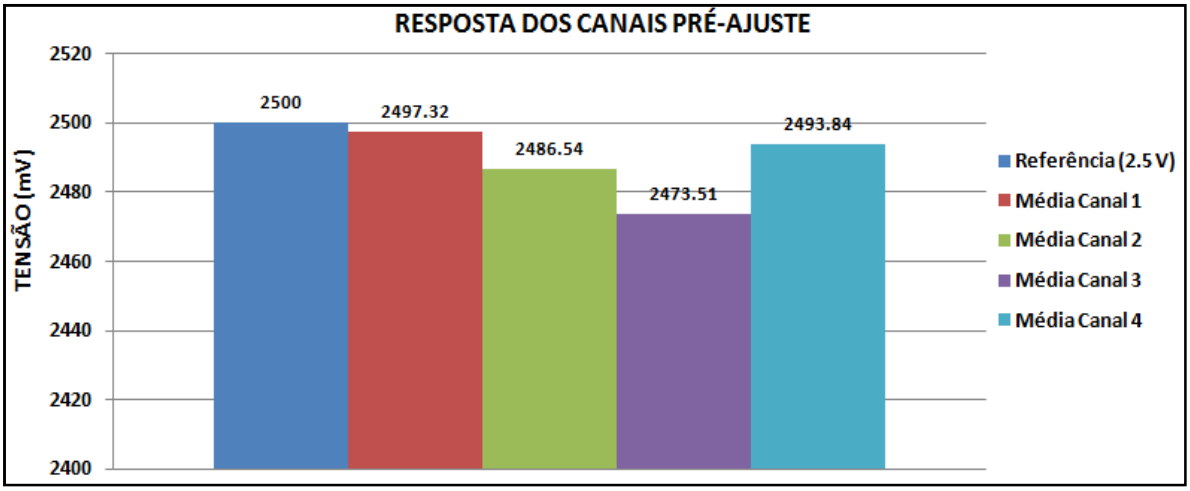
Para possibilitar o ajuste da tensão de referência sistema via software, o sismógrafo foi configurado em sua taxa máxima de amostragem (1 kHz) por canal, sem a instalação de nenhum dos sensores. Posteriormente foram adquiridas aproximadamente 68 mil amostras por canal e através de um processo estatístico básico, foi possível verificar o comportamento de cada um dos canais individualmente, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultado estatístico do ensaio pré-ajuste do sismógrafo.

ESTATÍSTICA PRÉ-AJUSTE						
	MÍNIMO (mV)	**MÁXIMO (mV)**	**MÉDIA (mV)**	**MEDIANA (mV)**	**DESVIO PADRÃO**	**DESVIO PADRÃO %**
CANAL 1	2494.53	2499.81	2497.32	2497.24	0.43	0.02
CANAL 2	2484.18	2488.97	2486.54	2486.54	0.49	0.02
CANAL 3	2462.41	2476.68	2473.25	2473.51	1.95	0.08
CANAL 4	2483.72	2497.59	2493.84	2494.14	1.84	0.07

Diante dos valores encontrados foi possível observar que todos os canais apresentaram um deslocamento negativo em relação ao sinal de referência (Gráfico 8), porém o desvio das amostras em relação à média do sinal foi pequeno.

Gráfico 8 - Média dos valores de cada um dos 4 canais sem ajustes de *offset*.

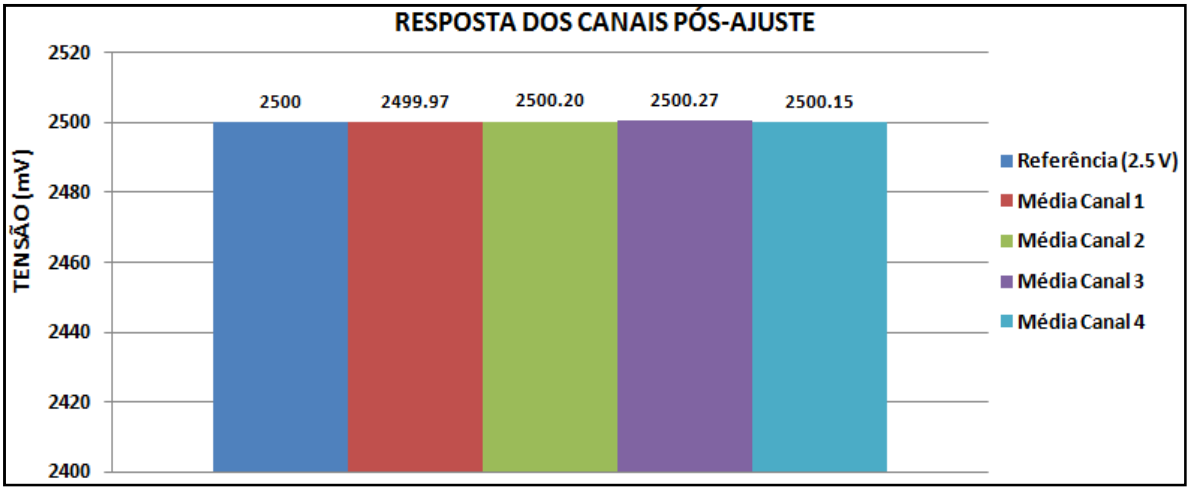


Para realizar o processo de ajuste de *offset*, os valores de correção foram obtidos através da diferença entre o valor da tensão de referência (2500 mV = 2.5 V) e a média de cada um dos canais, valores estes, que serão somados via processamento digital a cada nova amostra adquirida. Após o ajuste individual de cada um dos canais, o experimento foi repetido e nas mesmas condições. A Tabela 2 apresenta a estatística dos canais pós-ajuste, onde é possível verificar que após o processo de calibração os 4 canais passaram a apresentar respostas similares, conforme apresentado no Gráfico 9, assim demonstrando a eficácia do processo de ajuste da tensão de referência.

Tabela 2 - Resultado estatístico do ensaio pós-ajuste do sismógrafo.

ESTATÍSTICA PÓS-AJUSTE						
	MÍNIMO (mV)	MÁXIMO (mV)	MÉDIA (mV)	MEDIANA (mV)	DESVIO PADRÃO	DESVIO PADRÃO %
CANAL 1	2497.58	2502.56	2499.97	2499.91	0.45	0.02
CANAL 2	2497.23	2502.93	2500.20	2500.18	0.50	0.02
CANAL 3	2496.30	2503.41	2500.27	2500.12	0.78	0.03
CANAL 4	2496.66	2503.97	2500.15	2500.04	0.80	0.03

Gráfico 9 - Média dos valores de cada um dos 4 canais com ajustes de *offset*.



5.5. Testes do Sistema

Com o equipamento montado e ajustado, tornava-se necessário avaliar o sistema como um todo em condições reais de operação.

Em um primeiro momento, os testes visavam analisar a operacionalidade do sistema e a possível existência de erros, tanto de hardware e software, como de operação. Já na segunda etapa, os testes tinham por objetivo avaliar o comportamento do equipamento desenvolvido, em uma situação real de operação em campo durante o processo de desmonte de rochas utilizando explosivos.

Ambos os testes foram realizados no município de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul, primeiramente por possuir um número expressivo de mineradoras de calcário, próximas umas das outras, que usam, quase que diariamente, explosivos para remoção do minério e também devido a um conhecimento prévio da geologia local.

Como cada fabricante de sismógrafo de engenharia desenvolve seu próprio software de processamento e como o foco desta pesquisa é o desenvolvimento do hardware de aquisição (registrador/sismógrafo), para o processamento dos dados foi utilizado o software REFLEX VIBRO 1.4 (Sandmeier, 2016).

5.5.1 Geologia Geral

O município de Caçapava do Sul está situado na porção centro-norte do Escudo Sul-Rio-Grandense, o qual se insere na parte sul da Província Mantiqueira. Esta província, no Rio Grande do Sul, é limitada ao norte e a oeste pela Província Paraná e a leste pela província Costeira (CPRM, 2000).

A região onde situa-se o município é constituída por associações de rochas relacionadas ao Escudo Sul-Rio-Grandense, que inclui as sequências sedimentares e vulcano-sedimentares que preenchem calhas tectônicas, referidas como Bacia do Camaquã e Bacia do Paraná, além de depósitos cenozóicos, onde o escudo foi dividido em três domínios geológicos (Ocidental, Central e Oriental) com características de metamorfismo, deformações e litológicas distintas (CPRM, 2000).

Tanto o teste de operacionalidade, como os de monitoramento do desmonte de rochas com explosivos foram realizados sobre litologias que fazem parte do domínio ocidental, representadas pela Seqüência Metamórfica Vacacaí e pela Suíte Granítica Caçapava do Sul (ALANO, 1974), conforme apresentado na Figura 39.

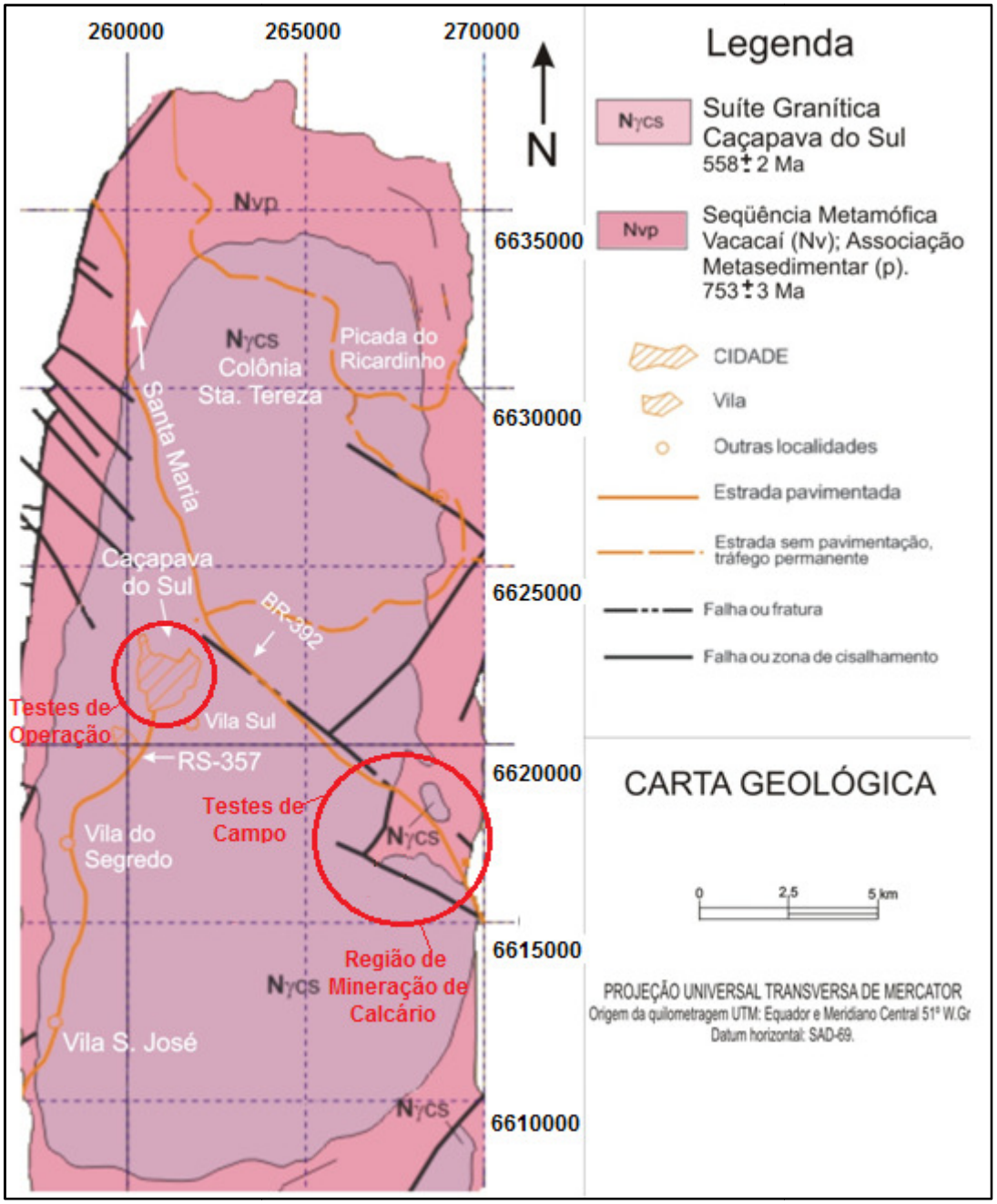


Figura 39 - Mapa geológico e indicação aproximada dos locais de testes de operação e ensaios de campo.
(Modificado de: CPRM, 2000).

5.5.2 Testes de Operação

O teste de operacionalidade foi realizado no interior do antigo Forte D. Pedro II, localizado na região norte da cidade de Caçapava do Sul - RS, sendo selecionado por ser um local plano, com baixa movimentação, tanto de veículos, como de

pessoas (baixos níveis de vibrações) e também devido a sua proximidade com a cidade, facilitando o acesso a laboratórios e oficinas de eletrônica caso ocorresse algum problema.

