



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS NATURAIS E DA
SAÚDE - DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA



SEMINÁRIO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
MONOGRAFIA

LUIZ FELIPE LEMPÊ

ANÁLISE DA RELAÇÃO SINAL/RUÍDO DE UM DISPOSITIVO SÍSMICO
CONFECCIONADO A BAIXO CUSTO UTILIZANDO OS SENSORES
GEOFONE E ACELERÔMETRO MEMS.

ALEGRE (ES)
DEZEMBRO/2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS NATURAIS E DA
SAÚDE - DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA



SEMINÁRIO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
MONOGRAFIA

LUIZ FELIPE LEMPÊ

ANÁLISE DA RELAÇÃO SINAL/RUÍDO DE UM DISPOSITIVO SÍSMICO
CONFECCIONADO A BAIXO CUSTO UTILIZANDO OS SENSORES
GEOFONE E ACELERÔMETRO MEMS.

“Monografia apresentada como
requisito parcial para a obtenção do
título de Geólogo pela Universidade
Federal do Espírito Santo”

ALEGRE (ES)
DEZEMBRO/2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS NATURAIS E DA
SAÚDE - DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA



SEMINÁRIO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
MONOGRAFIA

LUIZ FELIPE LEMPE

ANÁLISE DA RELAÇÃO SINAL/RUÍDO DE UM DISPOSITIVO SÍSMICO
CONFECCIONADO A BAIXO CUSTO UTILIZANDO OS SENSORES
GEOFONE E ACELERÔMETRO MEMS.

“Monografia apresentada e aprovada como requisito parcial para a obtenção do título de geólogo pela Universidade Federal Do Espírito Santo.”

ORIENTADOR: PROF. Dr. Sc. ROBERTO COLISTETE JUNIOR

ALEGRE (ES), 7 DE DEZEMBRO DE 2018

BANCA EXAMINADORA:

D. Sc. Roberto Colistete Júnior

D. Sc. Éder Carlos Moreira

M. Sc. Jenesca Florencio Vicente de Lima

“Pois quando a sabedoria entrar no teu
coração, e o conhecimento for agradável à tua alma, bom siso te guardará e a inteligência te
conservará”
(Rei Salomão)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por ter me concedido a honra de chegar até aqui, o que a princípio parecia impossível. Contudo, todas as coisas foram conduzidas conforme o Seu querer e a Sua vontade.

Também agradeço a minha família por todo apoio e carinho concedido à distância nas horas em que eu mais precisava. Em especial, ao meu pai Luiz Cezar e minha mãe Maria José por tudo que fizeram e fazem por mim, além de acreditarem no meu potencial e proporcionarem esse momento tão especial em minha vida.

Agradeço as minhas avós Ilza Cezar, Nilcéia Rodrigues e minha querida bisavó Diana por todas as bênçãos desejadas a mim. Saibam que todas elas foram importantes para essa grande conquista.

Agradeço aos meus amigos Vitor Schettino e Filipe Pirovani que contribuíram neste projeto, se empenhando ao máximo para que tudo desse certo.

Ao meu orientador Roberto Colistete que sempre foi muito paciente comigo, além de excelente professor, não medindo esforços para compartilhar seu conhecimento e experiência.

Agradeço também a professora Jenesca Lima que despertou meu interesse pela geofísica e que contribuiu de uma forma especial para que eu chegasse até aqui.

Ademais, agradeço a todos que colaboraram para essa grande conquista e desejo que Deus esteja sempre com vocês.

RESUMO

A sismologia se baseia na aquisição e análise de ondas sísmicas originadas por atividades naturais que se propagam por meio do substrato rochoso até alcançar a superfície. Contudo, as ondas sísmicas podem ainda ser originadas por meio de sismos induzidos, como os que ocorrem nas atividades de mineração e petrolífera. Quando essas ondas sísmicas alcançam a superfície, são utilizados dispositivos ao longo da superfície para a sua detecção, como geofones, hidrofones e acelerômetro MEMS (Sistema Micro-Eletromecânicos). A utilização de sensores sísmicos apresenta grande aplicações na área da Geofísica Aplicada, uma vez que a popularização de sensores, atuadores e microcontroladores tornou esses materiais mais acessíveis, possibilitando o desenvolvimento de dispositivos para aplicações em diversos segmentos. Assim, verifica-se aplicações em centros de sismologia, companhias de segurança, atividades de mineração e petrolíferas e em outras áreas. O principal objetivo deste trabalho foi analisar a relação sinal/ruído (SNR) de um dispositivo sísmico confeccionado a baixo custo, utilizando dois sensores: geofone SM-24 e acelerômetro MEMS LSM303D. Para tanto, foi desenvolvido um software para leitura de sinais sísmicos captados pelos sensores, que, posteriormente, foram analisados no domínio do tempo e frequência. Realizou-se testes experimentais em laboratório, tanto em ambiente amortecido (vibração do ambiente) como ambiente vibratório (vibração induzida) a fim de se calibrar os sensores através de parâmetros configuráveis, de forma a se obter a melhor SNR. Após análise dos testes em laboratório, fez-se amostragem de dados em ambiente externo, com o objetivo de captar dados reais. A amostragem dos dados foi realizada numa Ponte do bairro Vila do Sul, Alegre-ES e no campus da UFES em Alegre. Os resultados dos testes em laboratório e de campo (ambiente externo) demonstraram que o geofone apresenta alta SNR para vibrações de baixas frequências, enquanto o acelerômetro MEMS para vibrações de frequências intermediárias. Tendo conhecimento do custo de dispositivos sísmicos no mercado atual, o desenvolvimento desse dispositivo a baixo custo torna viável e acessível sua aplicação em sismologia, assim como em diversas outras áreas.

PALAVRAS-CHAVE: Geofísica, Sensores, Análise de sinais.

ABSTRACT

Seismology is based on the acquisition and analysis of seismic waves originated by natural activities that propagate through the rocky substratum until reaching the surface. However, seismic waves can still be originated through induced earthquakes, such as those occurring in mining and oil activities. When these seismic waves reach the surface, devices are used along the surface for their detection, such as geophones, hydrophones and MEMS Accelerometer (Micro-Electromechanical System). The use of seismic sensors presents great applications in the area of Geophysics Applied, since the popularization of sensors, actuators and microcontrollers made these materials more accessible, allowing the development of devices for applications in several segments. Thus, there are applications in seismology centers, security companies, mining and oil activities and in several other areas. The main objective of this work was to analyze the signal-to-noise ratio (SNR) of a low-cost seismic device using two sensors: SM-24 geophone and LSM303D MEMS accelerometer. For that, a software was developed to read seismic signals captured by the sensors, which were later analyzed in the time and frequency domain. Experimental laboratory tests were performed in both the damped environment (environment vibration) and the vibrating environment (induced vibration) in order to calibrate the sensors through configurable parameters, in order to obtain the best SNR. After laboratory tests analysis, data were sampled in an external environment to capture real data. The data were sampled at a Bridge in the Vila do Sul neighborhood, Alegre-ES, and at the UFES campus in Alegre. The results of laboratory and field tests (external environment) demonstrated that the geophone presents high SNR for low frequency vibrations, while the MEMS accelerometer for intermediate frequency vibrations. Being aware of the cost of seismic devices in the current market, the development of this device at low cost makes its application feasible and accessible in seismology such as several others areas.

KEYWORDS: Geophysics, Sensors, Signal Analysis.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 JUSTIFICATIVA	14
1.2 OBJETIVO	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 MÉTODOS SÍSMICOS.....	14
2.2 PROPAGAÇÃO DE ONDAS SÍSMICAS	15
2.3 SENSORES	19
2.3.1 Geofone	20
2.3.2 Acelerômetro	23
2.4 RASPBERRY PI SHAKE.....	24
2.5 AQUISIÇÃO DE DADOS.....	26
2.5.1 Transdutores.....	27
2.5.2 Sinais.....	27
2.5.3 Condicionamento de sinal.....	28
2.5.4 Frequência de amostragem	29
2.5.5 Resolução.....	30
2.5.6 Hardware de aquisição	30
2.5.7 Driver e software de aplicação.....	35
2.6 ANÁLISE ESPECTRAL.....	35
2.7 FILTRAGEM DIGITAL.....	36
3 MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO E TESTES EM LABORATÓRIO.....	37
3.1.1 Hardware, sensores e parâmetros configuráveis.....	37
3.1.2 Software de leitura e análise.....	40
3.2 MEDIÇÕES EM CAMPO.....	43
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
4.1 RESULTADOS DAS AMOSTRAGENS EXPERIMENTAIS	44
4.1.1 parâmetros configurados	44
4.1.2 Análise de eventos sísmicos e espectros de frequência.....	45
4.2 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES EM AMBIENTE EXTERNO.....	47
4.2.1 Aquisição de dados na ponte do Bairro Vila do Sul	47

4.2.2 Aquisição de dados em ambiente afastado	50
4.3 TRABALHOS FUTUROS	53
5 CONCLUSÃO	54
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principais componentes de um sismo. Fonte: DOMINGOS (2006).	16
Figura 2. Representação da frente de onda e do raio sísmico. Fonte: DOMINGOS (2006). .	16
Figura 3. Movimentos de partículas e deformação do terreno das ondas de corpo: ondas P (A); ondas S (B). Fonte: KEAREY <i>et al.</i> , 2009.....	17
Figura 4. Movimento das partículas geradas pela passagem das ondas <i>Rayleigh</i> . Fonte: KEAREY <i>et al.</i> , 2009. Modificado por MOLINA, 2012.....	18
Figura 5. Movimento das partículas geradas pela passagem das ondas L. Fonte: KEAREY <i>et al.</i> , 2009.....	19
Figura 6. Geofone modelo SM-24 usado no dispositivo. Fonte: SPARKFUN, 2018.....	20
Figura 7. Esquema do funcionamento de um geofone. Fonte: Modificado de LORENZO, 2018.	21
Figura 8. Curva da resposta em frequência: Sensibilidade x Frequência do geofone SM-24. Fonte: Modificado de SPARKFUN, 2018.	22
Figura 9. Esquema de um acelerômetro MEMS. C1 e C2 são capacitores formados pelas placas do eletrodo. A massa de prova é seccionada pela pastilha central (Esquerda). Placa GY-89 com acelerômetro MEMS modelo LSM303D (Direita). Fonte: Modificado de KRAFT, 1997.....	24
Figura 10. Mapa de estação sismográfica monitorando em tempo real os últimos eventos sísmicos usando Raspberry Shake. Fonte: RASPBERRY SHAKE, 2018.	25
Figura 11. Software do Raspberry Shake realizando monitoramento de um terremoto. Fonte: RASPBERRY SHAKE, 2018.....	25
Figura 12. Configurações possíveis de sensores no dispositivo sísmico. Fonte: Modificado de RASPBERRY SHAKE, 2018.....	26
Figura 13. Sistema padrão de aquisição de dados. Fonte: NATIONAL INSTRUMENTS, 2006. Modificado por HORSTMANN, 2007.	27
Figura 14. Raspberry Pi 3 (modelo 3B). Fonte: Raspberry Pi Foundation, 2018.	31
Figura 15. Modelo otimizado, mais leve, menor custo, tamanho e consumo de bateria. Fonte: Autor, 2018.	33
Figura 16. ADC modelo ADS1115 usado no dispositivo sísmico. Fonte: JUMIA, 2018.	33
Figura 17. Sensores acoplados ao microcomputador de placa única. A esquerda, o acelerômetro (azul); no centro, Raspberry Pi com placa ADC 16 bits (vermelho) e KEYES (vermelho) com extensor de GPIO; na direita, o geofone. Fonte: Autor, 2018.	38

Figura 18. Aplicação de estatística e análise gráfica de dados experimentais da aceleração tridimensional (X, Y e Z) obtidos por meio do sensor acelerômetro LSM303D, utilizando a plataforma IDLE (Python 3). Fonte: Autor, 2018.	41
Figura 19. Parte do software próprio responsável por fazer a aquisição de sinais dos sensores concomitantemente. Fonte: Autor, 2018.	41
Figura 20. Parte do software próprio responsável por importar os dados sísmicos do geofone que são armazenados na lista “dados.csv” e posteriormente, representa os sinais no domínio do tempo e frequência para análise. Fonte: Autor, 2018.	42
Figura 21. Representação gráfica dos dados do geofone no domínio do tempo (esquerda) e domínio da frequência (direita).	42
Figura 22. Sistema de aquisição de dados sísmicos em ambiente externo compostos pelos sensores Geofone SM-24 e acelerômetro MEMS LSM303D acoplados a um microcomputador de placa única Raspberry Pi 3B e uma tela WAVESHARE de 7 polegadas. Todo sistema é alimentado por um carregador portátil com capacidade de aproximadamente 10.000 mAh. Fonte: Autor, 2018.	43
Figura 23. Medições experimentais dos sensores geofone SM-24 e acelerômetro MEMS LSM303D em ambiente amortecido (ruído de fundo). Fonte: Autor, 2018.	46
Figura 24. Medições experimentais dos sensores geofone SM-24 e acelerômetro MEMS LSM303D em ambiente vibratório (vibração induzida). Fonte: Autor, 2018.	47
Figura 25. Ponte no bairro Vila do Sul onde foi feita a aquisição de dados (esquerda); sistema de aquisição de sinais sísmicos sobre a ponte (direita). Fonte: Autor, 2018.	48
Figura 26. Eventos sísmicos registrados pelos sensores geofone e acelerômetro MEMS durante a amostragem de 1200 segundos. Fonte: Autor, 2018.	48
Figura 27. Evento sísmico gerado por um caminhão discriminado no domínio do tempo e o seu respectivo espectro de frequência referente aos sensores geofone e acelerômetro MEMS. Fonte: Autor, 2018.	49
Figura 28. Resultados do evento sísmico gerado por um carro representado no domínio do tempo e o seu respectivo espectro de frequência referente aos sensores geofone e acelerômetro MEMS. Fonte: Autor, 2018.	50
Figura 29. Dispositivo sísmico de aquisição (esquerda); local onde foi feita a medição (direita). Fonte: Autor, 2018.	50
Figura 30. Domínio do tempo da oscilação de fundo captado pelos sensores geofone SM-24 e acelerômetro MEMS LSM303D. Fonte: Autor, 2018.	51
Figura 31. Análise de um intervalo de tempo em relação ao tempo total de amostragem. Fonte: Autor, 2018.	52