Com o local escolhido, seguiu-se as recomendações da norma ABNT NBR 9653 (2005), no que diz respeito à instalação dos transdutores (geofones e microfone), em relação aos procedimentos de fixação, orientação e nivelação. Assim, devido a cobertura de solo existente no local, o conjunto de geofones foi enterrado a uma profundidade de aproximadamente 30 cm, sendo primeiramente protegido por uma embalagem plástica, de modo a proteger os geofones de umidade e poeira, já o microfone foi fixado a 1 m de altura em relação ao solo.

Após a instalação dos transdutores (geofones e microfone), o sismógrafo desenvolvido foi conectado aos mesmos e configurado para armazenar 4 segundos de registro, a 1000 amostras por segundo, por canal e habilitado para iniciar automaticamente o registro dos eventos, toda vez que os níveis de vibrações atingissem níveis iguais ou superiores a 0,350 mm/s aproximadamente.

Os testes foram realizados utilizando como fonte de energia, uma marreta de 3 kg, sendo realizados 8 "pontos de batidas" direto no solo, equidistantes do equipamento à: 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20 e 25 m. Os 6 primeiros "pontos de batidas" (2 a 15m) tiveram energia mais que o suficiente para fazer com que o equipamento iniciasse a gravação do evento, porém devido à grande atenuação do solo e à baixa energia fornecida pela marreta de 3 kg, nos "pontos de batidas" com distâncias acima de 15 m, a energia gerada foi insuficiente para fazer com que o equipamento

iniciasse o registro automaticamente. Outro fato observado, porém já esperado, foi a inexistência de uma onda sonora de baixa frequência (< 500 Hz) e com amplitude suficiente para ser registrada. Um dos registros obtidos é apresentado na Figura 40.

Mesmo que não registrando automaticamente eventos gerados por uma fonte de impacto (marreta de 3 kg) a distâncias superiores a 15 m, sabe-se que a energia liberada por uma carga explosiva ao ser deflagrada é diversas vezes (centenas a milhares de vezes) maior que a gerada pelo impacto de uma marreta.

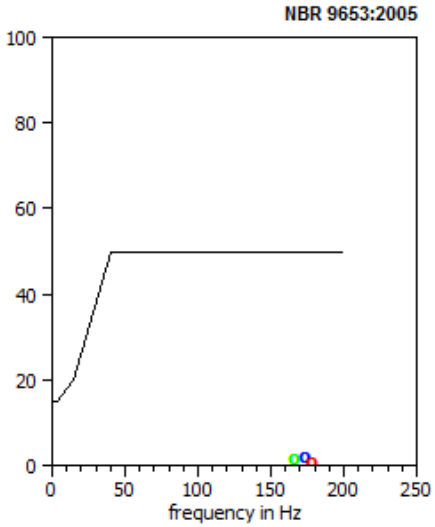
Diante do teste realizado foi possível evidenciar a praticidade com que o equipamento desenvolvido foi instalado em campo, bem como a sua operação e performance, deste modo, encorajando a execução do monitoramento de eventos reais de desmonte de rochas utilizando explosivos.

Teste de Operação - Fonte Marreta 4m

Date:	06.01.2017	**File Name:**	MarkI-event-06_01_2017-16_22_49.txt
Time:	16:22:49	**Device:**	
Location:	Caçapava do Sul - RS	**Device serial_no:**	0001
Client:	Celso Varella		
Company:	Mestrado IGc USP		
Observer:	Celso Varella		

Notes:
OBS : Fonte - Marreta 4m
Record Time : 4 s
Record Stop Mode : Auto
Unit Name : MarkI

Results:	**X**	**Y**	**Z**
vmax [mm/s]:	2.38	2.05	1.19
Dom.frequency [Hz]:	173.3	166.0	177.5
ZC-frequency [Hz]:	166.7	142.9	90.9
Time (rel.trig) [s]:	0.51	0.50	0.51
max. displacement [mm]:	0.0036	0.0048	0.0033
max. acceleration [g]:	0.2379	0.2589	0.0871
Peak vector sum:	2.39 [mm/s] at 0.51 [s]		



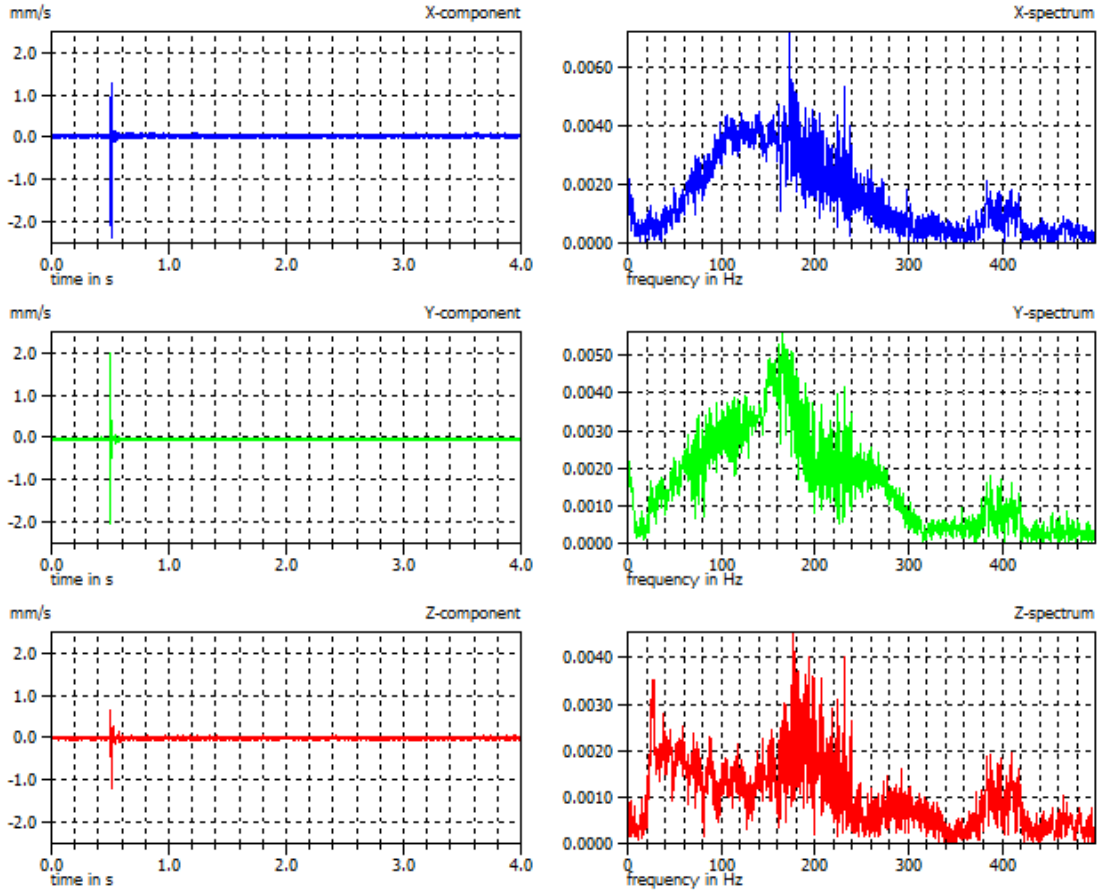


Figura 40 - Registro obtido em testes de operação no interior do Forte D. Pedro II, Caçapava do Sul - RS, fonte sísmica marreta de 3 kg, "ponto de batida" a 4 m de distância dos sensores.

5.5.3 Testes de Campo

Conforme Grogan (1998), Wheeler (2004), Segarra et al (2014), ISEE (2015) e Munaretti (2017) o correto acoplamento dos sensores é de suma importância, uma vez que afeta consideravelmente as medidas realizadas. Leituras realizadas, mesmo que por dois equipamentos, de mesma marca e modelo, instalados lado a lado irão apresentar uma leve diferença, pois nem sempre se garante o mesmo acoplamento para ambos os sensores. Deste modo, para os testes de campo foi utilizando somente o sismógrafo desenvolvido nesta pesquisa, uma vez que as diferenças no acoplamento, de hardware e sensores, poderiam apresentar valores distintos para um mesmo evento, dificultando a análise e a correlação dos resultados.

Os dados referentes aos testes de campo do sistema desenvolvido, foram adquiridos durante 3 dias de trabalho nas áreas de mineração das empresas Dagoberto Barcelos S.A. (DB) e Irmãos Cioccari & Cia Ltda (FIDA), localizadas no município de Caçapava do Sul, RS, situadas sobre as litologias apresentadas na seção 5.5.1.

No total, foram monitorados 5 eventos reais de desmonte de rocha utilizando explosivos, sendo quatro na mineradora DB e um na FIDA. Na Tabela 3, são apresentadas as coordenadas dos locais de detonação, bem como as coordenadas dos locais de monitoramento e a distância entre eles. A escolha dos pontos de monitoramento teve como premissa principal a segurança do equipamento, presença de maciço rochoso quando possível, bem como, o local que provesse a melhor razão sinal/ruído (baixa incidência de vento, tráfego de veículos e pessoas).

Tabela 3 - Coordenadas e Altitude dos centróides de detonação e monitoramento. UTM - Fuso 22J.

LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE DESMONTE E MONITORAMENTO SISMOGRÁFICO							
ID EVENTO	CENTRÓIDE DA DETONAÇÃO			CENTRÓIDE DO MONITORAMENTO			
	Long (m)	Lat (m)	Altitude (m)	Long (m)	Lat (m)	Altitude (m)	Distância (m)
Ev. 1 - DB	267657	6616386	275	267469	6616537	224	246
Ev. 2 - FIDA	268685	6620881	171	268688	6620958	161	78
Ev. 31 - DB	267386	6616672	201	267543	6616881	166	264
Ev. 32 - DB	267475	6616544	234	267543	6616881	166	350
Ev. 33 - DB	267580	6616584	189	267543	6616881	166	300

5.5.3.1 Evento 1 - DB

Conforme o boletim de desmonte (ANEXO C) foram detonados 46 furos, com 7 metros de profundidade, tampão de 2 m, distribuídos por uma malha 2x3m, sendo utilizado tubo de choque, com carga total de explosivos (ANFO + Emulsão) igual a 932 kg, onde a carga máxima por espera foi de 20,42 kg.

O sismógrafo foi configurado para adquirir mil amostras por segundo (SPS), por canal, com tempo máximo de aquisição igual a 4 segundos e o *trigger* (disparador automático) sísmico foi configurado para iniciar a gravação quando os níveis de vibração ultrapassassem o *threshold* (limites) de 0,350 mm/s. O conjunto instrumental foi instalado a uma distância de 246 m em relação ao centróide da detonação (Figura 41), onde os geofones foram fixados em rocha utilizando gesso, orientados e nivelados conforme a norma ABNT NBR 9653:2005, já o microfone foi fixado aproximadamente 1 m acima dos geofones e orientado diretamente para a frente de detonação (Figura 42).

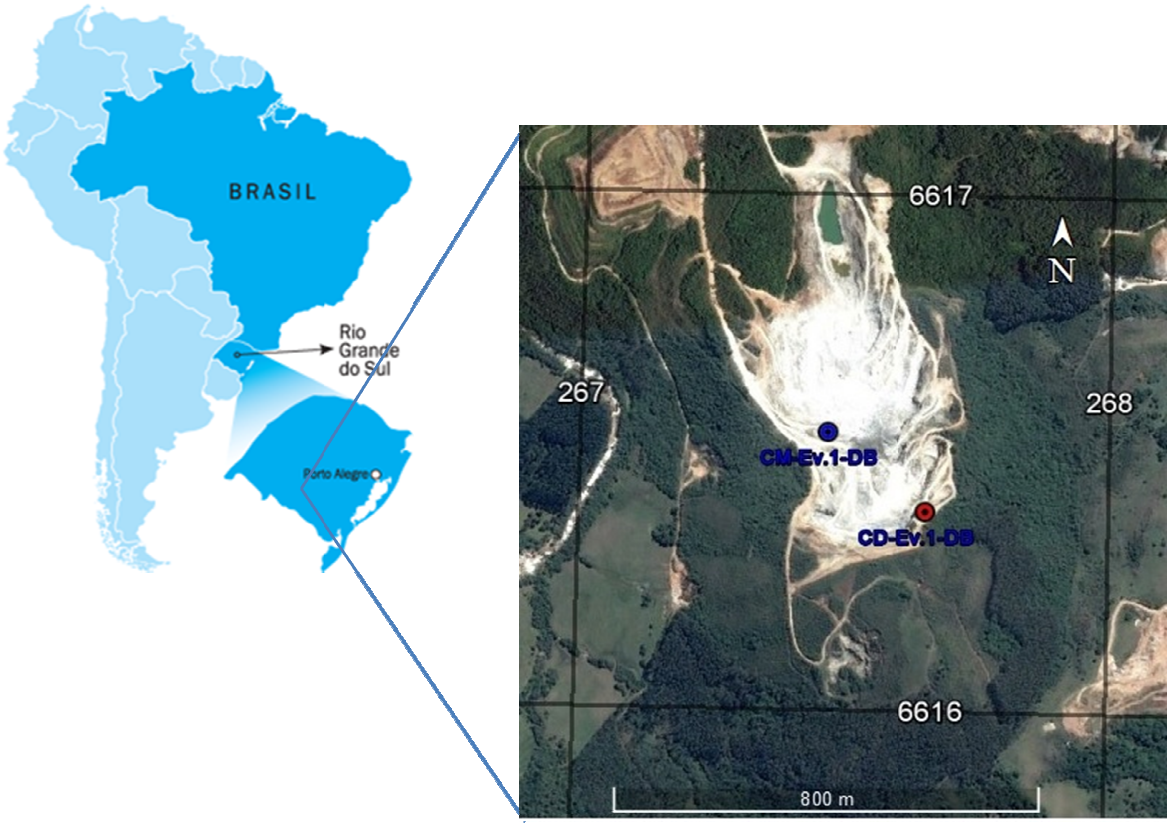


Figura 41 - Mina Cerro, DB. Mapa de localização do Centróide de Detonação (CD) e do Centróide de Monitoramento (CM) do evento "Ev.1 - DB". Coordenadas UTM, Fuso 22J.
(Google Earth Pro, 2016; Vinotech, 2017).

Figura 42 - Mina Cerro, DB. Local de instalação do conjunto sismográfico, detalhe dos geofones fixados à rocha através de gesso e microfone fixado a ~1 m de altura em relação aos geofones.

Ao analisar os registros salvos no cartão de memória, foi possível comprovar que com o valor do *threshold* (limiar) configurado para 0,350 mm/s, os ruídos ambientais e antrópicos disparavam o sistema, mesmo não ocorrendo detonações, diante disto não registrando o evento denominado de "Ev. 1 - DB". Porém este teste foi válido, corroborando com os testes de operacionalidade, onde foram necessários apenas 15 minutos para instalar e configurar todo o sistema

5.5.3.2 Evento 2 - FIDA

Com base nas informações obtidas no teste anterior (Ev. 1 - DB) e conforme sugestões de Munaretti (2017), decidiu-se alterar o valor do *threshold* de 0,350 mm/s para 1,270 mm/s, deste modo, garantindo que o sistema não dispare devido aos ruídos ambientais e antrópicos. O restante das configurações foram mantidas (1 kSPS/Canal, 4 segundos total).

Neste teste, o conjunto instrumental foi instalado o mais próximo possível do centróide do desmonte, a 78 m de distância (Figura 43) em um patamar mais abaixo. Como no local não existia a presença de um maciço rochoso, os geofones foram enterrados a uma profundidade de aproximadamente 30 cm (Figura 44), orientados em direção ao desmonte e nivelado, já o microfone foi fixado a 1 m de altura em relação ao chão, porém orientado em direção a um talude lateral, uma vez que em direção ao desmonte havia uma barreira de material proveniente do processo de mineração, impedindo uma visada direta com o local de desmonte (Figura 44).

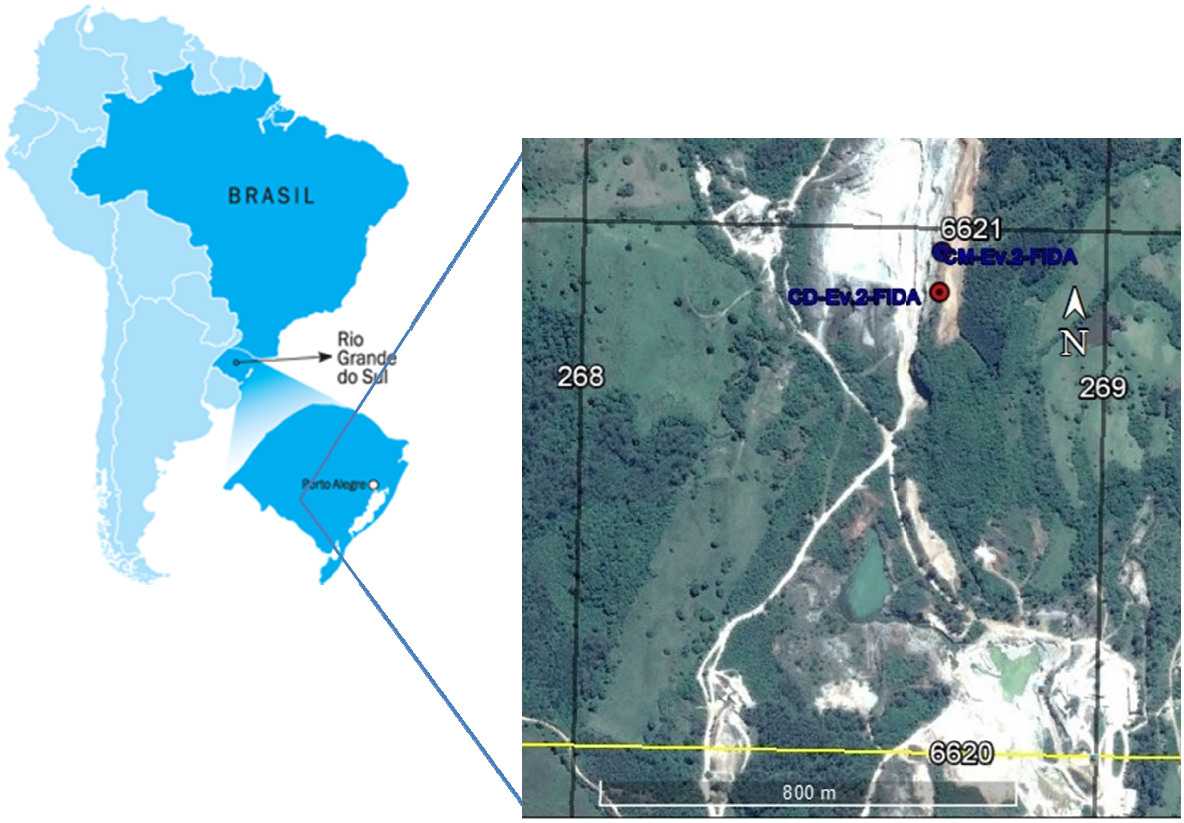


Figura 43 - Jazida Linhares, FIDA. Mapa de localização do Centróide de Detonação (CD) e do Centróide de Monitoramento (CM) do evento "Ev.2 - FIDA". Coordenadas UTM, Fuso 22J. (Google Earth Pro, 2016; Vinotech, 2017).

Segundo o boletim de detonação (ANEXO C), foram utilizados 500 kg de explosivos (emulsão), divididos em 35 furos, de 8,5 m de profundidade, onde ao invés de tubo de choque foi utilizado cordel detonante.

Ao verificar os dados salvos, foi constatado a existência de registros, sendo três referentes aos testes (inicialização e disparo forçado) pós instalação do conjunto sismográfico e um relativo ao processo de desmonte denominado de "EV.2 - FIDA". Este foi confirmado devido à coincidência de horário (detonação e arquivo) e pelas amplitudes dos sinais, deste modo, confirmando o correto funcionamento do sistema de *trigger* e do valor de *threshold* configurado.

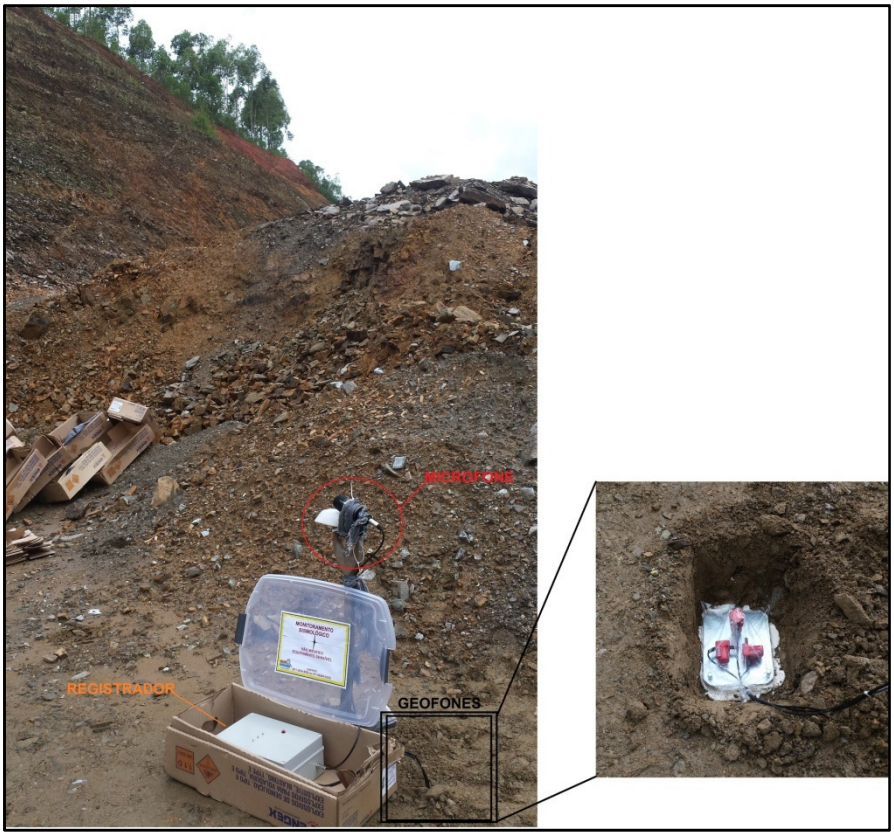


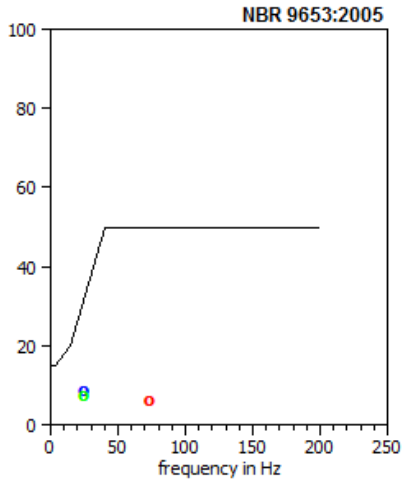
Figura 44 - Jazida Linhares - FIDA. Local de instalação do conjunto sismográfico, detalhe dos geofones enterrados e microfone fixado a ~1 m de altura em relação aos geofones e orientado em direção ao talude.

O evento registrado, foi formatado conforme o padrão de leitura do software e posteriormente processado no software REFLEX VIBRO (2016). A Figura 45 apresenta o boletim sísmico, resultado do processamento do evento "Ev. 2 - FIDA". Analisando os dados foi possível observar os altos níveis de vibrações registrados nas 3 componentes, transversal, longitudinal e vertical (X = 9.28, Y = 8.08 e Z = 6.51 mm/s respectivamente), bem como o valor de pressão sonora (2.56 Pa ou 102.14 dB). A nível espectral é visível a diferença entre as diferentes fontes (explosivo e marreta), sendo que o explosivo apresenta frequências mais baixas e bem definidas, enquanto a marreta apresenta sua energia espalhada por boa parte do espectro, contendo altas frequência. Em correlação à Norma ABNT NBR 9653:2005 (Anexo D), os níveis não ultrapassaram os limiares estipulados, conforme apresentado no gráfico de correlação presente no boletim sismográfico.