Figura 32. Espectro de frequência com maior resolução dos sinais amostrados. Fonte: Autor, 2018.....	53
------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Especificações técnicas do datasheet do geofone modelo SM-24. Fonte: Modificado de SENSOR NEDERLAND, 2018.....	22
Tabela 2. Especificações técnicas do datasheet do acelerômetro MEMS LSM303D. Fonte: STMICROELECTRONICS, 2013.....	24
Tabela 3. Especificações técnicas do Raspberry Pi 3B. Fonte: ELEMENT14, 2018.	31
Tabela 4. Especificações de um ADC 16 Bits. Fonte: Adafruit, 2018. Modificado de Oliveira, 2017.....	32
Tabela 5. Erro máximo teórico associado aos 3 modelos de ADC's avaliados. Fonte: Modificado de Oliveira, 2017.	34
Tabela 6. Custo total com o hardware atual e otimizado. Fonte: Autor, 2018.....	34
Tabela 7. Consumo de energia de acordo com as configurações de hardware. Fonte: Autor, 2018.....	34
Tabela 8. Parâmetros configuráveis para o ADC do geofone (<i>Gain</i> , <i>Rate</i> e <i>dT</i>) e software para representação dos sinais no domínio do tempo e frequência (<i>dT</i> e <i>Fs</i>). Fonte: Modificado de ADAFRUIT, 2018.....	39
Tabela 9. Parâmetros configuráveis para o acelerômetro MEMS LSM303D. Fonte: Modificado de STMICROELECTRONICS, 2013.....	39
Tabela 10. Análise teórica e prática da densidade de ruído do acelerômetro. Fonte: Pirovani, 2018.....	40
Tabela 11. Parâmetros configurados para os sensores.....	44

1 INTRODUÇÃO

A sismologia se baseia na aquisição e análise de ondas sísmicas originadas através de atividades naturais (terremotos) que se propagam em subsuperfície por meio dos estratos rochosos. Entretanto, as ondas sísmicas podem ter origem a partir de sismos induzidos por fontes controladas, como explosões em atividades de mineração e petrolíferas. Essas ondas de energia ao se propagarem em profundidade, tem a sua velocidade em função de fatores como o tipo de rocha, a densidade dos materiais e estruturas geológicas (falhas, fraturas, etc). As ondas ao serem captadas em superfície, são analisadas e interpretadas, uma vez que podem revelar importantes feições geológicas.

Para detecção de ondas sísmicas, são utilizados dispositivos distribuídos ao longo da superfície com sensores capazes de detectar a energia propagada, como geofones, hidrofones e acelerômetros MEMS (Sistema Micro-Eletromecânicos). Atualmente, sensores sísmicos apresentam diversas aplicações na área de geofísica e geotecnia, visto que nos últimos anos a popularização de sensores, atuadores e microcomputadores tornou esses materiais mais acessíveis, possibilitando aplicação em diversos segmentos. Nesse sentido, verifica-se o uso de geofones e acelerômetros MEMS em centros de sismologia, companhias de segurança, atividades para a exploração de petróleo, mineração e diversas outras áreas que envolve o interesse em captar vibrações em intervalos de frequências específicas.

No que diz respeito da aplicação de sensores em dispositivos sísmicos, entre geofones e acelerômetros MEMS, há algumas semelhanças no espectro de amplitude do sinal. Contudo, algumas diferenças podem ser observadas no ruído do ambiente, de maneira que os geofone captam sismos com baixas frequências (inferiores a 20 Hz), enquanto que os acelerômetros MEMS somente frequências intermediárias (superiores a 150 Hz). Dessa forma, os geofones apresentam melhor relação sinal/ruído (SNR) para baixas frequências, enquanto que os acelerômetros MEMS para frequências intermediárias.

O dispositivo sísmico confeccionado neste trabalho foi composto pelos sensores geofone SM-24 e acelerômetro MEMS LSM303D, acoplados a um microcomputador de placa única Raspberry Pi 3B com a finalidade de avaliar a SNR entre os dois sensores na aquisição de sinais sísmicos. Todo o software para leitura e análise dos sinais sísmicos captados pelos sensores é de desenvolvimento próprio. Tendo conhecimento do custo de dispositivos sísmicos no mercado atual, o desenvolvimento desse dispositivo a baixo custo torna viável e acessível sua aplicação em sismologia e em diversos outros segmentos.

1.1 JUSTIFICATIVA

A popularização de diversos sensores e microcontroladores tornou possível inúmeras aplicações nos mais diversos seguimentos profissionais e acadêmicos. Tendo em vista o custo de dispositivos sísmicos no mercado atual, o desenvolvimento desse dispositivo a baixo custo torna viável e acessível sua aplicação em sismologia, assim como em diversas outras áreas que seu uso se faz necessário.

1.2 OBJETIVO

O presente trabalho teve por objetivo analisar a relação sinal/ruído de um dispositivo sísmico confeccionado a baixo custo utilizando os sensores geofone SM-24 e acelerômetro MEMS LSM303D. Para tanto, foram feitas diversas comparações entre os sensores na captação do sinal em laboratório e posteriormente em campo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MÉTODOS SÍSMICOS

A geofísica é uma ciência que abrange estudos referentes as propriedades físicas da terra (magnetismo, gravidade, eletricidade, propagação de ondas elásticas e dentre outras) a fim de se obter informações do seu interior, seja nas porções superficiais – onde se encontram importantes depósitos minerais - quanto nas porções mais profundas (IAG, 2018).

Segundo Bertulani (2018), as propriedades físicas da terra são mensuradas por meio de instrumentos sofisticados e apropriados, comumente colocados na superfície. São estimadas através da medição, análise e interpretação dos dados obtidos, sendo sua medição influenciada pela maneira como as propriedades físicas encontram-se distribuídas em subsuperfície. Os levantamentos geofísicos, segundo Kearey *et al.* (2009), possibilitam um meio rápido e barato de se adquirir informações das propriedades físicas da terra, embora a interpretação dos dados seja sujeita a incertezas e ambiguidades

Os métodos sísmicos são amplamente usados com a finalidade de se mapear interfaces entre camadas durante atividades de exploração. De acordo com Kearey *et al.* (2009), aplicam-se no mapeamento de sequencias sedimentares na busca por hidrocarbonetos; determinação do lençol freático nas camadas sedimentares mais superficiais; na engenharia, é usado para caracterização em meios pouco deformados além da definição de parâmetros para fundações e profundidade do maciço. Ademais, o

levantamento sísmico pode ser executado tanto em terra como em mar, sendo neste amplamente utilizado na determinação de recursos marinhos.

Durante o levantamento sísmico, para que as ondas sísmicas sejam registradas, é necessário que em seu percurso ocorra dois fenômenos físicos, conhecidos por reflexão e refração. E por esse motivo, o método sísmico pode ser dividido em sísmica de refração e sísmica de reflexão. No primeiro, a onda se propaga no limite entre duas camadas do estrato rochoso quando incide com ângulo crítico e retorna da interface para a camada superior (AZEVEDO; ROCHA, 2010), enquanto que, na reflexão, as ondas refletem nas interfaces e volta à superfície.

2.2 PROPAGAÇÃO DE ONDAS SÍSMICAS

Aqui será esboçado os principais conceitos a respeito do fenômeno físico de propagação de ondas sísmicas.

Ondas sísmicas são pulsos de baixa energia e curta duração, formadas quando há distúrbios no meio, seja de origem tectônica por movimentos de rochas ao longo de planos de falhas (ERNESTO; USSAMI, 2002) ou por sismos induzidos, como explosões. Independente da fonte sísmica, as ondas de energia quando geradas a partir de um foco, se propagam radialmente em todas as direções, tanto nas regiões mais superficiais como em profundidade. A velocidade é um fator que varia com as características físicas do meio, a depender das constantes elásticas e densidades de cada material. A Figura 1 mostra de forma simplificada os principais componentes de um sismo.

Assim como ocorre com outras formas de energia, as ondas sísmicas transmitem sua energia de um ponto ao outro em forma de onda. Esse fenômeno pode ser claramente observado ao se jogar uma pedra em um lago, sua energia é transmitida à água na forma de ondas formando círculos concêntricos que se propagam na superfície do lago em todas as direções, podendo atingir a margem ou se desfazer a certa distância do percurso (ERNESTO; USSAMI, 2002).

Quando se estuda a propagação de ondas sísmicas em um meio, comumente considera-se que este seja homogêneo. Distúrbios em meios heterogêneos (como é o caso do substrato da terra) se caracterizam de alta complexibilidade, e por este motivo são constantemente modelados como uma sucessão de camadas homogêneas (MOLINA, 2012).

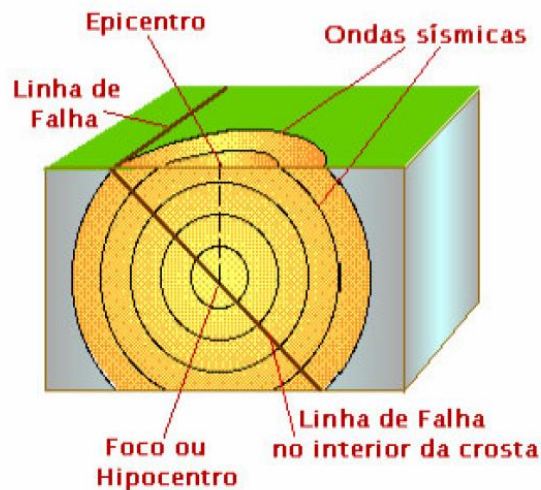


Figura 1. Principais componentes de um sismo. Fonte: DOMINGOS (2006).

Em meios homogêneos, considera-se que as frentes de ondas sejam equidistantes (HORSTMANN, 2007). Frente de onda pode ser definida como uma superfície em que todos os seus pontos estão no mesmo estado de vibração, enquanto que a direção perpendicular a esta que define a trajetória da onda sísmica é chamada de raio sísmico (Figura 2) (MOLINA, 2012).

Como dito anteriormente, o substrato da terra é considerado um meio heterogêneo e as ondas de energia ao se propagarem dispõem de uma trajetória curvilínea. Dessa forma, os raios sísmicos ao passarem por diferentes meios com características físicas distintas sofrem refração e reflexão (HORSTMANN, 2007).

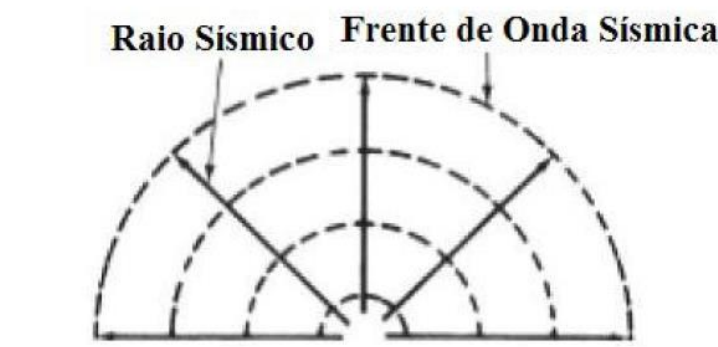


Figura 2. Representação da frente de onda e do raio sísmico. Fonte: DOMINGOS (2006).

Outra consideração importante a se fazer é a deformação elástica que as ondas sísmicas submetem as rochas durante seu trajeto, não alterando sua massa sólida (TEIXEIRA, 2013), e por conta disso, são também chamadas de ondas elásticas. Essa premissa pode não ser verdadeira na região do foco (hipocentro) onde o sismo é gerado, no qual a energia dissipada por ter intensidade tal, desloca as partículas definitivamente de suas posições originais, ocasionando mudança na forma e volume, sendo neste caso a deformação

plástica ou dúctil (inelástica) (KEAREY *et al.*, 2009). Contudo, a medida que as ondas sísmicas se afastam da região central do sismo, pode-se admitir que a amplitude de perturbação diminui para um limite em que a deformação do meio seja considerada elástica (MOLINA, 2012).

Segundo Thomas (2001), as ondas elásticas ao atingirem a interface de dois materiais rochosos com características distintas, seu comportamento é regido pela mesma lei da ótica geométrica. Dessa forma, parte da energia da onda incidente é refratada para o meio inferior enquanto que a outra parcela de energia é refletida de volta à superfície.

De acordo com Kearey *et al.* (2009), Kruk (2005) e Sheriff (2001) as ondas sísmicas podem ser classificadas em dois tipos: ondas de corpo e ondas superficiais.

Ondas de corpo (*body waves*) são assim chamadas por se propagarem no interior da terra por meio do volume de um sólido elástico, podendo ser de dois tipos principais: ondas P e ondas S.

As ondas P, também chamadas de ondas longitudinais ou compressionais, faz com que as partículas vibrem em movimento paralelo em relação a sua direção de propagação, realizando um movimento de compressão e extensão alternadamente (Figura 3A) (TEIXEIRA *et al.*, 2009). São as primeiras as serem registradas durante um sismo e por isso são denominadas de ondas primárias. Além disso, propagam-se tanto em meio sólidos quanto em líquidos (MOLINA, 2012).

As ondas S, também chamadas de ondas transversais ou de cisalhamento, propagam-se através de um cisalhamento puro fazendo com que as partículas vibrem em movimento perpendicular à direção de propagação da onda (Figura 3B) (KEAREY *et al.*, 2009). Não se propagam em meios fluidos (líquidos e gases) pois estes não suportam tensão de cisalhamento (SHERIFF, 2001) e são mais lentas do que as ondas longitudinais, sendo registradas depois destas (MOLINA, 2012). Por esse motivo, são denominadas de ondas secundárias. Contudo, possuem maior amplitude do que as ondas P, causando alterações morfológicas sem variação de volume (HORSTMANN, 2007).

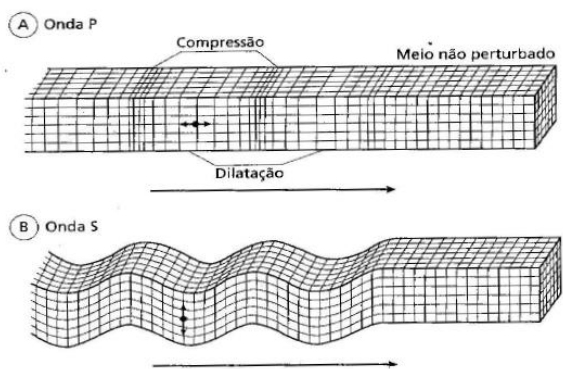


Figura 3. Movimentos de partículas e deformação do terreno das ondas de corpo: ondas P (A); ondas S (B). Fonte: KEAREY *et al.*, 2009.

A velocidade das ondas sísmicas, como já dito, varia de acordo com as características elásticas e densidade do meio, sendo a velocidade da onda P (V_P) e onda S (V_S) definidas pelas EQ. 2.0 e 2.1, respectivamente.

$$V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.0)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.1)$$

De acordo com as equações acima, os parâmetros λ e μ indicam as características de um meio elástico isotrópico denominadas de constante de Lamé e ρ a densidade efetiva do meio (KRUK, 2005; LOWRIE, 1997; PSENCIK, 2000).

Ondas superficiais (*surface waves*) são geradas quando as ondas de corpo alcançam a superfície do terreno e podem ser de dois tipos principais: ondas R (*Rayleigh waves*) e ondas L (*Love waves*) (KRUK, 2005; SHERIFF, 2001). Representam um tipo de combinação entre as ondas S e P, mas são menos rápidas do que as ondas de corpo, contudo, geralmente dispõem de maior amplitude (MOLINA, 2012).

As ondas R propagam-se através de uma superfície livre por meio da interface entre dois meios sólidos que não sejam semelhantes, de forma que, durante a passagem da onda, as partículas movimentam-se de forma elíptica e retrógrada, num plano vertical em relação a direção de propagação da onda (Figura 4) (KEAREY *et al.*, 2009; SHERIFF, 2001). Além disso, sua amplitude decresce exponencialmente com a profundidade em subsuperfície (KEAREY *et al.*, 2009), e são descritas como produto da interferência entre as ondas P e S (verticalmente polarizadas SV) (SHERIFF, 2001).

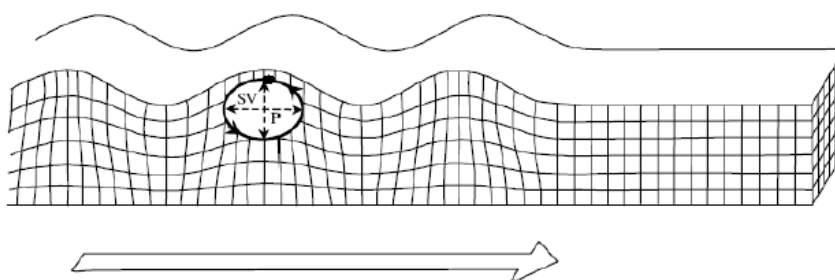


Figura 4. Movimento das partículas geradas pela passagem das ondas *Rayleigh*. Fonte: KEAREY *et al.*, 2009. Modificado por MOLINA, 2012.

As ondas L são descritas como ondas de cisalhamento polarizadas no qual as partículas se movimentam paralelo a superfície livre e perpendicular à direção de propagação (Figura 5) (KEAREY *et al.*, 2009). Estas se formam como produto da interferência de duas ondas S horizontalmente polarizadas (SH) com reflexões supercríticas e são mais rápidas do que as ondas R e altamente destrutivas (SHERIFF, 2001). As ondas L tem características dispersivas, uma vez que sua velocidade de propagação depende da frequência; já as ondas R, por vezes, são não dispersivas (HORSTMANN, 2007).

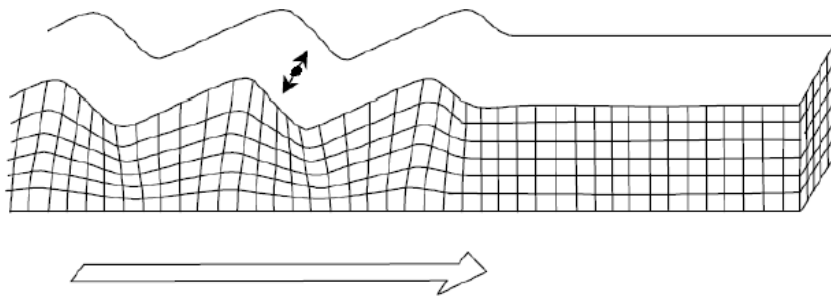


Figura 5. Movimento das partículas geradas pela passagem das ondas L. Fonte: KEAREY *et al.*, 2009.

A Velocidade das ondas superficiais é inferior às ondas de corpo (V_P e V_S), e a velocidade da onda R (V_R) e onda L (V_L) podem ser determinadas pela EQ. 2.2 e 2.3, respectivamente.

$$V_R = 0,92V_S \quad (2.2)$$

$$V_{S_1} < V_L < V_{S_2} \quad (2.3)$$

De acordo com a equação 2.3, V_{S_1} é a velocidade de propagação das ondas SH num meio 1 e V_{S_2} é a velocidade de propagação das ondas SH num meio 2 (KRUK, 2005; LOWRIE, 1997; PSENCIK, 2000).

2.3 SENSORES

Este tópico apresenta, além da análise de sinais sísmicos do dispositivo, aspectos sobre sensores, hardware e software utilizados em sua produção.

2.3.1 Geofone

Os geofones são dispositivos simples e tem seu funcionamento baseado num sistema massa-mola. São caracterizados por um pequeno sensor, que é fixado à superfície, dispondo de diferentes conectores com o intuito de captar vibrações de frequências de ressonância desejada (Figura 6). Há diversos tipos de modelos para este sensor.

A captação do sinal sísmico por meio do sensor geofone se dá basicamente por movimentos oscilatórios (vibrações) na superfície em que este se encontra, podendo ocorrer por meio de sismos, seja ele natural ou induzido. Em razão disso, o sismo gera ondas que se propagam em todas as direções e ao atingirem a superfície, causam deslocamentos físicos no solo, fazendo com que o ímã (magneto) se movimente para cima e para baixo em torno da bobina (conjunto massa-mola) que tende a permanecer em inércia, pois, segundo o princípio da inércia, a bobina tende a permanecer imóvel uma vez que o movimento do ponto de vista da bobina é relativo (Figura 7).

Em função disso, o movimento relativo do ímã em relação à bobina gera um campo magnético que produz uma tensão elétrica nos terminais da bobina, sendo esta tensão proporcional a velocidade relativa da onda, podendo ser amplificada e registrada por meio de um voltímetro (Figura 7) (KRUK, 2005; LORENZO, 2018).

Como a corrente elétrica produzida é proporcional a onda incidente captada pelo geofone receptor, baixas amplitudes de ondas sísmicas incidentes podem gerar baixas tensões, sendo necessário, neste caso, um amplificador operacional a fim de aumentar as fracas correntes elétricas. Portanto, o geofone funciona como um transdutor passivo responsável por converter as vibrações que chegam à superfície em sinais elétricos (HORTSMANN, 2006).



Figura 6. Geofone modelo SM-24 usado no dispositivo. Fonte: SPARKFUN, 2018.

Dentre as diversas aplicações do geofone, destaca-se sua utilização em centros de sismologia, companhias de segurança, exploração de petróleo, mineração e diversas outras

áreas que envolve o interesse em captar vibrações em intervalos de frequências específicas. Geralmente, os trabalhos em que são empregados os geofones, faz-se necessário a utilização de muitos dispositivos, o que pode gerar custos relativamente altos para determinado empreendimento. Este dispositivo no mercado pode ser encontrado desde os modelos mais simples, por cerca de \$ 1000.00 U.S., até os mais sofisticados, podendo chegar até \$ 10.000 U.S. cada.

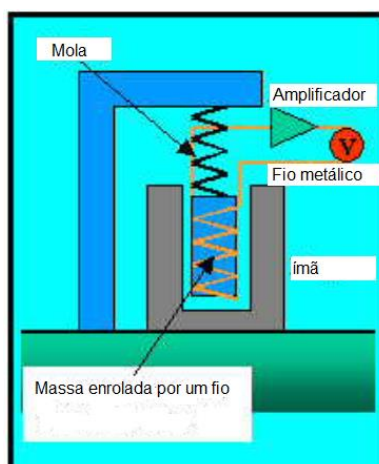


Figura 7. Esquema do funcionamento de um geofone. Fonte: Modificado de LORENZO, 2018.

Em destaque ao método de sísmica de reflexão (método prospectivo muito utilizado na indústria do petróleo), este sensor possui grande aplicação devido a melhor relação custo/benefício na busca de encontrar feições geológicas profundas que podem ser favoráveis a acumulação de hidrocarbonetos (AYLOR, 1995).

Neste trabalho, utilizou-se o geofone modelo SM-24 para confecção do dispositivo sísmico (SENSOR NEDERLAND, 2018). Suas especificações técnicas estão descritas na Tabela 1. Dentre as características técnicas da Tabela 1, alguns parâmetros, como por exemplo a frequência natural, merecem atenção, pois, segundo Faber e Maxwell (1997) a frequência natural do geofone pode ser entendida como a frequência de ressonância do sistema massa-mola no seu eixo de trabalho. Em outras palavras, é o mínimo valor de frequência que pode ser registrado pelo geofone. No caso do modelo de sensor usado neste trabalho, espera-se registrar valores mínimos de 10 Hz. A Figura 8 mostra a curva de resposta em frequência do geofone SM-24 (SENSOR NEDERLAND, 2018).

Geralmente, Centros de sismologia utilizam geofones com frequência natural entre 4,5 e 100 Hz. Contudo, caso seja necessário a captação de sinais com frequências muito baixas (longa duração), utilizam-se sismômetros, que dispõem de frequência natural que podem variar de 1 a 2 Hz (SERCEL, 2005).

Tabela 1. Especificações técnicas do datasheet do geofone modelo SM-24. Fonte: Modificado de SENSOR NEDERLAND, 2018.

Distorção	< 0,1% com declividade. de 0° à 10°
Frequência espúria	< 240 Hz
Frequência natural	10 Hz \pm 2,5% com declividade de 0° à 10°
Amortecimento em circuito aberto	0,25 \pm 5%
Constante de amortecimento	6000 Ω .Hz
Sensibilidade	28,8 V/m/s \pm 2,5 %
Resistência da mola	375 Ω
Massa móvel	11 g
Excursão da mola	2 mm pico-a-pico
Diâmetro	25,4 mm
Comprimento	32 mm
Peso	74 g
Temperatura de operação	-40 à +100°C

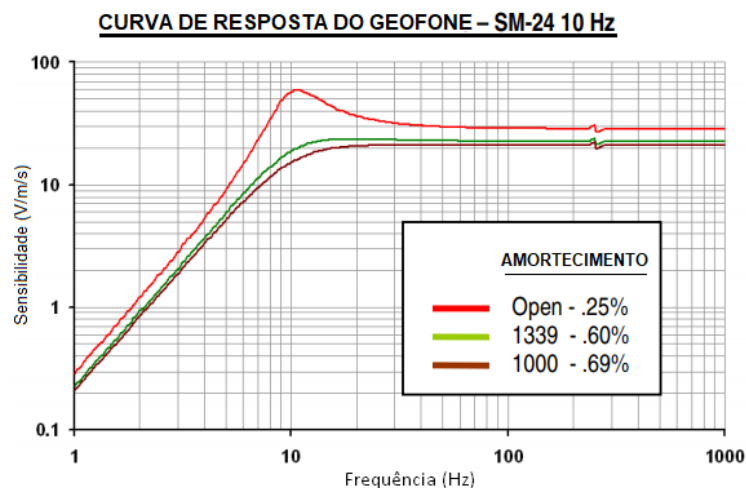


Figura 8. Curva da resposta em frequência: Sensibilidade x Frequência do geofone SM-24. Fonte: Modificado de SPARKFUN, 2018.