Teste de Campo - Ev. 2 - FIDA

Date: 10.01.2017
Time: 17:06:04
Location: Caçapava do Sul - RS
Client: Celso Varella
Company: Mestrado IGc USP
Observer: Celso Varella
Notes:
OBS : FIDA DETONAÇÃO REAL
Record Time : 4 s
Record Stop Mode : Auto
Unit Name : MarkI

File Name: MarkI-event-10_01_2017-17_06_04.txt
Device:
Device serial_no: 0001



Results:	X	Y	Z
vmax [mm/s]:	9.28	8.08	6.51
Dom.frequency [Hz]:	24.4	24.4	73.7
ZC-frequency [Hz]:	62.5	52.6	83.3
Time (rel.trig) [s]:	0.53	0.53	0.56
max. displacement [mm]:	0.0328	0.0337	0.0152
max. acceleration [g]:	0.4152	0.4705	0.3213

Peak vector sum: 10.27 [mm/s] at 0.53 [s]
Peak Air Pressure: **2.56 Pa (102.14 dB) @ 213.6 Hz**

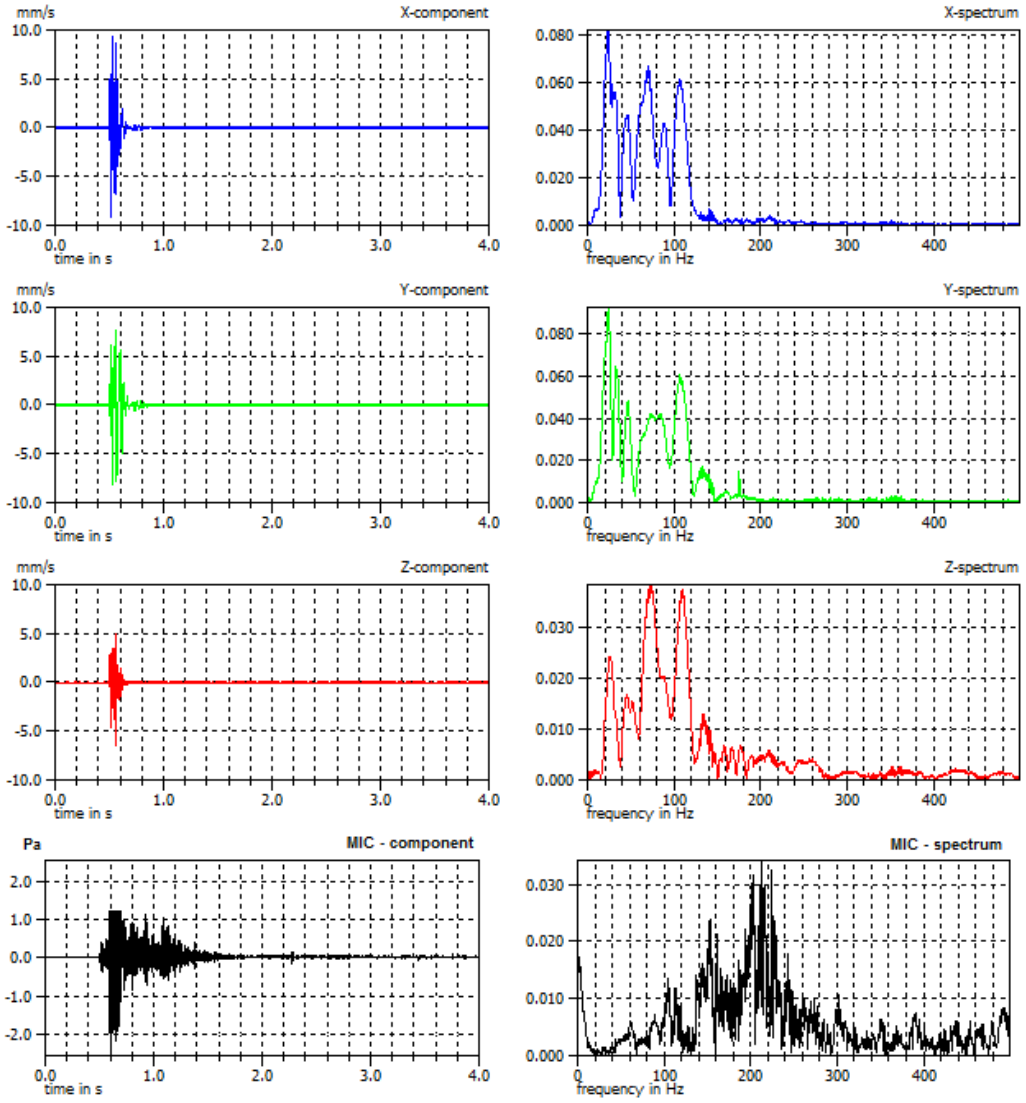


Figura 45 - Boletim Sísmico referente ao monitoramento sismográfico na jazida Linhares - FIDA.

5.5.3.3 Eventos 31, 32 e 33 - DB

De modo a testar a sensibilidade do sistema e devido às maiores distâncias entre os centróides de detonação e de monitoramento, o valor de *threshold* (limiar) foi reduzido de 1,270 mm/s para 0,750 mm/s, sendo que o restante das configurações foram mantidas (1 kSPS/Canal, 4 segundos total).

Os três eventos ocorreram em um espaço de tempo curto entre eles, impossibilitando a realocação e/ou reconfiguração do sismógrafo. Diante disso o mesmo foi instalado em um local que abrangesse os três centróides de detonação (Figura 46). Os geofones foram nivelados, orientados em direção a um ponto comum das três detonações e fixados à rocha utilizando gesso. O microfone foi fixado a 1 m de altura em relação aos geofones e também orientado em direção ao ponto comum (Figura 47).

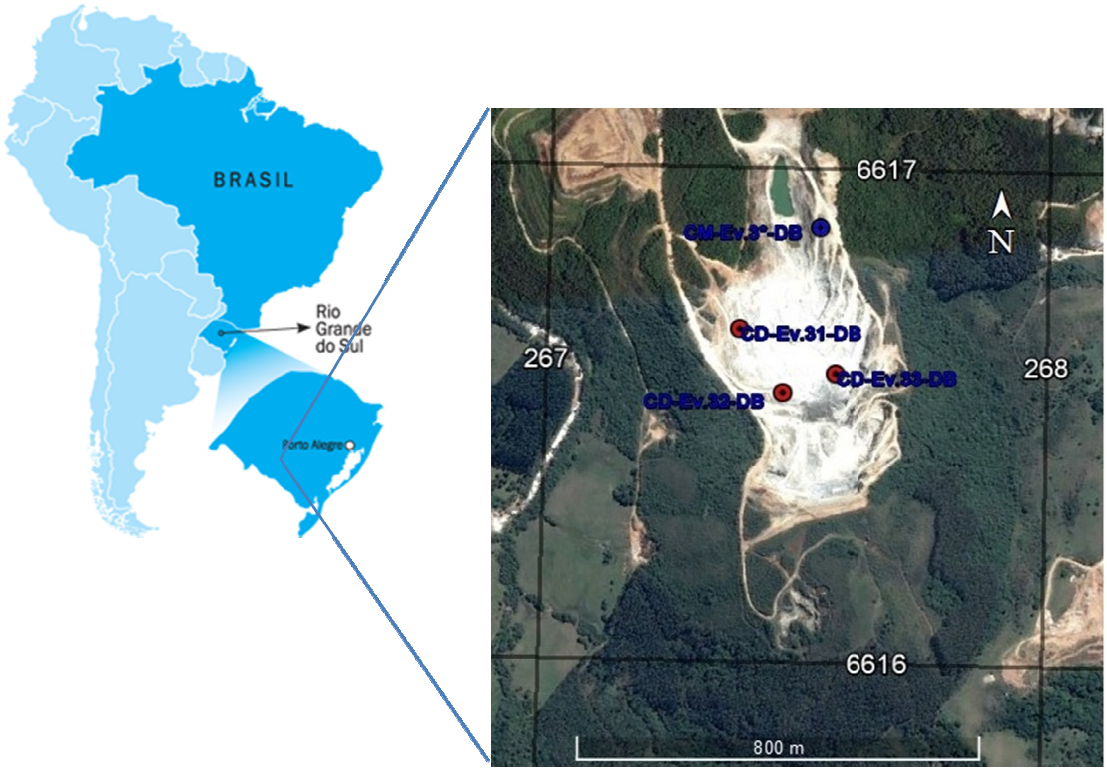


Figura 46 – Mina Mangueirão, DB. Mapa de localização dos Centróides de Detonação (CDs) e do Centróide de Monitoramento (CM) dos eventos "Ev.31, 32 e 33 - DB". Coordenadas UTM, Fuso 22J. (Google Earth Pro, 2016 Vinotech, 2017).

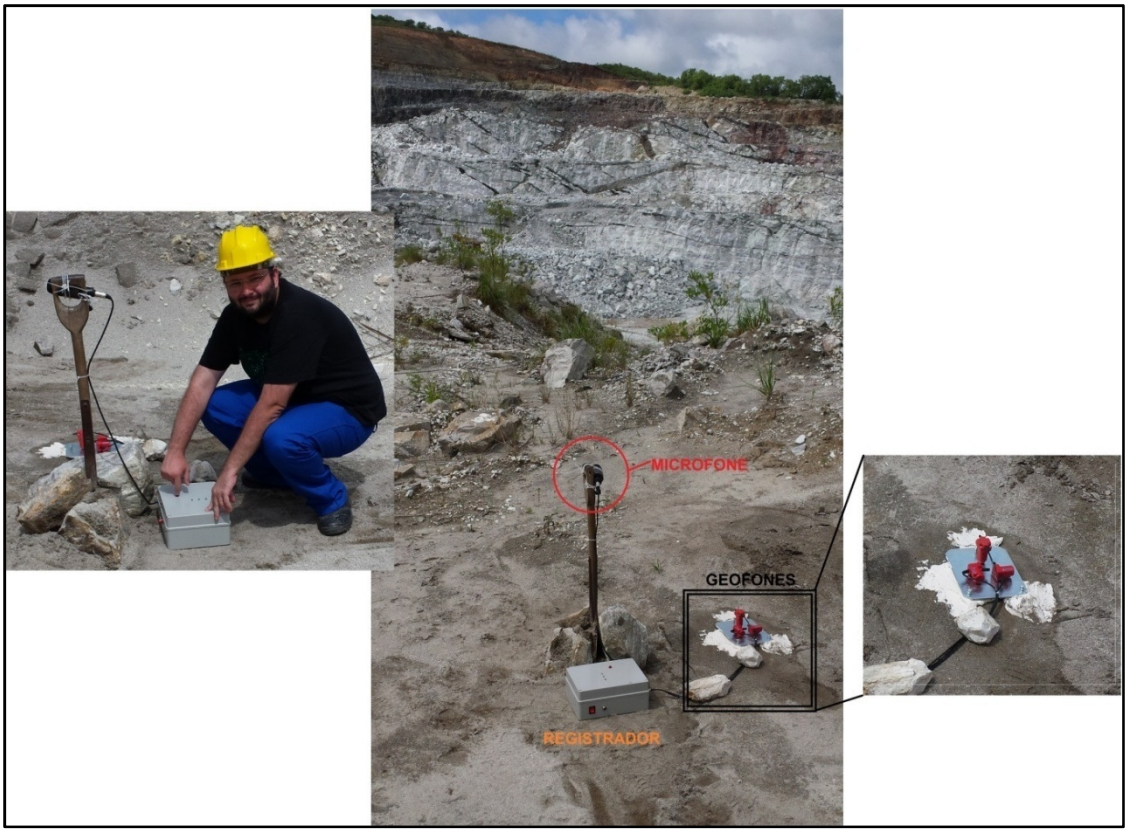


Figura 47 - Mina Mangueirão - DB. Local de instalação do conjunto sismográfico, detalhe dos geofones fixados à rocha com gesso, microfone fixado a ~1 m de altura em relação aos geofones, e orientado em direção ao ponto comum das três detonações e operador inicializando sismógrafo.

De acordo com os boletins de desmonte (ANEXO C), foi utilizado cordel detonante e cada evento contou com uma carga de explosivos, número de furos e carga máxima por espera, a saber:

Ev. 31 - DB:

- Total de Explosivos: 200,0 kg
- Número de Furos: 27
- Carga Máxima por Espera: 22,2 kg

Ev. 32 - DB:

- Total de Explosivos: 123,1 kg
- Número de Furos: 24
- Carga Máxima por Espera: 35,9 kg

Ev. 33 - DB:

- Total de Explosivos: 12,5 kg
- Número de Matacões: 14
- Carga Máxima por Espera: 12,5 kg

As detonações foram sequenciais, primeiro sendo executado o evento "Ev. 31 - DB" e posteriormente com uma diferença de tempo de aproximadamente 12 minutos os eventos "Ev. 32 - DB" e "Ev. 33 - DB" respectivamente, onde estes foram detonados a um intervalo de 40 segundos um do outro.

Ao verificar os arquivos salvos, foi constatado a existência de 2 eventos registrados, sendo estes, respectivos aos eventos "Ev. 31 - DB" e "Ev. 32 - DB", novamente constatado pela coincidência de horários e pelos níveis de vibrações registrados. Também foi verificada a inexistência do registro de pressão acústica em ambos os eventos, uma vez que apenas ruído foi registrado, deste modo, somente os registros de vibrações serão apresentados. Já em relação ao evento "Ev. 33 - DB", não houve o seu registro, provavelmente devido à natureza do desmonte, pois foram utilizados 12,5 kg de explosivos em um desmonte secundário, assim não gerando energia suficiente para disparar o sismógrafo automaticamente.

A Figura 48 apresenta o boletim sísmico referente ao evento "Ev. 31 - DB". Os níveis de vibrações registrados são 1,69, 0,78 e 0,98 mm/s (transversal, longitudinal e vertical respectivamente) e a soma vetorial igual a 1,73 mm/s. A nível espectral novamente pode ser visto um comportamento uniforme, centrado nas relativas baixas frequências e bem definido. Outra vez, se correlacionado à Norma ABNT NBR 9653:2005 (Anexo D), os níveis de vibrações registrados não excederam os limites interpostos pela norma, conforme gráfico presente no boletim sismográfico.

Na figura 49 é apresentado o boletim sísmico relativo ao monitoramento sismográfico do evento "Ev. 32 - DB". Os valores de vibrações registrados para as

três componentes são: 0,58, 0,37 e 0,95 mm/s (transversal, longitudinal e vertical respectivamente) e a soma vetorial de pico é igual à 1,09 mm/s. No domínio da frequência, novamente podemos verificar um comportamento bem definido, uniforme e centralizado nas relativas baixas frequência. Onde os limites de vibrações registrados não ultrapassaram os interpostos pela Norma ABNT NBR 9653:2005 (Anexo D).