Outro parâmetro importante a respeito da especificação técnica do geofone SM-24 (Tabela 1) é a frequência espúria, que corresponde a oscilações que são perpendiculares ao eixo de trabalho (frequência natural) deste sensor, assim como uma combinação de múltiplos movimentos perpendiculares ao eixo de trabalho normal (FABER; MAXWELL, 1997). Dessa forma, o geofone SM-24 obtém sinais em condições ideais com ausência de ruídos caso haja oscilações de até 240 Hz. A distorção atesta o quanto de deformação o sinal está sujeito segundo a posição em que o geofone se encontra no terreno, sendo importante averiguar a melhor forma de instalação do sensor.

Como já dito, o geofone transforma as vibrações mecânicas em sinais elétricos proporcionais a onda incidente, contudo, os sinais elétricos são geralmente interpretados utilizando computadores (ou microcontroladores). Sendo assim, é necessário que os sinais

analógicos do geofone sejam digitalizados, ou seja, transformados em sequências numéricas de forma que os processadores digitais do computador façam a análise numérica desejada (HORSTMANN, 2007). Mais adiante, esse processo será melhor explicado.

2.3.2 Acelerômetro

Segundo Hons (2008), o acelerômetro MEMS (Figura 9) é caracterizado por um simples oscilador harmônico com um par de capacitores e a massa de prova se baseia numa peça de silício micro usinada com chapeamento de metal na superfície. Os capacitores são formados por placas de metal que se encontram em ambos os lados da massa de prova central e nas camadas externas de silício. As molas mecânicas de silício são cortadas muito finas e suspendem a massa de prova da camada intermediária, permitindo dessa maneira uma pequena quantidade de movimento elástico. Sua frequência de ressonância é geralmente próxima ou acima de 1kHz (HONS, 2008).

Este sensor tem seu funcionamento baseado na mudança de posição da massa de prova, o que causando mudança entre o espaçamento das placas de metal e modifica a capacitância. Diferente do geofone em que o sinal é gerado em função da velocidade do sistema massa-mola, no acelerômetro MEMS, a velocidade é produzida pela mudança na posição da massa de prova (HONS, 2008).

Em relação a captação do sinal, nota-se que o geofone e o acelerômetro MEMS apresentam características comum, como por exemplo, no espectro de amplitude, sendo que as diferenças podem ser encontradas na captação do ruído do ambiente: Os geofone são capazes de captar sismos com frequências inferiores a 20 Hz, enquanto que os acelerômetros MEMS somente frequências superiores a 150 Hz, propondo assim, uma vantagem para os geofones na SNR com a energia de reflexão para longas distâncias (HONS, 2008). Outro fator considerável sobre os geofones, são que estes, de acordo com Cambois (2002), geralmente, não necessitam de energia elétrica para operarem. O acelerômetro MEMS usado no dispositivo é o modelo LSM303D da placa GY-89 (Figura 9).

A Tabela 2 mostra as especificações técnicas do Acelerômetro MEMS modelo LSM303D usado na confecção do dispositivo sísmico para amostragem de dados.

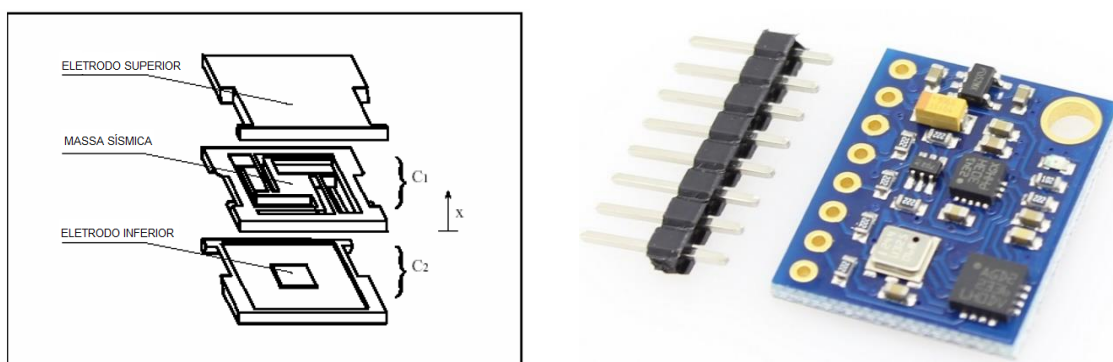


Figura 9. Esquema de um acelerômetro MEMS. C1 e C2 são capacitores formados pelas placas do eletrodo. A massa de prova é seccionada pela pastilha central (Esquerda). Placa GY-89 com acelerômetro MEMS modelo LSM303D (Direita). Fonte: Modificado de KRAFT, 1997.

Segundo Hons (2008), dentro de um intervalo entre 5 e 200 Hz, os dados obtidos por geofone em relação a um acelerômetro MEMS em muito se assemelham. Entretanto, para os geofones com frequências inferiores a 5 Hz o acelerômetro apresenta maior amplitude, sendo que algumas diferenças também são observadas para o geofone de alta frequência.

Tabela 2. Especificações técnicas do datasheet do acelerômetro MEMS LSM303D. Fonte: STMICROELECTRONICS, 2013.

Parâmetros	Condição de teste	Tipo	Unidade
Faixa de medição da aceleração linear		± 2	G
		± 4	
		± 6	
		± 8	
		± 16	
Sensibilidade da aceleração linear	Aceleração Linear FS = ± 2	0,061	mg/LSB
	Aceleração Linear FS = ± 4	0,122	
	Aceleração Linear FS = ± 8	0,244	
	Aceleração Linear FS = ± 16	0,732	
Precisão de compensação do nível zero g da Aceleração linear típica	FS = $\pm 8g$	± 90	Mg

2.4 RASPBERRY PI SHAKE

Como exemplo de aplicação de sensores sísmicos à microcomputadores, tem-se o Raspberry Shake, que é um dispositivo (sismógrafo) para usuário final que registra tremores com magnitude 2 ou mais, dentro de um raio de 50 milhas (80,5 km) ou superior; trabalha na faixa de 4,5 Hz com um digitalizador de 24 bits amostrados a 50 SPS (amostras por segundo) que apresenta dados no formato miniSEED (KIKSTARTED, 2018). Além disso, possui

diversos implementos, como IoT (*Internet of Things*) que permite que o dispositivo esteja ligado a internet disponibilizando dados numa rede (Figura 10). A Figura 11 mostra o software do Raspberry Shake realizando um monitoramento sísmico durante um terremoto

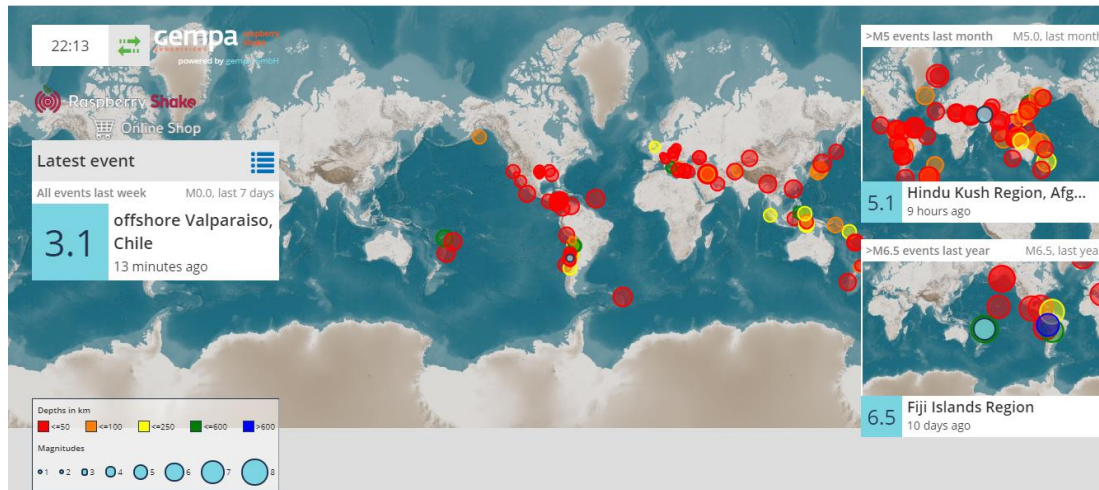


Figura 10. Mapa de estação sismográfica monitorando em tempo real os últimos eventos sísmicos usando Raspberry Shake. Fonte: RASPBERRY SHAKE, 2018.

Além do mais, apresenta diversas configurações de hardware para medições em até 4 dimensões (Figura 12) (RASPBERRY SHAKE, 2018), que podem ser implementadas em trabalhos futuros como continuação desse trabalho. De acordo com as configurações apresentadas na Figura 12, seu preço varia entre \$374,00 à \$499,00.

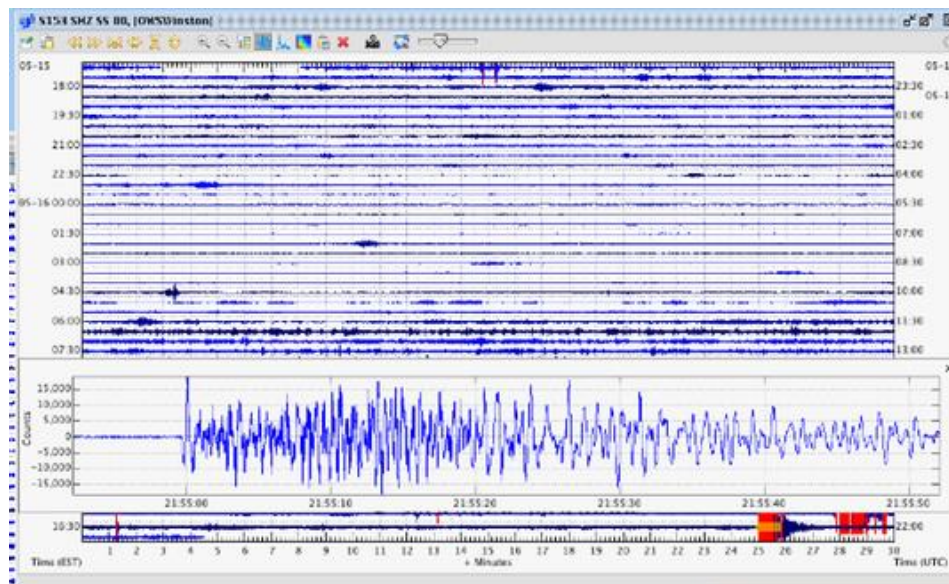


Figura 11. Software do Raspberry Shake realizando monitoramento de um terremoto. Fonte: RASPBERRY SHAKE, 2018.

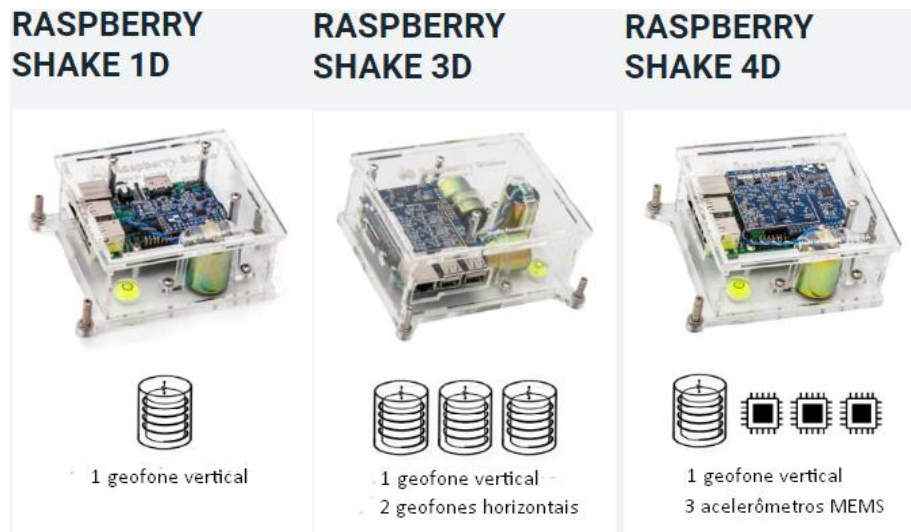


Figura 12. Configurações possíveis de sensores no dispositivo sísmico. Fonte: Modificado de RASPBERRY SHAKE, 2018.

2.5 AQUISIÇÃO DE DADOS

Aqui será esboçado os principais conceitos sobre o método de aquisição de sinais por meio do geofone e acelerômetro MEMS e como os sinais sísmicos são tratados.

A aquisição de dados se baseia na obtenção de sinais a partir de uma fonte e sua digitalização para armazenamento, análise e visualização no computador. Um sistema básico de aquisição de dados é constituído pelos seguintes componentes (Figura 13) (NATIONAL INSTRUMENTS, 2018):

- Transdutores ou sensores;
- Sinais;
- Condicionamento de sinal;
- Frequência de amostragem;
- Resolução da digitalização em amplitude (número de bits utilizado);
- Hardware de aquisição;
- Driver e software de aplicação;



Figura 13. Sistema padrão de aquisição de dados. Fonte: NATIONAL INSTRUMENTS, 2006. Modificado por HORSTMANN, 2007.

2.5.1 Transdutores

A aquisição de dados se baseia de acordo com o fenômeno físico a ser medido. Segundo a National Instrument (2018), os fenômenos físicos a serem medidos podem ser a temperatura de uma sala, pressão dentro de uma câmara, intensidade de uma fonte de luz, a força aplicada sobre um objeto.

O transdutor, também chamado de sensor, é um dispositivo responsável por transformar o fenômeno físico em um sinal elétrico que pode ser medido, assim como uma corrente elétrica ou tensão. Para que um sistema de aquisição de dados meça diferentes fenômenos físicos, é necessário que os transdutores convertam estes em sinais que possam ser medidos pelo hardware de aquisição de dados (NATIONAL INSTRUMENTS, 2018). Neste trabalho, o fenômeno físico a ser estudado são as ondas sísmicas e os transdutores utilizados são o geofone e acelerômetro MEMS.

Contudo, para conversão do fenômeno físico em um sinal a ser medido, cada tipo de transdutor dispõe de critérios distintos. Assim sendo, alguns transdutores podem requerer uma excitação, seja na forma de corrente ou tensão, enquanto outros exigem componentes adicionais e até mesmo rede resistivas a fim de gerar um sinal (NATIONAL INSTRUMENTS, 2018).

2.5.2 Sinais

Como dito anteriormente, os transdutores são responsáveis por converter os fenômenos físicos em sinais mensuráveis. Contudo, diferentes sinais dispõem de diferentes

maneiras para obter a sua medição. Nesse sentido, considera-se de grande importância o entendimento dos diferentes tipos de sinais e suas propriedades. Os sinais podem ser classificados em dois grupos: analógico e digital (NATIONAL INSTRUMENTS, 2018). O geofone gera em sua saída sinais analógicos, enquanto que o acelerômetro MEMS sinais digitais.

2.5.3 Condicionamento de sinal

Por vezes, os transdutores geram sinais perigosos e muito difíceis de serem medidos diretamente por meio de um dispositivo de aquisição de dados, tais como manuseio com alta tensão, ambientes ruidosos, sinais de amplitude excessivamente baixos ou altos, ou até mesmo a medida simultânea de vários sinais concomitantemente. Como resultado, o condicionamento de sinais é fundamental para que um sistema de aquisição de dados seja eficiente (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

O condicionamento de sinais visa garantir a melhor obtenção da medida por meio de um dispositivo de aquisição, de forma que a medição seja eficaz e exata. De acordo com os componentes e requisitos utilizados, pode ser necessário o uso de amplificação, isolamento, filtragem, multiplexação ou uma combinação de todos esses métodos de condicionamento (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

Os amplificadores atuam de forma a aumentar o nível de tensão a fim de ampliar a faixa de operação do ADC (*Analog-to-Digital-Converter*). Ademais, o uso de condicionantes de sinal externo assentados próximo a fonte do sinal (ou transdutor) contribuem no aumento SNR, uma vez que amplia o nível de tensão antes de sofrer influência externa por ruído do ambiente (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

A multiplexação se baseia na obtenção de inúmeros sinais, contudo, o dispositivo de aquisição não possui a capacidade de adquirir todos os sinais ao mesmo tempo, de forma a adquirir um sinal por vez. Nessa técnica de aquisição, a frequência de amostragem de cada sinal (velocidade de aquisição) é definida pela relação entre a frequência de amostragem do dispositivo e o número de sinais que o dispositivo está adquirindo (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

A aplicação de filtros permite eliminar os ruídos indesejados de um sinal que se encontram numa determinada faixa de frequência, antes de ser digitalizados pelo dispositivo de aquisição. Quando se trabalha com sinais DC (Corrente Direta), comumente, utiliza-se filtros passa-baixas com a finalidade de remover componentes de alta frequência (responsáveis por uma série de distorções, conhecidas por falseamento-aliasing) que estão acima da frequência de Nyquist (frequência de corte igual à metade da frequência de

amostragem), ou atenuar até um nível de amplitude desprezível. Dessa forma, se o sinal contém frequências acima da frequência de Nyquist determinada pela amostragem, é necessário que o sinal passe por um filtro antifalseamento antes da digitalização (KEAREY *et al.*, 2009; NATIONAL INSTRUMENTS, 2016).

2.5.4 Frequência de amostragem

A frequência de amostragem pode ser definida como a velocidade de aquisição de dados, isto é, o número de pontos de amostragem por unidade de tempo ou distância. Dessa forma, a frequência de amostragem é proporcional ao número de pontos em um certo intervalo de tempo, de forma que, quanto maior a frequência de amostragem, maior será a resolução e o nível de detalhe do sinal adquirido (KEAREY *et al.*, 2009; NATIONAL INSTRUMENTS, 2016).

Caso a frequência de amostragem do dispositivo de aquisição for menor ou estiver em sincronia com a frequência do sinal a se adquirir, os dados obtidos estarão passíveis de erros. Quando um sinal não é amostrado numa taxa alta o suficiente, os dados adquiridos aparecem na forma distorcida, conhecido por falseamento ou *aliasing* (NATIONAL INSTRUMENTS, 2006).

O teorema de amostragem Nyquist explicita sobre a relação entre a taxa de amostragem e a frequência do sinal medido. Desse modo, a taxa de amostragem f_s deve ser maior no mínimo duas vezes do que a componente de maior frequência f_N do sinal medido que se quer analisar (EQ 2.4), chamada de frequência de Nyquist (NATIONAL INSTRUMENTS, 2016).

$$f_s > 2 * f_N \quad (2.4)$$

Logo, para determinar a frequência de amostragem efetiva para cada sinal quando se faz uma aquisição multiplexada de muitos sinais concomitantemente, efetua-se a relação entre a frequência de amostragem total do dispositivo pelo número de sinais adquiridos. Assim, se um dispositivo dispõe de uma frequência de amostragem de 1,25M amostras/s obtendo 10 sinais de maneira multiplexada, cada sinal será mostrado no tempo efetivamente com frequência de 125k amostras/s (HORSTMANN, 2007).

2.5.5 Resolução

A resolução pode ser definida como o número de bits utilizados por um ADC a fim de reproduzir um sinal analógico (NATIONAL INSTRUMENTS, 2016). Assim, um sinal analógico pode ser representado na forma binária (sequência de dígitos cujo valor é 0 ou 1), para tanto, os valores de tensão que o sinal analógico assume é definido dentro de uma divisão de faixa de tensões, no qual cada intervalo pode ser representado por uma única sequência de 0 e 1. Portanto, quanto maior for a resolução, maior o número de intervalos que uma faixa de tensões pode ser dividida, possibilitando menor variação de tensão detectável e mais precisa é a representação digital do sinal analógico (HORSTMANN, 2018).

Para exemplificar, um ADC de 3 bits tem 8 níveis, isto é, divide uma faixa analógica em 8 divisões, sendo que, um código binário entre 000 e 111 representa cada um desses níveis. Neste trabalho, a resolução do ADC utilizado é de 16 bits.

2.5.6 Hardware de aquisição

O hardware de aquisição de dados tem como função atuar como a interface entre o computador e o mundo exterior. Funciona como um dispositivo responsável por digitalizar sinais analógicos de entrada a fim de que o computador os interprete. Além disso, suas demais funcionalidades incluem: entrada/saída de sinais analógicos; entrada/saída de sinais digitais; contadores/temporizadores; multifunções, em que num único dispositivo combina operações analógicas, digitais e de contagem (NATIONAL INSTRUMENTS, 2018).

Neste trabalho, como sistema de aquisição, foi utilizado um microcomputador de placa única Raspberry Pi modelo 3B (Figura 14) com processador QUAD Core 1250 MHz e 1 GB de RAM (Tabela 3); um ADC modelo ADS1115 com resolução de 16 bits, 4 canais analógicos, ampla faixa de alimentação variando de 2 a 5.5V, faixa dinâmica de ganho de $\pm 0,256$ à $\pm 6,144$ V (isto é, amplifica o sinal em até 16x) e taxa de amostragem variando de 8 a 860 SPS (Tabela 4) e boa precisão (Tabela 5). Contudo, outra possibilidade de conjunto de hardware que já está sendo implementada para testes futuros é apresentada na Figura 15. Tem menor custo e consumo de energia, é mais leve e exibe tela com interface gráfica. A diferença dessa configuração de elementos para os componentes do hardware atual é o uso do microcomputador de placa única Raspberry Pi Zero W (tem menor custo e processamento em relação ao Raspberry Pi 3B) e uma tela OLED HAT 1.3" (menor consumo de energia e tem botões para operar). A relação entre o preço das duas configurações está disponível na Tabela 6. Uma configuração que otimiza um consumo de energia é muito importante para fazer monitoramento sísmico de várias horas/dias. A Tabela 7 mostra a relação de consumo e quantidade de horas disponíveis para medição para as duas configurações.



Figura 14. Raspberry Pi 3 (modelo 3B). Fonte: Raspberry Pi Foundation, 2018.

Tabela 3. Especificações técnicas do Raspberry Pi 3B. Fonte: ELEMENT14, 2018.

Processor Chipset	Broadcom BCM2837 64MB Quad ARMv7. Processador Central Único alimentado. Computador de bordo rodando à 1250MHz.
GPU	Videocore IV
Velocidade do processador	QUAD Core @1250 MHz
RAM	1GB SDRAM @ 400 MHz
Armazenamento	MicroSD
USB 2.0	4 portas USB
Consumo de energia / voltagem	2.5A @ 5V
GPIO	40 pinos
Conexão de Rede	Sim
Bluetooth LE	Embutido

Tabela 4. Especificações de um ADC 16 Bits. Fonte: Adafruit, 2018. Modificado de Oliveira, 2017.

Chip / módulo <i>breakout</i>	ADS1115 (Adafruit ADS1115 16-Bit ADC)
Resoluções disponíveis	16 Bits em modo diferencial (Valores positivos e negativos) 15 Bits em modo <i>single-ended</i> (apenas valores positivos)
Taxa de amostragem por segundo (SPS)	8, 16, 32, 64, 128, 250, 475, 860
Faixa de fundo de escala Amplificador de ganho programável	2/3 = $\pm 6,144V$ 1 = $\pm 4,096V$ 2 = $\pm 2,048V$ 4 = $\pm 1,024V$ 8 = $\pm 0,512V$ 16 = $\pm 0,256V$
Quantidade de valores possíveis	2 ¹⁶ = 65536 (modo diferencial) 2 ¹⁵ = 32768 (modo <i>single-ended</i>)
Canais	4
Existência de modo diferencial	sim
Tensão de entrada máxima (VDD a GND)	-0,3V até VDD+0,3V
Modos de conversão e tipos de entrada	- <i>Single-shot</i> - <i>Continuous conversion</i>
Modo padrão ao inicializar o chip	Resolução: 16 bits Taxa de amostragem: 128 SPS PGA: 2x Modo de conversão: Single-shot
Erro de ganho	0,01 a 0,15 % (FS = $\pm 2,048V$ em 25°C)

O ADC é responsável por digitalizar os sinais analógicos do geofone. Uma vez que o sinal pode ser registrado sob a forma analógica ou digital, este é comumente usados para registrar a série de números que representam as medidas discretas (medidas realizadas em pontos). Contudo, por meio de um ADC é possível registrar sinais como medidas contínuas (LUIZ; SILVIA, 1995).



Figura 15. Modelo otimizado, mais leve, menor custo, tamanho e consumo de bateria. Fonte: Autor, 2018.

O ADC usado neste trabalho (Figura 16) é classificado como um dos melhores dentre outros ADC's do mercado. Pode medir uma grande variedade de sinais além de fácil uso (ADAFRUIT, 2018). Entretanto, há outros ADC's com maior acurácia e precisão e menor erro teórico associado (Tabela 5). O erro teórico é entendido como o somatório de erros associados a parâmetros que afetam diretamente a precisão e acurácia das medidas, tal como o erro de offset, erro de ganho, ruído e erro integral de não linearidade (OLIVEIRA, 2017). Por conta da maior porcentagem de erro associado ao ADC de 10 Bits, o uso de Arduino como hardware foi descartado neste trabalho. Medições sísmológicas requerem maior resolução para variação de tensão, o que justifica a escolha do ADC de 16 Bits. Contudo, em projetos futuros, pode-se implementar o uso de um ADC de 24 Bits para maior resolução e precisão das medidas, entretanto, deve-se levar em conta seu maior custo.

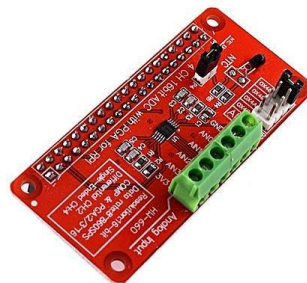


Figura 16. ADC modelo ADS1115 usado no dispositivo sísmico. Fonte: JUMIA, 2018.

Tabela 5. Erro máximo teórico associado aos 3 modelos de ADC's avaliados. Fonte: Modificado de Oliveira, 2017.

	ADC 10 Bits	ADC 16 Bits	ADC 24 Bits
Erro (%)	$\pm 6,917^{(1)}$	$\pm 0,1669^{(2)}$	$\pm 0,00837^{(2)}$
1. Erro Total (%) ao medir 1.5, 2.5 e 3.5V			
2. Erro Total (%) ao medir 1,5V			

Além do geofone para aquisição de dados, no microcomputador de placa única é acoplado via conexão i2C o sensor acelerômetro MEMS modelo LSM303D. A Tabela 6 apresenta o custo total com todos os componentes usados no dispositivo apresentado neste trabalho e o da implementação futura para hardware mais otimizado.

Tabela 6. Custo total com o hardware atual e otimizado. Fonte: Autor, 2018.

Hardware Atual		Hardware otimizado	
Produto	Valor (US\$)	Produto	Valor (US\$)
Raspberry Pi 3B	35,00	Raspberry Pi zero W	10,00
ADS1115	14,95	ADS1115	14,95
Geofone SM-24	59,95	Geofone SM-24	59,95
LSM303D	12,00	LSM303D	12,00
Tela WAVESHARE 7"	49,54	Tela OLED HAT 1.3"	11,99
Total	171.44		108.99

De acordo com a Tabela 7, a configuração do hardware otimizado apresenta tempo de medição com maior duração em relação a configuração de hardware atual, uma vez que seu consumo de energia é menor. Portanto, é possível fazer aquisição de sinais sísmicos por aproximadamente 6 dias seguidos. Além disso, a configuração do hardware otimizado com implementação de painel solar compacto de baixo custo se mostra como uma alternativa viável em trabalhos futuros. Desse modo, todo o sistema de aquisição apresentaria alimentação autônoma.