Ainda no evento "Ev. 32 - DB" (Figura 49), foi observado também, a existência de um pico de alta frequência (356.9 Hz aproximadamente), o qual está correlacionado a níveis de vibração de baixa amplitude (0,07, 0,08 e 0,14 mm/s) situados entre 0,8 e 1 segundo. Tal comportamento, muito provavelmente deve estar relacionado ao lançamento de um bloco de rocha (ultra lançamento) próximo ao centróide de monitoramento.

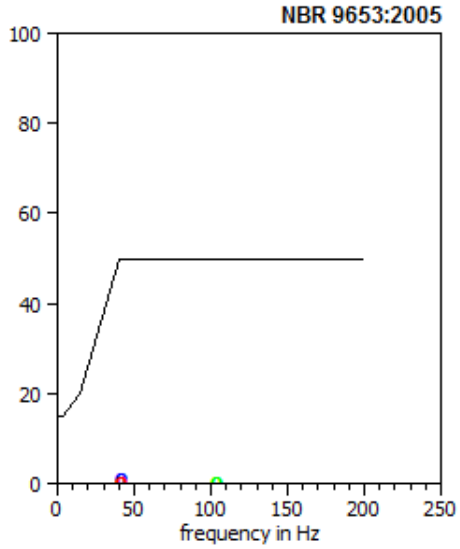
Uma vez que o conjunto sismográfico foi mantido no mesmo local, assim provendo o mesmo acoplamento dos sensores de vibração, a correlação entre os eventos "Ev. 31 - DB" e "Ev. 32 - DB", foi possível. Mesmo que realizados em diferentes horários (diferença de 12 minutos), posições, distâncias e características de fogo, espectralmente os eventos mostraram-se coerentes, onde as frequências de vibrações ficaram compreendidas entre 41.5 a 46.6 Hz em ambos os eventos, exceto a registrada no eixo longitudinal do evento "Ev. 31 - DB" com frequência igual 103,3 Hz. Temporalmente as formas de onda são parecidas, principalmente as dos canais verticais que registraram valores muito próximos (0,98 e 0,95 mm/s @ 41,5 e 43,2 Hz) com uma diferença de apenas 3%. Tais resultados corroboram com os obtidos em laboratório e de operacionalidade demonstrando a confiabilidade no sistema (registrador/sismógrafo) desenvolvido.

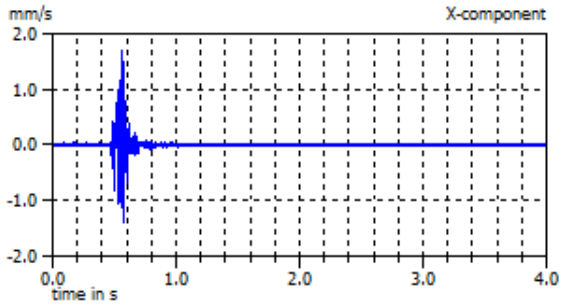
Teste de Campo - Ev.31 - DB

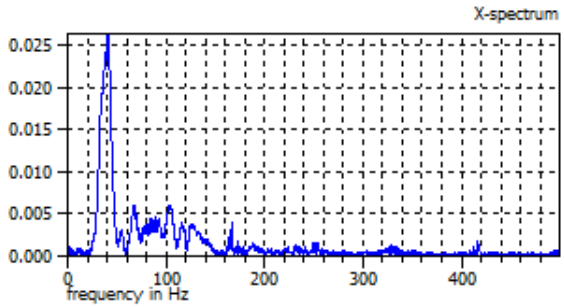
Date: 11.01.2017
Time: 12:10:08
Location: Caçapava do Sul - RS
Client: Celso Varella
Company: Mestrado IGc USP
Observer: Celso Varella
Notes:
OBS : DB DETONAÇÃO REAL 1
Record Time : 4 s
Record Stop Mode : Auto
Unit Name : MarkI

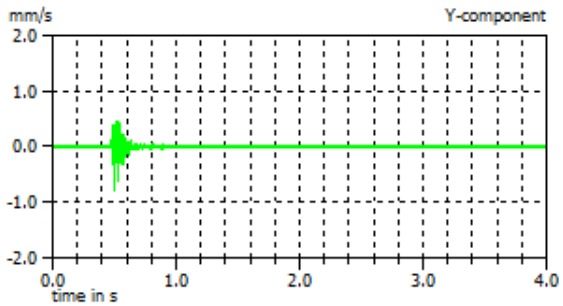
File Name: MarkI-event-11_01_2017-12_10_08.txt
Device:
Device serial_no: 0001

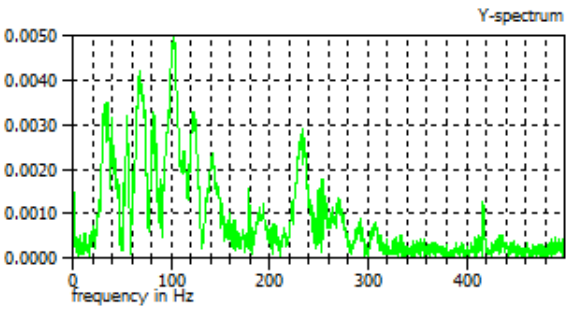
Results:	**X**	**Y**	**Z**
vmax [mm/s]:	1.69	0.78	0.98
Dom.frequency [Hz]:	41.5	103.3	41.5
ZC-frequency [Hz]:	41.7	111.1	45.5
Time (rel.trig) [s]:	0.57	0.50	0.58
max. displacement [mm]:	0.0070	0.0022	0.0039
max. acceleration [g]:	0.0519	0.0541	0.0530
Peak vector sum:	1.73 [mm/s] at 0.57 [s]		

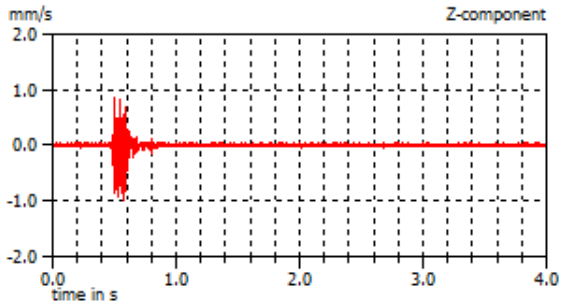












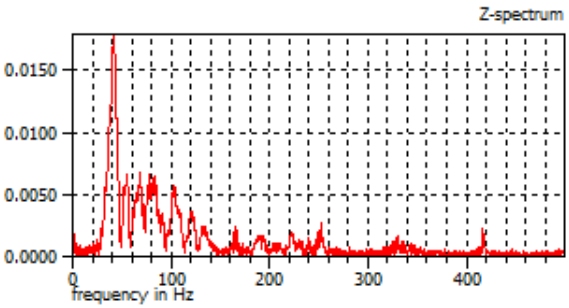


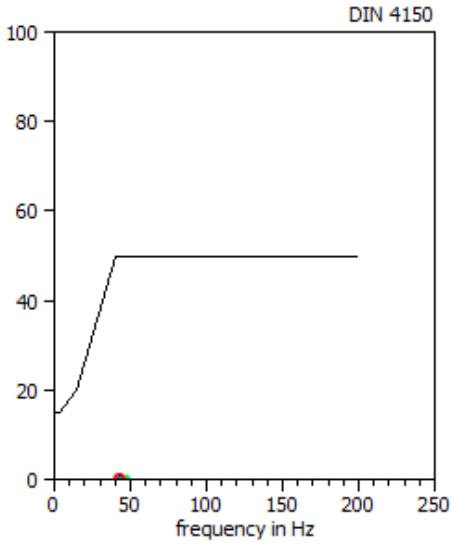
Figura 48 - Boletim Sísmico referente ao monitoramento sismográfico "Ev. 31 - DB" na mina Mangueirão - DB.

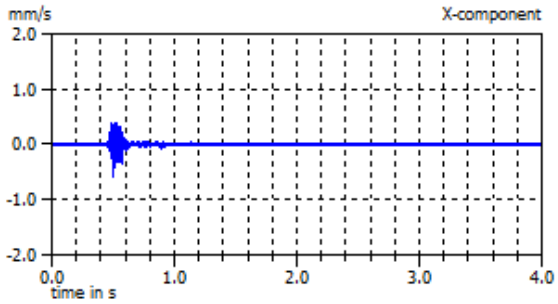
Teste de Campo - Ev.32 - DB

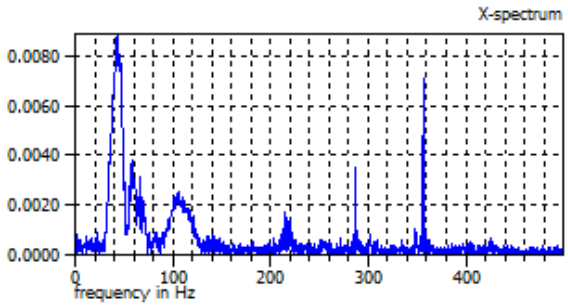
Date: 11.01.2017
Time: 12:22:52
Location: Caçapava do Sul - RS
Client: Celso Varella
Company: Mestrado IGc USP
Observer: Celso Varella
Notes:
OBS : DB DETONAÇÃO REAL 2
Record Time : 4 s
Record Stop Mode : Auto
Unit Name : MarkI

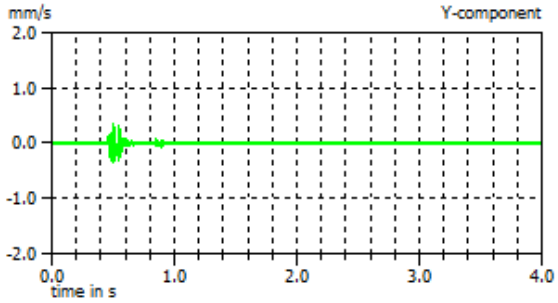
File Name: MarkI-event-11_01_2017-12_22_52.txt
Device:
Device serial_no: 0001

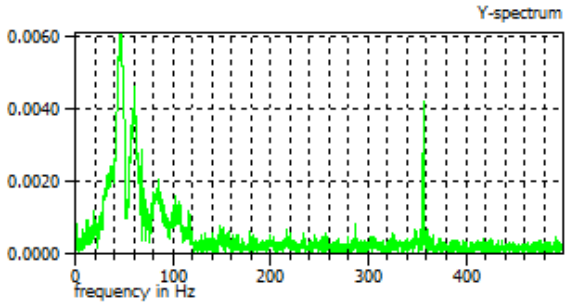
Results:	**X**	**Y**	**Z**
vmax [mm/s]:	0.58	0.37	0.95
Dom.frequency [Hz]:	43.5	46.6	43.2
ZC-frequency [Hz]:	41.7	50.0	50.0
Time (rel.trig) [s]:	0.50	0.50	0.50
max. displacement [mm]:	0.0039	0.0035	0.0040
max. acceleration [g]:	0.0238	0.0183	0.0301
Peak vector sum:	1.09 [mm/s] at 0.50 [s]		

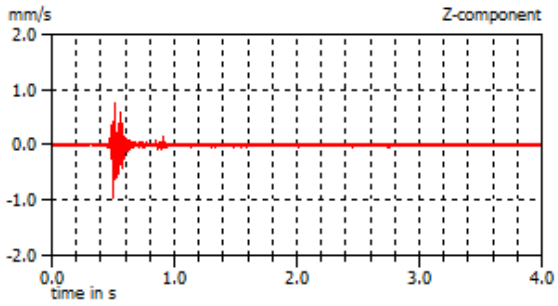












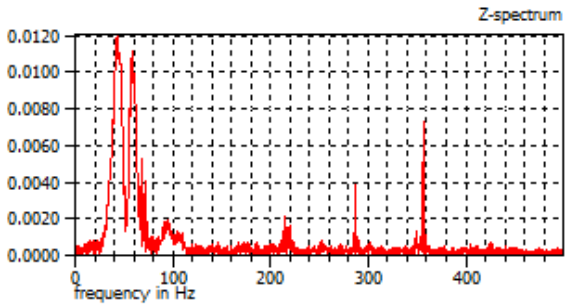


Figura 49 - Boletim Sísmico referente ao monitoramento sismográfico "Ev. 32 - DB" na mina Mangueirão - DB.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 Conclusões

A presente pesquisa objetivou o desenvolvimento e a construção de um sismógrafo (registrador) de engenharia para o monitoramento de vibrações e pressão acústica. Foi desenvolvido um protótipo, o qual foi testado tanto em laboratório, em condições controladas, como em situações reais de campo.

O equipamento desenvolvido (registrador/sismógrafo) mostrou-se factível, uma vez que os testes em laboratório demonstraram que as respostas em amplitude e frequência atendiam às necessidades para os trabalhos de monitoramento do desmonte de rochas com explosivos, conforme preconizado pela ISEE (2011).