Tabela 7. Consumo de energia de acordo com as configurações de hardware. Fonte: Autor, 2018.

	Consumo hardware atual ⁽¹⁾	Consumo hardware otimizado ⁽¹⁾
	0,52 A	0,07 A
Capacidade de medição	19 h	142 h
1. A capacidade do carregador USB é de aproximadamente 10.000 mAh.		

2.5.7 Driver e software de aplicação

O software é responsável por transformar o computador e o hardware de aquisição numa ferramenta completa de aquisição, análise, e interpretação de dados. O software também controla o hardware, estabelecendo uma comunicação por meio do driver de software para que o sistema de aquisição de dados funcione corretamente. O driver de software é a camada intermediária entre o software do aplicativo e o hardware. Ademais, impede que o programador realize programação em nível de alto registro ou comandos complexos para acessar as funções do hardware (NATIONAL INSTRUMENTS, 2018).

Como software para ambiente de desenvolvimento e análise de sinais sísmicos, foi utilizado o Jupyter Notebook, IPython e o IDLE (Python 2 e 3). Dentre eles, vale destacar que o Jupyter Notebook é o que apresenta melhor interface e modo interativo, o que justifica o seu uso para visualização e análise de sinais.

2.6 ANÁLISE ESPECTRAL

O Sinal sísmico obtido durante a etapa de aquisição de dados geralmente é representado em função do tempo e das coordenadas espaciais. Contudo, em diversas ocasiões, é mais adequado representar o sinal no domínio da frequência, seja ele temporal ou espacial, e, para isso, se faz uso da Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*) (ROSA, 2010). Por meio dessa técnica, qualquer que seja sua forma e complexibilidade, as ondas periódicas podem ser decompostas numa série de ondas senoidais ou cossenoidais, e suas frequências são múltiplos inteiros da frequência básica de repetição $1/T$, chamada de frequência fundamental. (KEAREY *et al.*, 2009).

A Transformada Rápida de Fourier converte uma função do tempo $g(t)$ em amplitudes e espectros de fase que sejam equivalentes a $A(f)$ e $\phi(f)$, ou numa função complexa da frequência $G(f)$, chamada de espectro de frequência (KEAREY *et al.*, 2009), conforme explicita a EQ. 2.5, onde

$$G(f) = A(f)e^{i\phi(f)} \quad (2.5)$$

Como a forma de onda pode ser representada no domínio do tempo como no domínio da frequência, $g(t)$ e $G(f)$, são conhecidas como um par de Fourier (EQ. 2.6), sendo representados pela notação (KEAREY *et al.*, 2009)

$$g(f) \leftrightarrow G(f) \quad (2.6)$$

Pela notação acima, percebe-se que um par de Fourier são intercambiáveis, e, se $G(f)$ é a transformada de Fourier de $g(t)$, então $g(t)$ é a transformada de Fourier de $G(f)$ (KEAREY *et al.*, 2009).

2.7 FILTRAGEM DIGITAL

Em análise de sinais geofísicos, comumente se considera a forma de onda como sendo uma combinação de sinal e ruído, sendo aquele relacionado com as componentes da forma de onda que corresponde a estruturas geológicas e este às demais componentes da forma de onda (KEAREY *et al.*, 2009). Segundo esse mesmo autor, o ruído ainda pode ser subdividido em duas componentes: ruído aleatório e o ruído coerente. O ruído aleatório relaciona-se aos seguimentos que não correspondem com o levantamento geofísico – como a chuva, o vento ou tráfego a distância -, enquanto que, o ruído coerente corresponde aos componentes da forma de onda relacionadas ao levantamento geológico, contudo, não são de interesse direto para a interpretação geológica. O ruído coerente é gerado pela fonte sísmica, relacionada às ondas superficiais (KEAREY *et al.*, 2009).

Neste sentido, nota-se a importância da análise na relação sinal/ruído de forma tal que, se a SNR é alta, o sinal é imediatamente identificado para análise. Contudo, normalmente a SNR é baixa, sendo neste caso necessário um processamento especial para melhorar as informações contidas nas formas de ondas (KEAREY *et al.*, 2009).

De acordo com Kearey *et al.* (2009), caso se deseja suprimir o ruído aleatório, basta fazer as médias das medidas amostradas. Já o ruído coerente pode ser filtrado segundo suas características particulares por meio de um filtro especial a fim de suprimi-lo. Em relação ao sinal, por vezes pode apresentar distorções devido aos efeitos do sistema de gravação e, conhecida a natureza deste, pode-se por meio de filtros adequados remove-los. Para o processamento de dados geofísicos, a filtragem digital é amplamente utilizada com a finalidade de melhorar a SNR ou as características do sinal de forma a produzir a melhor apresentação visual (KEAREY *et al.*, 2009).

A filtragem pode ser feita por meio de um computador no domínio do tempo ou frequência. Quanto a filtragem digital aplicada em processamento digital de dados geofísicos (principalmente sísmicos), dois tipos principais de filtros são utilizados: filtros de frequência e filtros inversos (de convolução) (KEAREY *et al.*, 2009).

Os filtros de frequência são usados para separar bandas de frequência de diferentes características que se encontram nas componentes do sinal e do ruído e, em função de sua resposta, podem ser dos tipos passa-baixa – PB (*low-pass* - LP), passa-alta – PA (*high-pass* - HP), passa-faixa – PF (*band-pass* - BP) ou corta-faixa – CF (*band-reject* - BR) (KEAREY *et al.* 2009).

Com relação aos filtros inversos (deconvolução), são aplicados devido aos muitos segmentos de ruídos sísmicos que decorrem na faixa do espectro de frequência, não sendo possível sua remoção por filtragem de frequências (KEAREY *et al.*, 2009). De acordo com o autor supracitado, os filtros inversos determinam o ruído e contribuem para melhorar as características do sinal, além de suprimir ruídos que possuem características similares de frequência do sinal refletido.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar o objetivo proposto, a metodologia deste trabalho foi dividida em duas etapas: a primeira refere-se ao trabalho realizado em laboratório relacionado à confecção e calibração do dispositivo sísmico, incluindo o desenvolvimento do software para leitura dos sensores, análise estatística e espectral dos sinais sísmicos. Já a segunda parte refere-se a etapa de campo para coleta de dados em ambiente externo para análise e interpretação de sinais sísmicos reais.

3.1 CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO E TESTES EM LABORATÓRIO

3.1.1 Hardware, sensores e parâmetros configuráveis

Com relação à confecção do dispositivo sísmico, foi utilizado como plataforma de hardware e software o microcontrolador/microcomputador de placa única Raspberry Pi 3B (Figura 14 e Figura 17) (RASPBerry PI, 2018). No microcomputador Raspberry Pi, foi usada linguagem de programação em Python científico. Para a captação de sinais sísmico, foram utilizados dois sensores: geofone SM-24 e acelerômetro MEMS LSM303D (Figura 17). Uma vez que o sensor geofone SM-24 gera sinais analógicos, uma placa ADC de 16 bits (Figura 16 e Figura 17) foi necessária para realizar a conversão analógico-digital do sinal, enquanto que os sinais gerados pelo acelerômetro MEMS já se apresentam em formato digital.

Para calibração dos sensores, fez-se pesquisas sobre cada um com base nos datasheets dos fabricantes, tutoriais em livros e Internet, com o objetivo de se determinar os

parâmetros e fatores configuráveis para medição de cada um, de maneira a se obter a melhor SNR e maior sensibilidade nos dados amostrados. Dentre os parâmetros, estão a taxa de amostragem dos dados (*Rate* e AODR), *Gain* (ganho do sinal), *Bandwidth* (largura de banda) e dT (período de amostragem). Após a configuração desses parâmetros, realizou-se diversas medições em laboratório com a finalidade de testar o dispositivo.

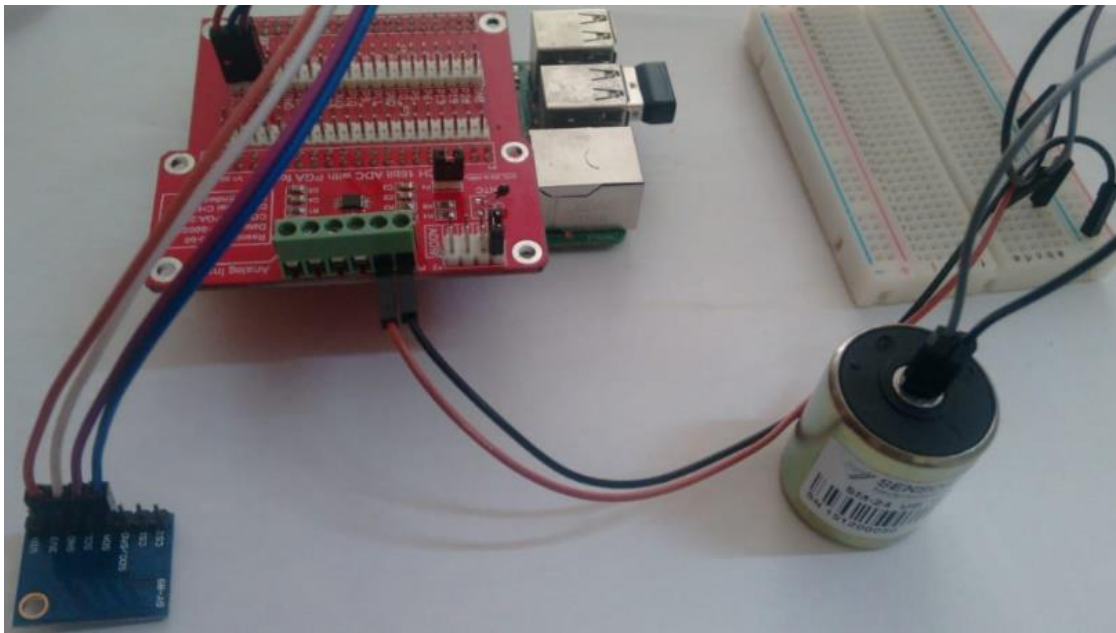


Figura 17. Sensores acoplados ao microcomputador de placa única. A esquerda, o acelerômetro (azul); no centro, Raspberry Pi com placa ADC 16 bits (vermelho) e KEYES (vermelho) com extensor de GPIO; na direita, o geofone. Fonte: Autor, 2018.

A Tabela 8 mostra os principais parâmetros configuráveis para a medição e análise de dados do geofone, no qual foram testados durante as medições experimentais. Os parâmetros *Gain*, *Rate* e dT são determinados para o ADC 16 bits na aquisição dos dados do geofone, enquanto F_s e também dT estão relacionados aos parâmetros usados para gerar os gráficos do domínio do tempo e fornecidos ao algoritmo para representar os sinais no domínio da frequência, a FFT (*First Fourier Transform*). A taxa de amostragem - *Rate* (número de pontos amostrados por segundo) - estabelecidos para a configuração do ADC varia de 8 a 860 SPS, já em relação ao parâmetro *Gain* (faixa entre a maior e menor amplitude mensuradas pelo sensor), foram testados diversos modos que variam de $2/3$ ($\pm 6,144V$) à 16 ($\pm 0,256V$).

Tabela 8. Parâmetros configuráveis para o ADC do geofone (*Gain*, *Rate* e *dT*) e software para representação dos sinais no domínio do tempo e frequência (*dT* e *Fs*). Fonte: Modificado de ADAFRUIT, 2018.

<i>Gain</i>	<i>Rate</i> (Hz)	<i>dT</i> (s)	<i>Fs</i> (Hz)
2/3 = $\pm 6,144V$	8	0,002	500
1 = $\pm 4,096V$	16	0,005	200
2 = $\pm 2,048V$	32	0,010	100
4 = $\pm 1,024V$	64	0,020	50
8 = $\pm 0,512V$	128	0,050	20
16 = $\pm 0,256V$	250		
	475		
	860		

Com relação ao acelerômetro, a Tabela 9 mostra os principais parâmetros configuráveis para este sensor. A taxa de amostragem (AODR) varia entre 3,125 a 1600 Hz e a largura de banda de 50 a 773 Hz. A largura de banda determina a frequência máxima que pode ser analisada (SIEMENS, 2018).

Tabela 9. Parâmetros configuráveis para o acelerômetro MEMS LSM303D. Fonte: Modificado de STMICROELECTRONICS, 2013.

AODR (Hz)	<i>Bandwidth</i> (Hz)	<i>dT</i> (s)	<i>Fs</i> (Hz)
3,125	50	0,002	500
6,25	194	0,005	200
12,5	362	0,010	100
25	773	0,050	20
50			
100			
200			
400			
800			
1600			

Além disso, analisou-se a densidade de ruído do acelerômetro que afeta diretamente a relação sinal/ruído do sensor. Esse parâmetro diz respeito ao ruído intrínseco do próprio acelerômetro, ou seja, o ruído relacionado a própria eletrônica do sensor sendo independente de qualquer ruído externo.

Para calcular a densidade de ruído, é necessário determinar a largura de banda usada no sensor e a EQ 3.1 mostra os parâmetros necessários para seu cálculo (SENSORMAG, 2018)

$$ruído = Densidade\ de\ ruído * \sqrt[2]{1,57 * largura\ de\ banda} \quad (3.1)$$

O datasheet do fabricante fornece o parâmetro *noise density* (densidade de ruído) como 150 ug/sqrt(Hz) para frequência de amostragem (AODR) de 100 H e aceleração linear FS de 2 g, sendo este o modo *default* (padrão). Entretanto, não há valores de *noise density* para outras configurações de AODR para o acelerômetro.

A Tabela 10 apresenta informações importantes sobre a densidade do ruído do acelerômetro: conforme é aumentado os parâmetros AODR (frequência) e largura de banda (*Bandwidth*), o ruído (desvio padrão) também aumenta (PIROVANI, 2018).

Tabela 10. Análise teórica e prática da densidade de ruído do acelerômetro. Fonte: Pirovani, 2018.

Frequência (Hz)	3,125	12,5	100	400
média (g)	1,029965	1,029948	1,051647	1,030713
Desvio padrão (g)	0,001222	0,002368	0,004214	0,010137

3.1.2 Software de leitura e análise

Na fase inicial de experimentação para captação e análise estatística dos dados, foram realizados testes utilizando apenas o acelerômetro MEMS (Figura 18), por ser didático e fácil domínio de software. Posteriormente, fez-se testes experimentais com o geofone SM-24 juntamente com o acelerômetro MEMS acoplados ao microcomputador de placa única Raspberry Pi para captação de dados simultâneos.

Durante a fase de testes em ambiente controlado para análise da SNR, toda a experimentação foi realizada em laboratório, tanto em ambiente com vibração (vibrações induzidas) como em ambiente amortecido (ruído do ambiente). Na medição dos dados dos sensores, foram aplicados estatística e análise de dados experimentais (VUOLO, 1996), como média e desvio padrão por meio de software próprio utilizando linguagem de programação em Python (Figura 18).

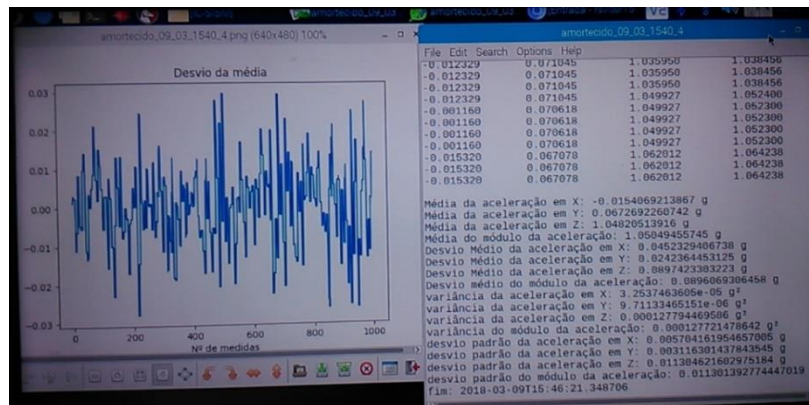


Figura 18. Aplicação de estatística e análise gráfica de dados experimentais da aceleração tridimensional (X, Y e Z) obtidos por meio do sensor acelerômetro LSM303D, utilizando a plataforma IDLE (Python 3). Fonte: Autor, 2018.

Com a finalidade de se evitar conflitos de programação, foram criados três softwares: um para medir os dados concomitantemente pelos sensores (Figura 19) e outros dois para análise individual dos sinais registrados pelos sensores (Figura 20).

```

jupyter mede_lsm303d_sm24_20181121_v4.1.py

File Edit View Language

50 while i > 0:
51     print('Amostragem começa em {} s'.format(i))
52     i -= 1
53     time.sleep(1)
54
55 adc.start_adc(0, gain=GAIN, data_rate=RATE)
56
57 lista_tempo = [0.0]*nummedidas
58 lista_geofone = [0]*nummedidas
59 lista_acelerometro = [0.0]*nummedidas
60 escala_geofone = 0.256/32767
61 start = time.time()
62 ti = time.time()
63 i = 0
64 while i < nummedidas:
65     t1 = time.time()
66     valor_geofone = adc.get_last_result()*escala_geofone
67     az = motion.accelerometer_z()
68     t2 = time.time()
69     if t2 - t1 < (dT - 0.0001): # dt = 2 ms
70         time.sleep((dT - 0.0001) - (t2 - t1))
71     t3 = time.time()
72     lista_tempo[i] = t3 - ti
73     lista_geofone[i] = valor_geofone
74     lista_acelerometro[i] = az
75     i += 1
76 adc.stop_adc()

```

Figura 19. Parte do software próprio responsável por fazer a aquisição de sinais dos sensores concomitantemente. Fonte: Autor, 2018.

Durante a aquisição de dados, o software responsável pela medição de sinais dos sensores (Figura 19) armazena os sinais sísmicos numa lista do tipo “.csv”, que posteriormente são lidos por outro software responsável por apresentar os mesmos no domínio do tempo e, em seguida, por meio da FFT, converte-los para o domínio da frequência,

onde é feita a análise espectral de sinais. A Figura 20 mostra parte do código que faz a leitura dos dados armazenados na lista pelo geofone. Vale ressaltar que durante a aquisição dos dados do geofone, os sinais são convertidos em Volts e depois armazenados. A representação de sinais no domínio do tempo e frequência é mostrada na Figura 21.

```
jupyter Analise_OFICIAL__geofone_oscilacao_amortecida_2048samples_gai... Last Checkpoint: uma hora atrás (autosaved)
File Edit View Insert Cell Kernel Widgets Help Trusted
import datetime # ?

Importa arquivo de dados '.csv' com 2a coluna sendo tensão (V) analógica do geofone e 3a coluna sendo aceleração em g do
acelerômetro LSM303D :

In [2]: col1 = np.genfromtxt('dados.csv', usecols=[1], delimiter=',', skip_header=1)

Limita os valores de lista que deseja usar. Exemplo: col1 = 2014. col1[:len(col1)/2] = 1024; col1[100:1000] => pega os dados do 101 até o 1000.

In [3]: #col1 = col1[:len(col1)//2]

In [4]: num_medidas = len(col1)
num_medidas

Out[4]: 2048

In [5]: print("Numero de medidas do geofone :", num_medidas)
print("Media :", col1.mean())
print("Desvio padrao :", col1.std())

Numero de medidas do geofone : 2048
Media : 0.06586977734374999
Desvio padrao : 0.00030145039890887396

In [6]: dT = 0.002 # Intervalo de amostragem
Fs = 1/dT # Taxa de Amostragem (samples/s ou Hz);
print("Intervalo de amostragem: {} s".format(dT))
print("Taxa de amostragem: {} Hz".format(Fs))
print("Resolução em frequência dF = Fs/N: {} Hz".format(Fs/num_medidas))
```

Figura 20. Parte do código de software próprio responsável por importar os dados sísmicos do geofone que são armazenados na lista “dados.csv” e posteriormente, representa os sinais no domínio do tempo e frequência para análise. Fonte: Autor, 2018.

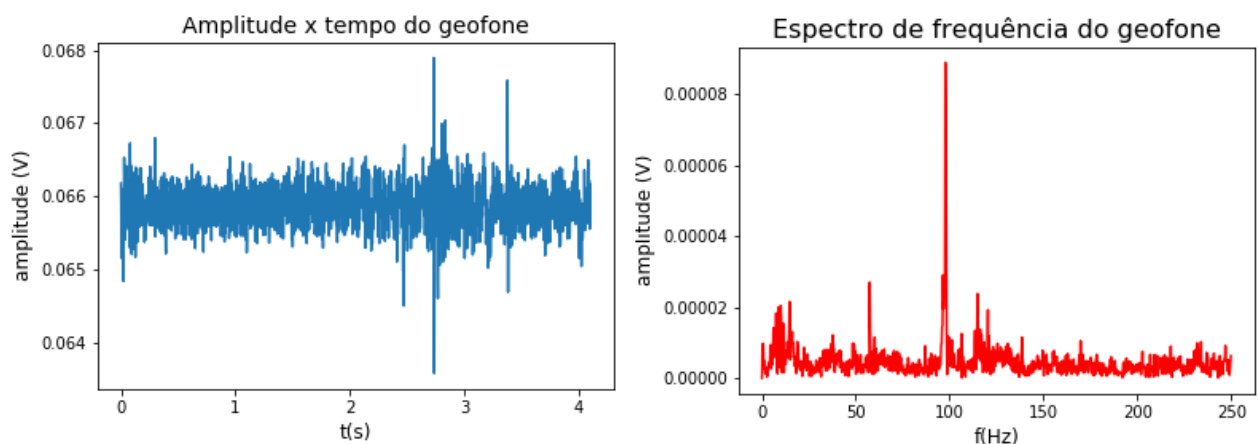


Figura 21. Representação gráfica dos dados do geofone no domínio do tempo (esquerda) e domínio da frequência (direita).

3.2 MEDIÇÕES EM CAMPO

Após a etapa de testes experimentais em laboratório para calibração dos sensores, foram feitas medições em ambiente externo para análise de dados reais (Figura 22).

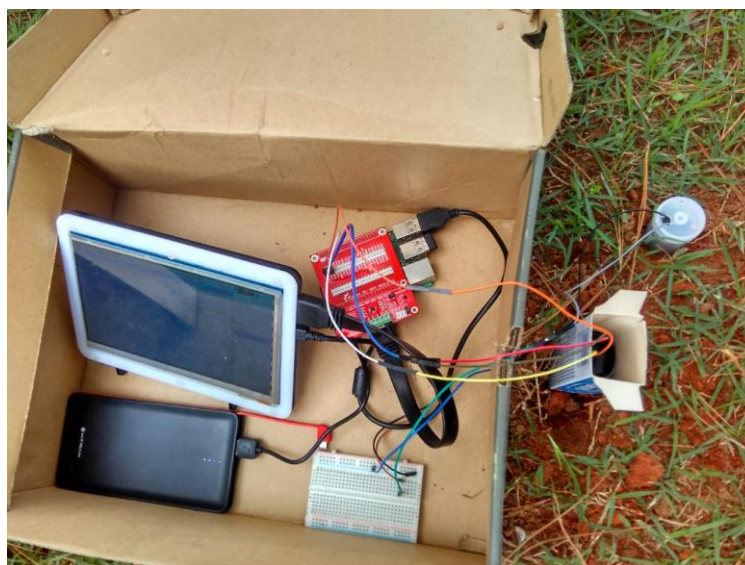


Figura 22. Sistema de aquisição de dados sísmicos em ambiente externo compostos pelos sensores Geofone SM-24 e acelerômetro MEMS LSM303D acoplados a um microcomputador de placa única Raspberry Pi 3B e uma tela WAVESHARE de 7 polegadas. Todo sistema é alimentado por um carregador portátil com capacidade de aproximadamente 10.000 mAh. Fonte: Autor, 2018.

Nessa etapa, foram feitas medições numa ponte do Bairro Vila do Sul, Alegre-ES e em ambiente mais afastado de fontes de sismos artificiais, para captar sismos naturais, no campus da UFES-Alegre. Em cada ponto de amostragem, foram coletados 600.000 sinais num intervalo de 1200 segundos. Durante as medições feitas na ponte, foi utilizado um cronômetro em sincronia com o dispositivo sísmico com o objetivo relacionar o tempo dos eventos sísmicos marcados no cronômetro com os picos de amplitude nos gráficos de domínio do tempo. Esse procedimento foi elaborado com a finalidade de verificar a sensibilidade e resposta dos sensores para eventos sísmicos de magnitudes diversas. Após a coleta dos dados, estes foram analisados e interpretados em escritório.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS DAS AMOSTRAGENS EXPERIMENTAIS

4.1.1 Parâmetros configurados

De acordo com os testes feitos em laboratórios, determinou-se os parâmetros configuráveis ideais (Tabela 11) para cada sensor, com o intuito de se obter a melhor SNR e sensibilidade do dispositivo sísmico. De acordo com o teorema de Nyquist, como a taxa de amostragem deve ser no mínimo duas vezes maior do que a componente de maior frequência do sinal a ser medido (240 Hz do geofone e 262 Hz do acelerômetro), o parâmetro *Rate* igual à 860 Hz e AODR igual à 800 Hz assegura resultados mais confiáveis. Dessa forma, uma taxa de amostragem alta garante uma representação mais precisa do sinal amostrado. Além disso, o parâmetro *Gain* (amplificador) de 16 ajuda a impulsionar sinais de mais baixa amplitude.

Tabela 11. Parâmetros configurados para os sensores.

Geofone	<i>Gain</i> (V)	<i>Rate</i> (Hz)	dT (s)	Fs (Hz)
	16 = ± 0.256	860	0.002	500
Acelerômetro	AODR (Hz)	<i>Bandwidth</i> (Hz)	dT (s)	Fs (Hz)
	800	362	0.002	500

Sendo a componente de maior frequência registrada pelo geofone de 240 Hz e do acelerômetro de 362 Hz (*bandwidth*), um período de amostragem dT igual a 0,002 s com frequência de amostragem Fs de 500 Hz garante uma largura de banda coerente com a sensibilidade de cada sensor. Uma Fs de 500 Hz possibilita uma largura de banda de 250 Hz representada no domínio da frequência – segundo a frequência de Nyquist – e, dessa maneira, é melhor aproveitado a sensibilidade de ambos sensores (com destaque ao geofone com medições de sismos que vão até 240 Hz), mostrando componentes de frequências de até 250 Hz.