Os testes de operação demonstraram a facilidade com que o equipamento pode ser instalado e manuseado. Bem como, evidenciou que fontes impulsivas como marreta, não geram energias em baixa frequência, fato também observado por Marchioreto (2002) com o equipamento desenvolvido em sua pesquisa.

Já os testes de campo evidenciaram a eficácia do equipamento desenvolvido, uma vez que foi possível comprovar a sua sensibilidade, através do registro automático de eventos distantes (350 m aproximadamente) do centróide do monitoramento e também por apresentar registros coerentes a nível temporal e espectral de dois diferentes eventos de desmonte, registrados no mesmo local. Sendo que este teste também corroborou com os testes de operação no quesito,

instalação e manuseio do equipamento, onde foram necessários em média 15 minutos para instalação e configuração de todo o conjunto instrumental.

Através dos resultados obtidos também foi possível fazer algumas considerações:

a. a arquitetura do sistema proposto (registrador/sismógrafo) permite a utilização de sensores (geofones e microfones) com características diferentes aos utilizados nesta pesquisa, desde que se adapte os filtros e amplificadores quando necessário;
b. o microfone utilizado, mesmo possuindo características que satisfaçam as condições de monitoramento de um evento de desmonte, falhou nos 2 últimos eventos (Ev. 31, 32 e 33 - DB);
c. a faixa dinâmica do sistema sísmico do conjunto instrumental (registrador + geofones) proposto é de ± 86 mm/s, com resolução de 0,00002 mm/s.
d. a faixa dinâmica do sistema acústico alcançado é de ± 4,46 Pa (106,9 dB), com resolução de $1x10^{-6}$ Pa. Isto é devido à relativa baixa sensibilidade do microfone e a necessidade de um ganho elevado (60 dB), assim prejudicando a faixa dinâmica do sensor.
e. o consumo do equipamento é de aproximadamente 0,2 Ah, fazendo com que o mesmo funcione no modo completo por 35 horas ininterruptamente, com uma bateria de 12V 7Ah;
f. a capacidade de armazenamento é de mais de 850.000 eventos, com 4 segundos de duração cada utilizando-se a taxa de 1kSPS por canal;
g. a arquitetura utilizada permite que seja facilmente implementada a transmissão dos dados tanto pela internet como por telefonia móvel a uma central de monitoramento;
h. o sistema, conforme foi projetado, pode ser construído a um custo relativamente baixo (R$ 10.000,00 - cerca de US$ 2.800,00).

Finalmente, considerando-se que, na eventualidade de montagem de vários equipamentos similares, o custo por unidade tende a baixar, tornando maior a viabilidade deste equipamento ser utilizado em situações em que o monitoramento contínuo seja requerido.

6.2 Sugestões

Devido a sua plataforma modular, diversas outras modificações podem ser realizadas tanto a nível de hardware como de software. Deste modo, pode ser implementado um sistema operacional de tempo real, possibilitando a otimização do tempo do processador, fazendo com que as amostras coletadas em tempo real sejam enviadas ao operador via *Bluetooth* ou conexão ethernet, bem como, fazer com que o sistema ao mesmo tempo que salve os dados referentes a um evento finalizado em cartão de memória, possa monitorar outro evento, ambos ao mesmo tempo.

Também pode ser implementado um sistema de baixo consumo, fazendo com que o sistema entre em modo de hibernação e somente seja ativado em horários específicos, pré programados, assim aumentando o tempo de trabalho, somente com uma bateria de 12V 7Ah.

É possível, também, implementar um sistema de calibração interna por pulso, bem como, realizar o processo de calibração do mesmo em mesa vibratória, em empresa certificada pela INMETRO, conforme o especificado na Norma ABNT NBR 9653 (2005).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABADI E SILVA, L. A. Estudo da Efetividade de Barreiras de Amortecimento no Controle de Vibrações Geradas pelo Desmonte com Explosivos em Mina de Carvão à Céu Aberto. 2005. 141 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ADDICORE. Addicore Ywrobot Breadboard Supply Module, 2015. Acessado em: 11 dez. 2016, Disponível em: <http://digsys.upc.es/rpi/comp/PS_Schematic.pdf>

ALANO, M. A. V. Pesquisa de Calcário: relatório final. Caçapava do Sul, 1974.

ARM mbed. Boards FRDM-K64F. 2016a. Acessado em: 15 dez. 2016, Disponível em: <https://developer.mbed.org/platforms/FRDM-K64F/>

ARM mbed. Developer Site. 2016b. Acessado em: 17 out. 2015, Disponível em:<https://developer.mbed.org/>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9653**:** Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2005.

MTE - BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. NR 19 – Explosivos, 2011. Acessado em: 14 ago. 2015, Disponível <http://acesso.mte.gov.br/data/files/8A7C812D302E6FAC013032FD75374B5D/nr_19.pdf>

CPRM. COMPANHIA DE PESQUISA DE RECUROSOS MINERAIS. 2000. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Cachoeira do Sul, Folha SH.22-Y-A. Estado do Rio de Grande do Sul. Escala 1:250.000. Organizado por Carlos Alfredo Porcher e Ricardo da Cunha Lopes. Brasília.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. DD-052: Avaliação e monitoramento das operações de desmonte de rocha com uso de explosivos na mineração - Procedimento. São Paulo, 2015.

CORONATO, E. M. F. Sistema de Monitoramento de Tremores de Terra. 2007. 44 f. Trabalho de Formatura – Núcleo de Ciências Exatas e Tecnológicas: Engenharia da Computação, Centro Universitário Positivo, Curitiba.

CRAIG, K. Digitization: Sampling & Quantization. 2011. 56 diapositivos Acessado em: 27 set. 2015, Disponível em:<http://multimechatronics.com/images/uploads/mech_n/Digitization%20KCC%202011.pdf>

CTI Audio, Inc. CAD KBM412 DYNAMIC MICROPHONE, 2000. Acessado em: 01 dez. 2016, Disponível em: <http://recordinghacks.com/pdf/cad/kbm412_manual.pdf>

DALLORA NETO. C. Análise das Vibrações Resultantes do Desmonte de Rocha em Mineração de Calcário e Argilito Posicionada Junto à Área Urbana de Limeira (SP). 2004. 82 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

DALLORA NETO, C. & FERREIRA, G. C. Controle de Vibrações Geradas por Desmonte de Rocha com Explosivos. Estudo de Caso: Calcário Cruzeiro, Limeira (SP). São Paulo: UNESP, Geociências, v. 25, n. 4, p. 455-466, 2006.

DA SILVA, J. M. & TAVARES, V. G. Conversores Analógico/Digital e Digital/Analógico. 2005. 31 diapositivos. Acessado em: 17 set. 2015, Disponível em: <http://paginas.fe.up.pt/~jms/E3/conversoresAD.pdf>

DA SILVA JR, P. A. Amplificadores a Transistor. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Curso de Telecomunicações – Área de Conhecimento: Eletrônica I. 32 p. 2013.

DA SILVA, M. J. Sistemas Microcontrolados: Aula 8 - Conversores A/D e D/A. 2012. 15 diapositivos. Acessado em: 28 set. 2015, Disponível em:

DE AGUIRRE, P. C. C. Projeto e Análise de Moduladores Sigma-Delta em Tempo Contínuo Aplicados à Conversão AD. 2014. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
DE LIMA, M. E. Eletrônica Básica: Conversão Digital Analógico e Analógico Digital. 2013. 27 diapositivos. Acessado em: 17 set. 2015, Disponível em: <http://www.cin.ufpe.br/~es238/arquivos/aulas/aula14_conversores_adda.pdf>

DE OLIVEIRA, D. R. Projeto de Filtros Digitais IIR com Técnicas de Computação Evolucionária. 2011. 93 f. Dissertação (Mestrado) –Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica do Paraná, Curitiba.

DE OLIVEIRA, J. R. A Aplicação de Microfones em Projetos Digitais. DCA-FEEC, UNICAMP, 2010.Acessado em: 20 ago. 2015, Disponível em: <http://adessowiki.fee.unicamp.br/media/Attachments/courseEA079_1S2010/MainPage/microfones.pdf>

DE SOUZA, S. A. Introdução aos Microcontroladores ARM Cortex-M4 Tiva C Series da Texas Instruments. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2015. Acessado em: 5 out. 2015, Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgv0gAJ/introducao-aos-microcontroladores-arm-cortex-m4-tiva-c-series-texas-instruments#>

DO NASCIMENTO, E. J. Amostragem e Conversão A/D. 2013. 72 diapositivos. Acessado em: 18 set. 2015, Disponível em: <http://www.univasf.edu.br/~edmar.nascimento/pcom/pcom_slide05.pdf>

EARL. B. Memory Architectures. 2013. Acessado em: 5 out. 2015, Disponível em: <https://learn.adafruit.com/memories-of-an-arduino/arduino-memory-architecture>

ELTSCHLAGER, K. K. Blast Vibration and Seismograph Section 2002.International Society of Explosives Engineers, v.1, 2003.

EVENDEN, B, S. & STONE, D, R. 1976. Seismic Prospecting Instruments: Instrument Performance and Testing. Gebruder Bomtraeger. V2. 196p.

EYGLYS, K. Conversão Analógica - Digital. 2009. 20 diapositivos. Acessado em: 17 set. 2015, Disponível em: <http://www.dca.ufrn.br/~eyglys/std/ad/analogicodigital.pdf>

FAMBRINI, F. Microcontroladores PIC Linguagem C. 2015.48 diapositivosAcessado em: 4 out. 2015, Disponível em: <http://pt.slideshare.net/ffambrini/microcontroladores-pic-ling-c-unicamp>

FERNANDES, T. G. & PANAZIO, A. N. Do Analógico ao Digital: Amostragem, Quantização e Codificação, 2009. Acessado em: 17 set. 2015, Disponível em: <http://ic.ufabc.edu.br/II_SIC_UFABC/resumos/paper_5_74.pdf>

FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. Kinetis K64F Sub-Family Data Sheet. 2014a. 87 p. (Relatório nº K64P144M120SF5).

FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. FRDM-K64F Freedom Module User's Guide. 2014b. 21 p. (Relatório nº FRDMK64FUG).

FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. Kinetis Design Studio V2.0.0 User Guide. 2014c. 21 p. (Relatório nº KDS200UG).

FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. Getting Started with Kinetis SDK (KSDK). 2014d. 56 p. (Relatório nº KSDKGSUG).

GOOGLE EARTH PRO. Version 7.1.7.2606: Google Inc, 2016.

GROGAN, A. A Review of Suggested Geophone Attachment Methodologies From Commonly Referred to Monitoring Standards. International Society of Explosives Engineers, 9 p.,1998.

HAVSKOV, J. & ALGUACIL, G. Instrumentation in Earthquake Seismology.2002.

HOLDEN, B. Low Frequency Improvements to Commercial Geophones. 2014. 24 f. A Thesis (Master) –Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, The Division of Electrical and Computer Engineering.

HOLLENTHONER, S. Micro-Processors and Micro-Controllers. 2007. Acessado em: 5 out. 2015 Disponível em: <http://www.inin.gob.mx/mini_sitios/documentos/ATMega8.pdf>

HONS, M. S. Seismic Sensing: Comparison of Geophones and Accelerometers Using Laboratory and Field Data. 2008. 173 f. A Thesis (Master) – Department of Geoscience, University of Calgary, Calgary.

HUTCHISON, P. E. W.; GRIGORYAN, P. G. E.; LORSBACH, G. Significant Sources of Error in the Seismograph Error Budget. International Society of Explosives Engineers, v.1, 2005.

ION Product. Sensor Geophones. Acessado em: 28 ago. 2015 Disponível em: <http://www.iongeo.com/content/documents/Resource%20Center/Brochures%20and%20Data%20Sheets/Brochures/BR_SEN_Geophones_091509.pdf>

ISEE - International Society of Explosives Engineers. Performance Specifications for Blasting Seismographs 2011 Edition. Cleveland: ISEE, 2011.

ISEE - International Society of Explosives Engineers. The Blasters' Handbook 18th Ed, 1030 p. Cleveland: ISEE, 2011 A.

ISEE - International Society of Explosives Engineers. ISEE Field Practice Guidelines for Blasting Seismograph 2015. Cleveland: ISEE, 2015.

KOPPE, J. C.; SALVADORETTI, P.; MUNARETTI, E.; COSTA, J. F. C. L. Monitoramento Geofísico de Desmonte de Rocha com Utilização de Explosivos em Condições de Risco Elevado em Zona Urbana. Rem, Ver. Esc. Minas, Ouro Preto, v. 54, n. 4, p. 273-280, 2001. Acessado em: 19 ago. 2015, Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672001000400007&lng=en&nrm=iso>

KOPPE, J. C. Segundo Seminário de Perfuração e Desmonte - VALE: Impactos Ambientais do Desmonte de Rochas com Uso de Explosivos, 2012.

KLIMACH, H. PGMICRO – MIC46 Projeto de Circuitos Integrados Analógicos MOS - Filtros. UFRGS-INF, 2014. Acessado em: 19 ago. 2015, Disponível em: <https://chasqueweb.ufrgs.br/~hklimach/MIC46/MIC46_Filtros.pdf>

KLIMACH, H. Amplificadores Operacionais. ELE00006 – Eletrônica Avançada, UFRGS-DELET PPGEE. 2012. Acessado em: 17 ago. 2015, Disponível em: <https://chasqueweb.ufrgs.br/~hklimach/Docs/El_Avanc_Op_Amp.pdf>

KULKARNI, S. R. ELE 201 Introduction to Electrical Signals and Systems: Sampling and Quantization. 2002. Acessado em: 27 set. 2015, Disponível em: <https://sisu.ut.ee/sites/default/files/imageprocessing/files/digitizn.pdf>

LABCENTER ELECTRONICS. Proteus 8 Professional, version 8.1, SP1, 2014.

LEET, L. D. (1945) A three-component portable seismograph for the measurement of vibration. Eos Trans. AGU, v. 26, n. 1, p. 33-36.

LEÓN, A. D. A. Microphone and Geophone Data Analysis for Noise Characterization and Seismic Signal Enhancement. 2009. 145 f. A Thesis (Master) – Department of Geoscience, University of Calgary, Calgary.

MARCHIORETO, A. Implementação, Testes e Avaliação do Método SASW (Spectral Analysis of Surface Waves). 2002. 123 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MUNARETTI, E. Comunicação Pessoal. 2017.

MUSSOI, F. L. R. Resposta em Frequência Filtros Ativos. CEFET - Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, Gerência Educacional de Eletrônica,2a. Ed, 85 p. 2004.

OKI, N. & MANTOVANI, S. C. A. TEEE I - Projeto de Robôs Móveis. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - Departamento de Engenharia Elétrica. 2013. Acessado em: 5 out. 2015, Disponível em: <http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/microcontrolador_atmel_1-1.pdf>

PERTENCE JR, A. ELETRÔNICA ANALÓGICA: Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos.Editora bookman, 8a. Ed, 311 p., 2015.

PUHLMANN, H. Conversor A/D – Trazendo o Mundo Real para Dentro do Processador. Embarcados. 2015. Acessado em: 18 set. 2015, Disponível em: <http://www.embarcados.com.br/conversor-a-d/>

RANGER, E. R. Demonstration System for Low-Power Seismic Detector and Classifier. 2003. 230 f. A Thesis (Master) – Departament of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.

REED, J. L. Seismographs – An Historical Overview. International Society of Explosives Engineers, v.1, 7 p. 2005.

SANDMEIER SCIENTIFIC SOFTWARE. Reflex Vibro. version 1.4, 2016.

SANTIS, L. D. Na Analysis of Recent Accidents During Use of Commercial Explosives. International Society of Explosives Engineers, v. 2, 10 p., 2003.

S.C. IPROMIN S.A. BUCHAREST. Assessment Study on the Seismic Effect of Blasting Explosions on the Protected Sites and Methods Used to Mitigate this Effect of Explosions – Control and Monitoring Procedures – Rosia Montana. Bucharest, 42 p., 2011.

SEGARRA, P.; SANCHIDRIÁN, J. A.; CASTILLO, I. del.; LÓPEZ, L. M.; CASTEDO, R. Rock-to-Sensor Transmissibility of Vibration. International Society of Explosives Engineers, 11 p., 2014.

SHEARER, P. M. Introduction to Seismology.Cambridge University Press, 2a.Ed, 396 p. 2009.

SILVA-CASTRO, J. J. Blast Vibration Modeling Using Improved Signature Hole Technique for Bench Blast. 2012. 236 f. A Thesis (PhD) – College of Engineering, University of Kentucky, Lexington.

SIMAS, E. Disciplina: Processamento Digital de Sinais: Aula 03 – Filtros Digitais. UFBA – Departamento de Engenharia Elétrica, 2014. 91 diapositivos. Acessado em: 25 ago. 2015, Disponível em: <http://www.dee.eng.ufba.br/home/simas/PDS_aula03.pdf>

SUNFULL.PS(H)-4.5B low frequency geophone, 2016. Acessado em: 01 dez. 2016, Disponível em: <http://www.sunfull.com/content/?91.html>

SUNFULL.PS(H)-1 low frequency geophone, 2015. Acessado em: 19 out. 2015, Disponível em: <http://www.sunfull.com/upLoad/product/month_1501/201501211403426131.pdf>

TAIOLI, F. & PALM, N. Manual Técnico do Analisador de Velocidade de Partículas – ADVP-C. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, Relatório 14.589 – IPT, 1981, 26p.

TAIOLI, F. Desenvolvimento e Testes de Sistema Sismográfico de Alta Resolução. 1992. 133 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

TAIOLI, F. Informação Pessoal. 2016.

TEVES, A. da C. Otimização de Acelerômetros MEMS Eletroestáticos de Alto Desempenho. 2013. 128 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, São Paulo.

TEXAS INSTRUMENTS, INC. Application Report: A Single -Supply Op-Amp Circuit Collection, 2000.

TEXAS INSTRUMENTS, INC. FilterPro Desktop, version: 3.1.0.23446, 2010.

TEXAS INSTRUMENTS, INC. TL07xx Low-Noise JFET-Input Operational Amplifier, 2015.

TEXAS INSTRUMENTS, INC. ADS1220 4-Channel, 2-kSPS, Low-Power, 24-BIT ADC with Integrated PGA and Reference, 2016.

UTHEIM, T. & CASANOVA, U. V. Norwegian National Seismic Network – Technical Report No. 21: SEISLOG – Linux Embedded Systems. Bergen, 2006.

VALENÇA, U. DA S. Um Pouco da História dos Explosivos Através de Seus Descobridores. Revista Militar de Ciência e Tecnologia, v. XVIII, p. 43-62, 2001.

VERAKIS, H. & LOBB. T. Mine Blasting Safety: Decades of Progress. International Society of Explosives Engineers, 11 p., 2012.

VINOTECH. Mapa RS PoA e B Gonçalvez. Acessado em: 26 mar. 2017, Disponível em:< http://vinotech.com.br/imagens/MapaRSPoAeBGoncalves.png>

YAZDI, N.; AYAZI, F.; NAJAFI. K. Micromachined Inertial Sensors. Proceedings of the IEEE, v. 86, n. 8, p. 1640-1659, 1998.

YNOGUTI, C. A. Processamento Digital de Sinais: Conversão A/D e D/A. 2004. 31 diapositivos. Acessado em: 18 set. 2015, Disponível em: <http://www.inatel.br/docentes/ynoguti/component/docman/doc_download/16-digitalizacao>.

WHEELER, R. The Importance of Proper Seismometer Coupling. International Society of Explosives Engineers, 14 p., 2004.

ANEXO A

FLUXOGRAMA DO *FIRMWARE* DE CONTROLE

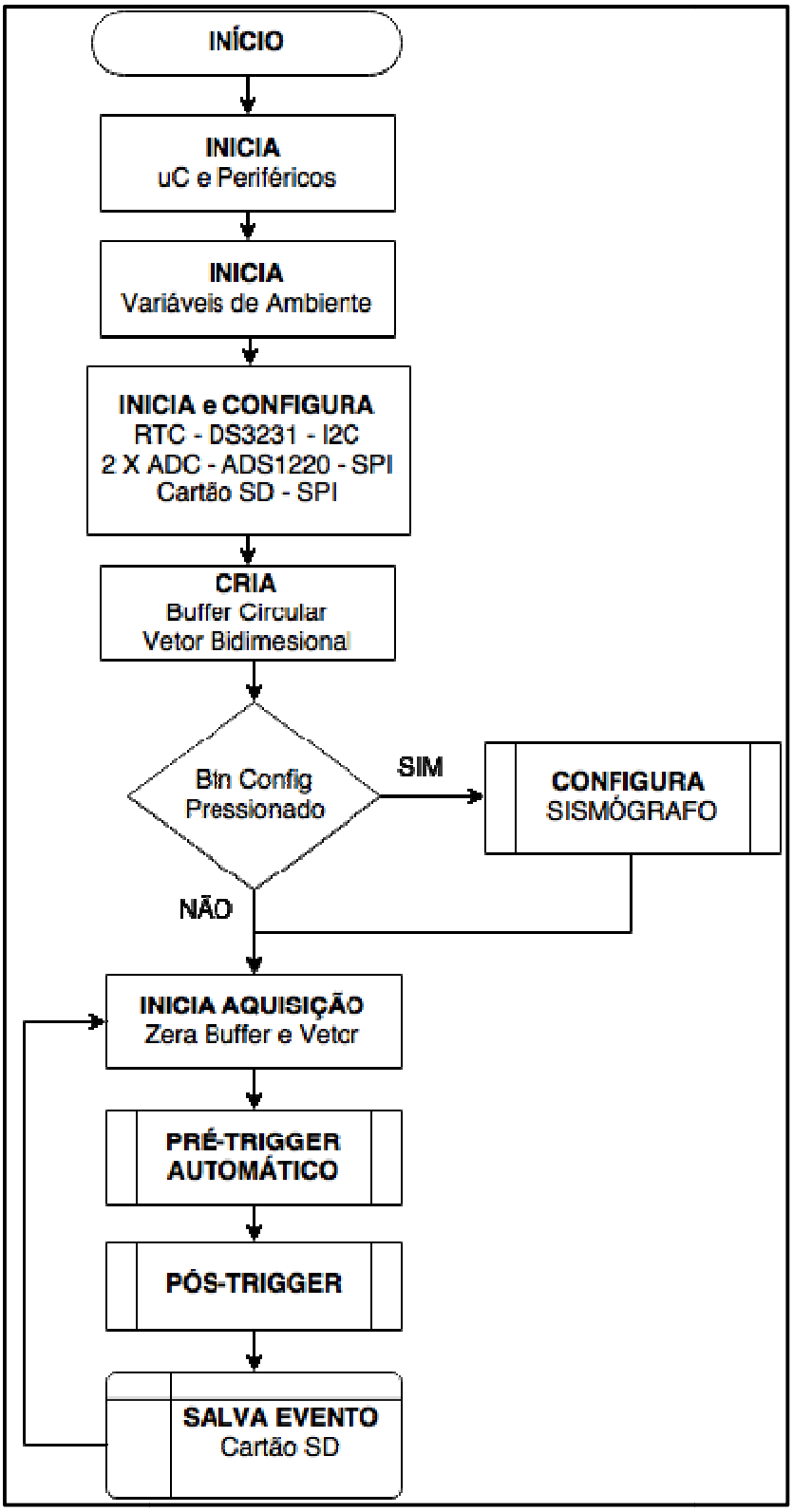


Figura A1 - Fluxograma do bloco principal do *firmware* de controle do sismógrafo.

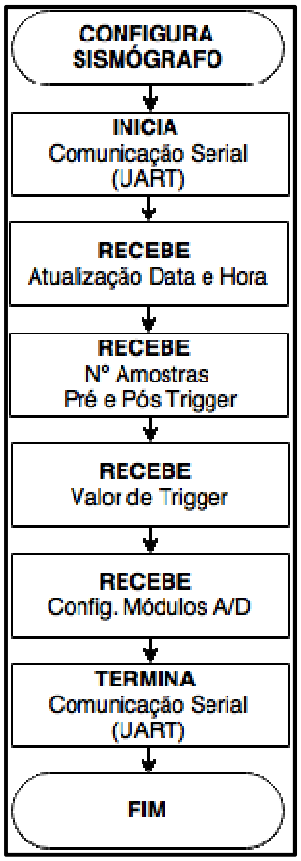


Figura A2 - Fluxograma do bloco de configuração do sismógrafo.

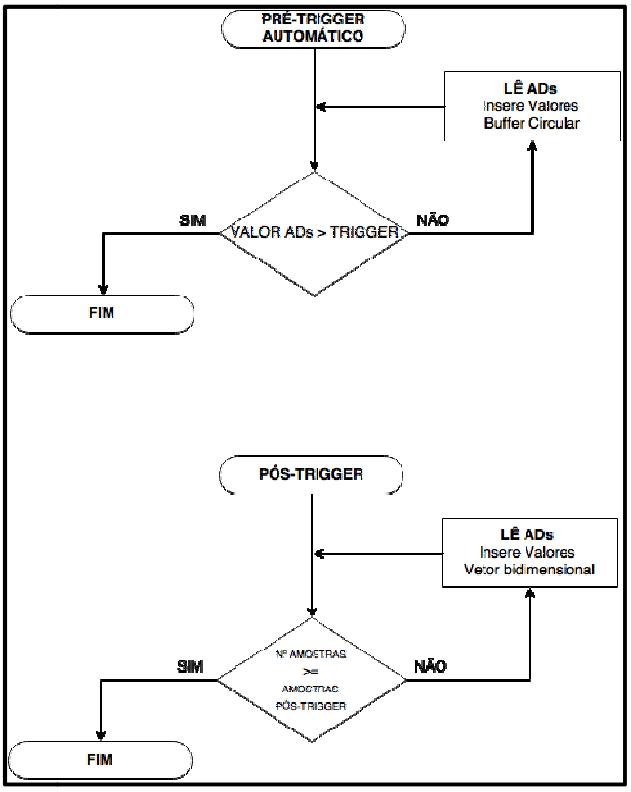


Figura A3 - Fluxogramas dos blocos de pré e pós *trigger*.

ANEXO B

SISMÓGRAFO

Foto 1 - Blindagem de caixa plástica, utilizada para evitar ruídos externos no instrumental eletrônico.

Foto 2 - Vista superior, LEDs indicativos de status e botão de configuração.

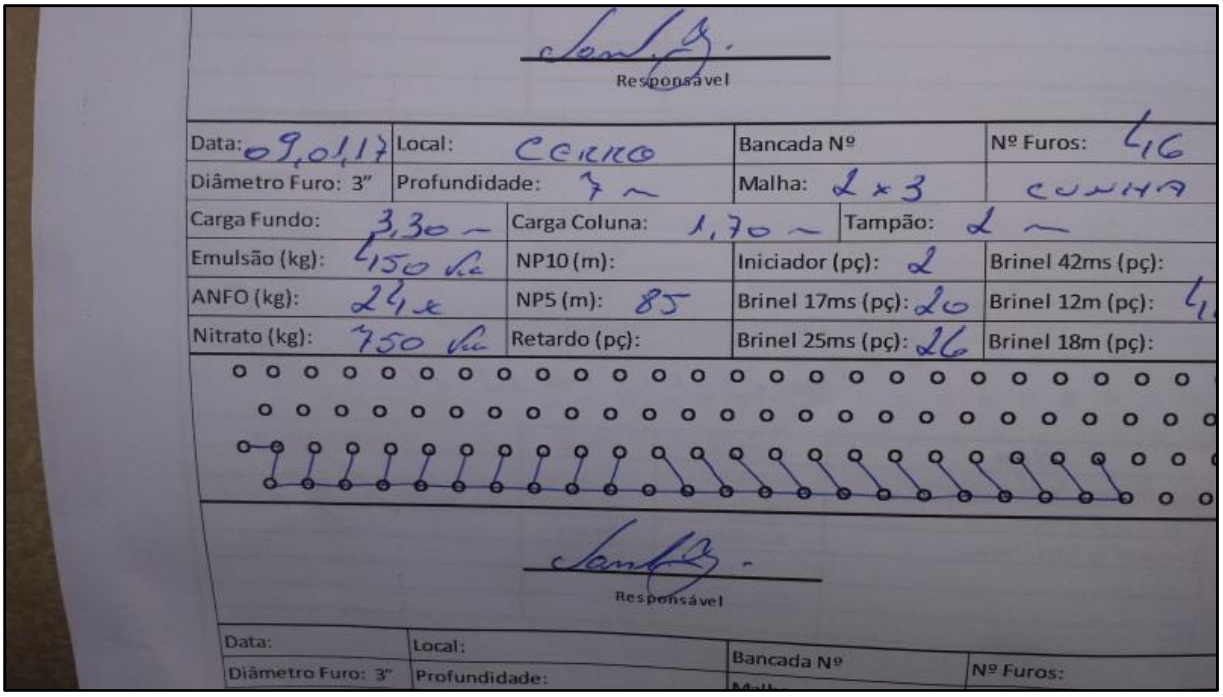
Foto 3 - Montagem do sismógrafo, vista das placas de processamento, conversão A/D e circuitos analógicos (Filtros e Amplificador).

Foto 4 - Vista parcial do sismógrafo, contendo todo o instrumental eletrônico.

Foto 5 - Vista das partes superior e inferior do sismógrafo, contendo todo o instrumental eletrônico.

ANEXO C

BOLETINS DE DETONAÇÃO



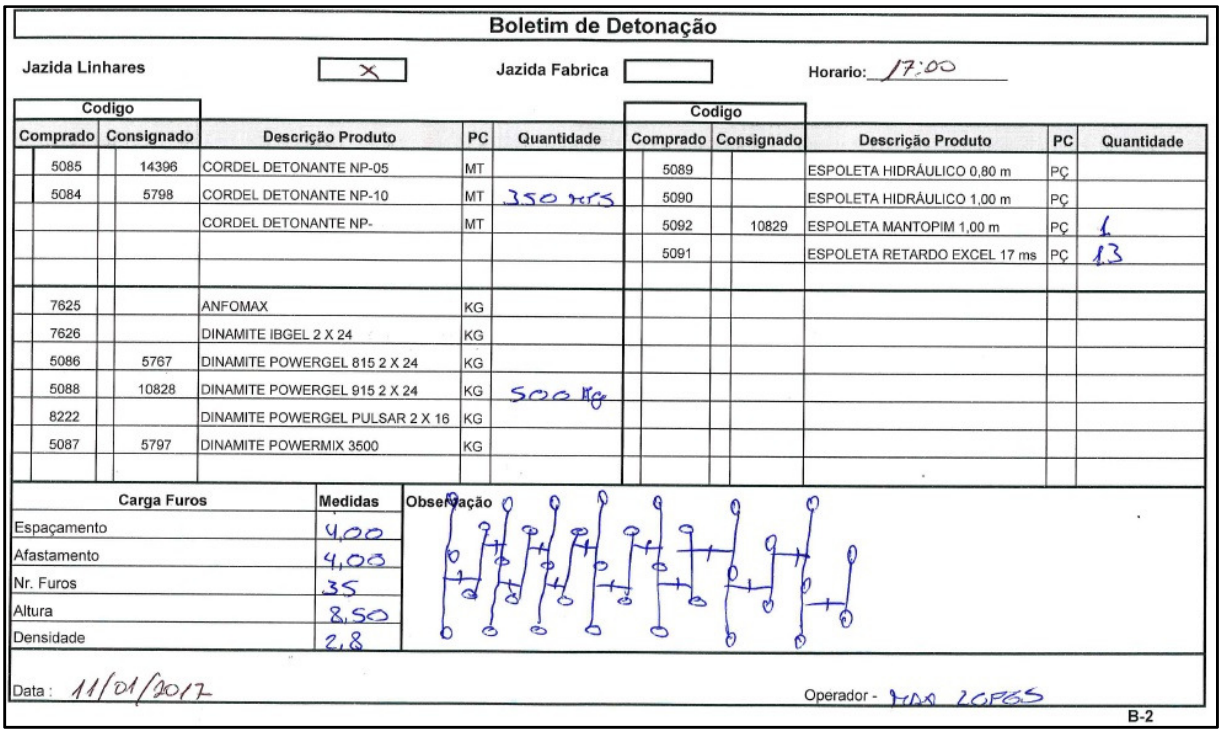
Responsável

Data: 09.01.17	Local: CERRO	Bancada Nº	Nº Furos: 46
Diâmetro Furo: 3"	Profundidade: 7 m	Malha: 2 x 3	CUNHA
Carga Fundo: 3,30 m	Carga Coluna: 1,70 m	Tampão: 2 m	
Emulsão (kg): 150 kg	NP10 (m):	Iniciador (pç): 2	Brinel 42ms (pç):
ANFO (kg): 24 x	NP5 (m): 85	Brinel 17ms (pç): 20	Brinel 12m (pç): 4
Nitrato (kg): 750 kg	Retardo (pç):	Brinel 25ms (pç): 26	Brinel 18m (pç):

Responsável

Data:	Local:	Bancada Nº	Nº Furos:
Diâmetro Furo: 3"	Profundidade:		

Figura C1 - Boletim de desmonte do evento "Ev. 1 - DB". Fornecido pela empresa Dagoberto Barcelos S.A.



Boletim de Detonação

Jazida Linhares [X] Jazida Fabrica [ ] Horario: 17:00

Codigo Comprado	Codigo Consignado	Descrição Produto	PC	Quantidade	Codigo Comprado	Codigo Consignado	Descrição Produto	PC	Quantidade
5085	14396	CORDEL DETONANTE NP-05	MT		5089		ESPOLETA HIDRÁULICO 0,80 m	PÇ	
5084	5798	CORDEL DETONANTE NP-10	MT	350 mts	5090		ESPOLETA HIDRÁULICO 1,00 m	PÇ	
		CORDEL DETONANTE NP-	MT		5092	10829	ESPOLETA MANTOPIM 1,00 m	PÇ	1
					5091		ESPOLETA RETARDO EXCEL 17 ms	PÇ	13
7625		ANFOMAX	KG						
7626		DINAMITE IBGEL 2 X 24	KG						
5086	5767	DINAMITE POWERGEL 815 2 X 24	KG						
5088	10828	DINAMITE POWERGEL 915 2 X 24	KG	500 kg					
8222		DINAMITE POWERGEL PULSAR 2 X 16	KG						
5087	5797	DINAMITE POWERMIX 3500	KG						

Carga Furos	Medidas
Espaçamento	4,00
Afastamento	4,00
Nr. Furos	35
Altura	8,50
Densidade	2,8

Observação

Data: 11/01/2017 Operador - FIDA LOPES

B-2

Figura C2 - Boletim de desmonte do evento "Ev. 2 - FIDA". Fornecido pela empresa Irmãos Cioccari e Cia Ltda.

Bancada de minério lado oeste da cava: "Ev. 31 - DB"
total de explosivos 200,0 kg, 27 furos, carga máx. por espera: 22,2 kg.

Granito (bancada superior): "Ev. 32 - DB"
total de explosivos 123,1 kg, 24 furos, carga máx. por espera: 35,9 kg.

Matacões: "Ev. 33 - DB"
total de explosivos 12,5 kg, 14 matacões, carga máx. por espera: 12,5 kg.

E-mail C1 - Boletim de desmonte dos eventos "Ev. 31, 32 e 33 - DB". Fornecidos pela Dagoberto Barcelos S.A.

ANEXO D

LIMITES DE VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO - ABNT NBR9653 - 2005

TABELA D - Limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixas de frequência.

Faixa de Freqüência	Limite de Velocidade de vibração de partícula de pico
4 Hz a 15 Hz	Iniciando em 15 mm/s aumenta linearmente até 20 mm/s
15 Hz a 40 Hz	Acima de 20 mm/s aumenta linearmente até 50 mm/s
Acima de 40 Hz	50 mm/s
NOTA -Para valores de freqüência abaixo de 4 Hz deve ser utilizado como limite o critério de deslocamento de partícula de pico de no máximo 0,6 mm (de zero a pico)	

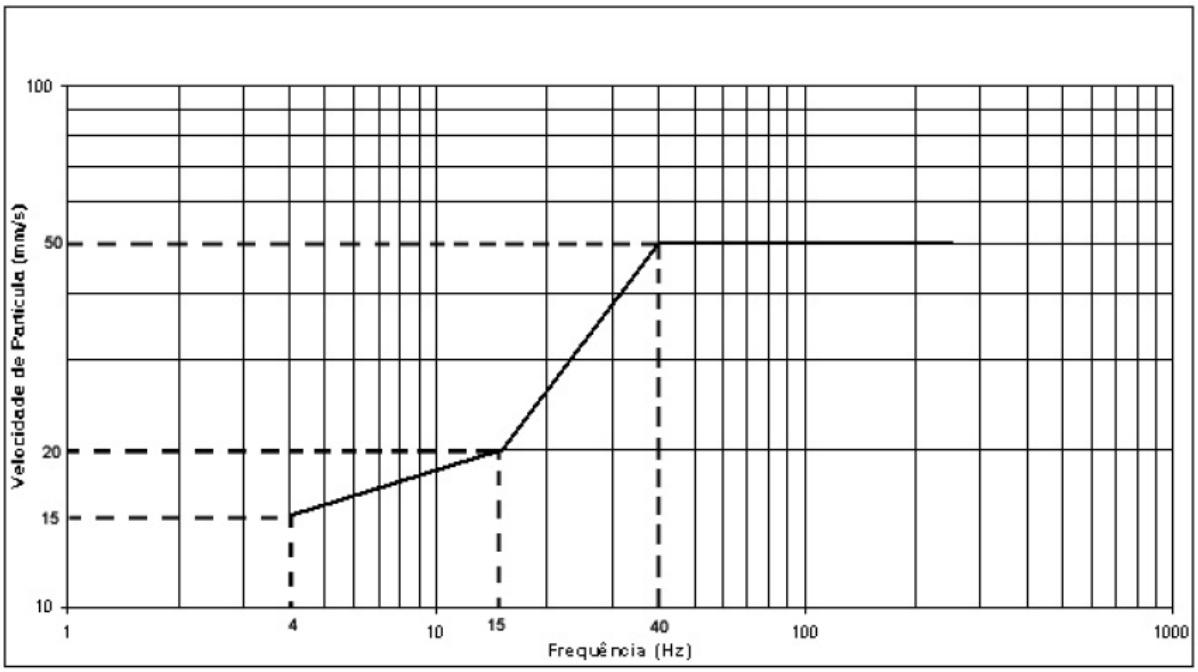


Figura D - Representação gráfica dos limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixas de frequência.