Durante as medições experimentais, o resultado da aceleração tridimensional do acelerômetro MEMS não foi satisfatório para medições feitas num período de 2 ms. No decorrer do looping das medições, o tempo gasto para o obter as medidas nas 3 dimensões (X, Y e Z) ocorria sempre num período superior ao período ideal determinado para ambos sensores. Dessa forma, para otimização do tempo gasto para cada medição, determinou-se que todas as medidas da aceleração seriam obtidas apenas pelo eixo Z. Contudo foi

necessário fazer modificações no Drive do sensor para que as medições ocorressem em um único eixo.

Determinado a largura de banda do acelerômetro, pôde-se calcular sua densidade de ruído, como mostrado na EQ. 4.1

$$ruído = 150 * \sqrt[2]{1,57 * 362} = 3,58 \text{ mg RMS} \quad 4.1$$

Ou seja, as leituras do acelerômetro apresentam variações intrínsecas de 3,58 mg RMS no decorrer das amostragens de sinais devido a sua própria eletrônica. Esse ruído não é possível calibrar nem evitar. Também é importante lembrar que o parâmetro *noise density* usado para o cálculo teórico da EQ. 4.1 é informado para o modo *default*, com frequência de amostragem de 100 Hz. Não há informações de valores desse parâmetro para outras frequências de amostragem. Uma vez que a frequência de amostragem determinada para o acelerômetro foi de 800 Hz (Tabela 10), espera-se que o ruído teórico seja maior do que o encontrado na EQ. 4.1. Além disso, há outras fontes de ruído que podem ser somadas a esta, como a alimentação do dispositivo (que não é idealmente constante) e fiação muito longa

4.1.2 Análise de eventos sísmicos e espectros de frequência

A análise dos sinais sísmicos corresponde a uma análise de eventos sísmicos representados do domínio do tempo e de seus espectros de frequência. Desse modo, como já explanado anteriormente, os sinais amostrados são inicialmente representados no domínio do tempo e em seguida, utilizando um algoritmo via software, é feito a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*), sendo analisado o espectro de frequência dos sinais amostrados (KEAREY *et al.*, 2009). O domínio do tempo expressa a amplitude da onda em função do tempo; já no domínio da frequência, é expresso a amplitude e fase de suas ondas senoidais como função da frequência (KEAREY, 2009).

Os resultados experimentais dos sensores em ambiente amortecido (ruído do ambiente) e vibratório (vibração induzida) são mostrados na Figura 23 e Figura 24, respectivamente.

Na Figura 23, no domínio do tempo do geofone, nota-se um pico de sinal em 2,5 segundos com amplitude máxima de 0,068 V. Este pico possivelmente está relacionado a um veículo que passou próximo ao laboratório no momento da aquisição. Devido a menor sensibilidade do acelerômetro para sinais de baixas frequências, não é possível notar a amplitude de onda. Também se nota no espectro de frequência do geofone componentes de

frequência do sinal de maior amplitude (próximos de 20, 65, 125, 150, 175, 190 e 240 Hz) que se destacam do ruído de fundo. Quanto ao acelerômetro, o espectro dos componentes do ruído de fundo se sobrepõe ao sinal, assinalando uma baixa SNR.

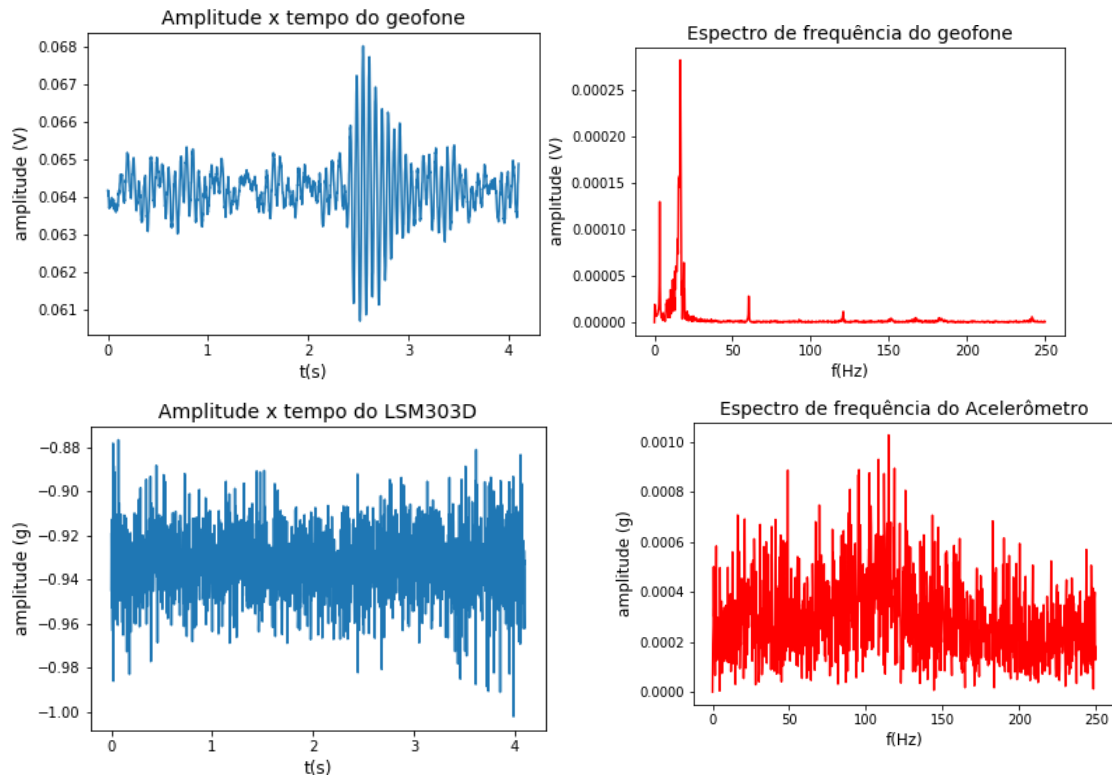


Figura 23. Medições experimentais dos sensores geofone SM-24 e acelerômetro MEMS LSM303D em ambiente amortecido (ruído de fundo). Fonte: Autor, 2018.

Já na Figura 24, em ambiente vibratório, nota-se que o acelerômetro MEMS apresenta uma SNR mais alta se comparado ao seu espectro de frequência em ambiente amortecido (Figura 23). Com relação aos sinais do geofone captados em ambiente vibratório, mesmo com maior quantidade de ruído no sinal em relação aos sinais captados em ambiente amortecido (Figura 23), é possível analisar sinais com componentes de maior frequência próximo à 125 Hz, também registrados pelo acelerômetro (Figura 24).

Pela análise da SNR dos sensores em ambiente amortecido e vibratório, verifica-se maior sensibilidade de geofone SM-24 para baixas frequências em relação ao acelerômetro, enquanto este apresenta boa precisão para frequências intermediárias (HONS, 2008).

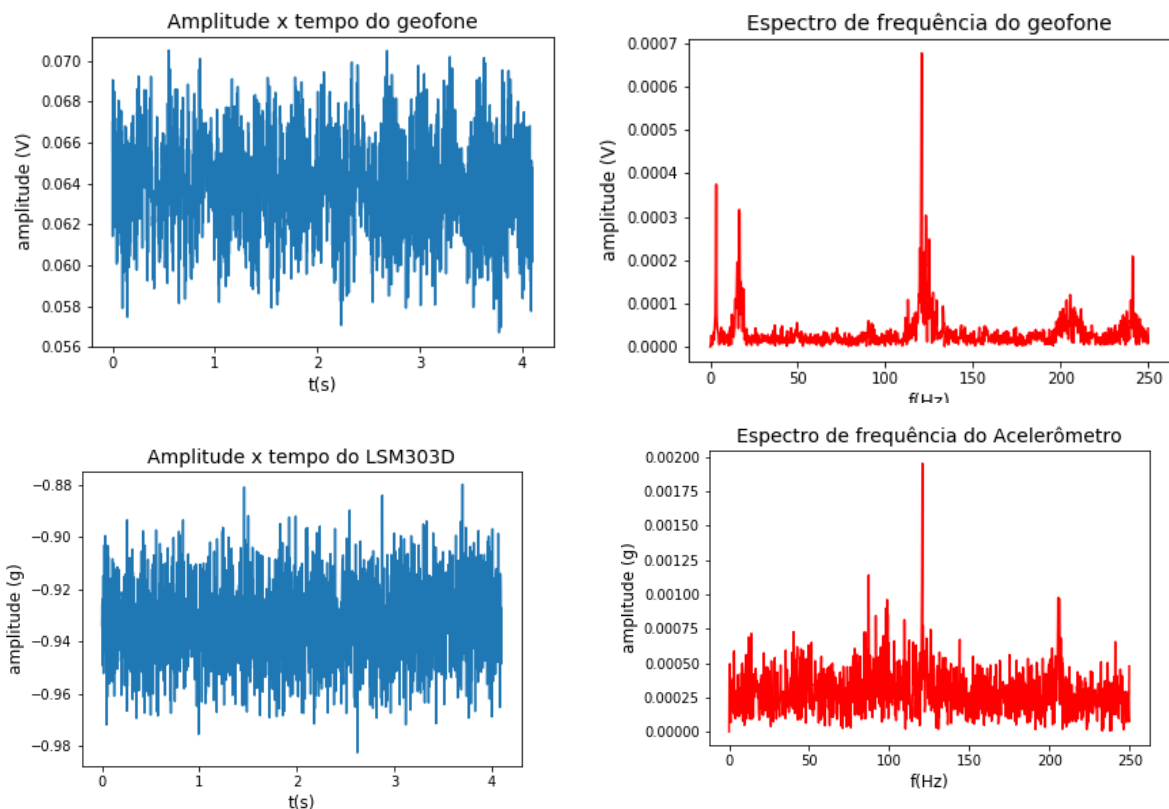


Figura 24. Medições experimentais dos sensores geofone SM-24 e acelerômetro MEMS LSM303D em ambiente vibratório (vibração induzida). Fonte: Autor, 2018.

4.2 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES EM AMBIENTE EXTERNO

4.2.1 Aquisição de dados na ponte do Bairro Vila do Sul

Os resultados aqui mostrados remetem-se aos sinais sísmicos amostrados numa ponte localizada no bairro Vila do Sul-Alegre (Figura 25), com o intuito de registrar o tempo dos eventos sísmicos e analisar os espectros dos sinais adquiridos pelos sensores referente às oscilações provocadas por diferentes veículos.

Durante a aquisição sísmica, diferentes veículos trafegavam sobre a ponte, sendo possível registrar as oscilações geradas por cada um deles. A Figura 26 mostra todos os eventos sísmicos registrados referente aos veículos que ali transitaram durante o tempo total de amostragem de 1200 segundos. Pode-se notar que o ruído de fundo no domínio do tempo do acelerômetro é intenso, sobrepondo a grande parte dos sinais, e assim, impede que a maioria dos eventos sísmicos sejam discriminados.



Figura 25. Ponte no bairro Vila do Sul onde foi feita a aquisição de dados (esquerda); sistema de aquisição de sinais sísmicos sobre a ponte (direita). Fonte: Autor, 2018.

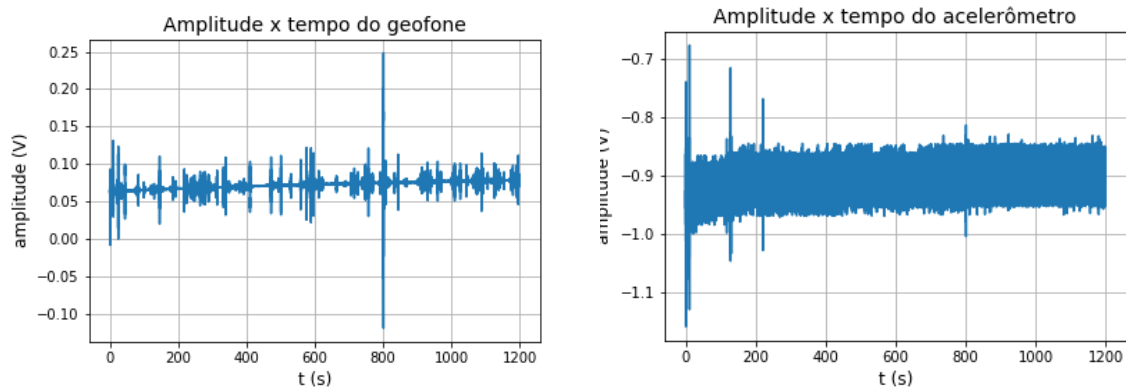


Figura 26. Eventos sísmicos registrados pelos sensores geofone e acelerômetro MEMS durante a amostragem de 1200 segundos. Fonte: Autor, 2018.

Além da menor sensibilidade do acelerômetro em relação ao geofone, outros fatores que podem ser responsáveis por sua baixa relação sinal/ruído, diz respeito ao rio que passava sob a ponte, aos prolongamentos dos fios para fazer as medições ou aos parâmetros relativos a própria configuração (AODR, Bandwidth).

A Figura 27 mostra uma análise mais detalhada de um subintervalo dos gráficos do domínio do tempo mostrados na Figura 26, que corresponde ao resultado de um evento sísmico gerado por um caminhão ao trafegar sobre a ponte e seu espectro de frequência. O pico no gráfico da Figura 27 de amplitude entre -0,10 e 0,25 V no geofone e amplitude entre -1,000 e -0,810 V no acelerômetro, ambos em t igual a 4 s, são concernentes ao mesmo evento registrado em t igual a 800 s nos gráficos da Figura 26. Analisando o espectro de frequência dos sinais de cada sensor (Figura 27), verifica-se que ambos registram componentes de maior frequência próximos a 15 Hz, isto é, a frequência de oscilação da ponte gerada pelo movimento do caminhão.

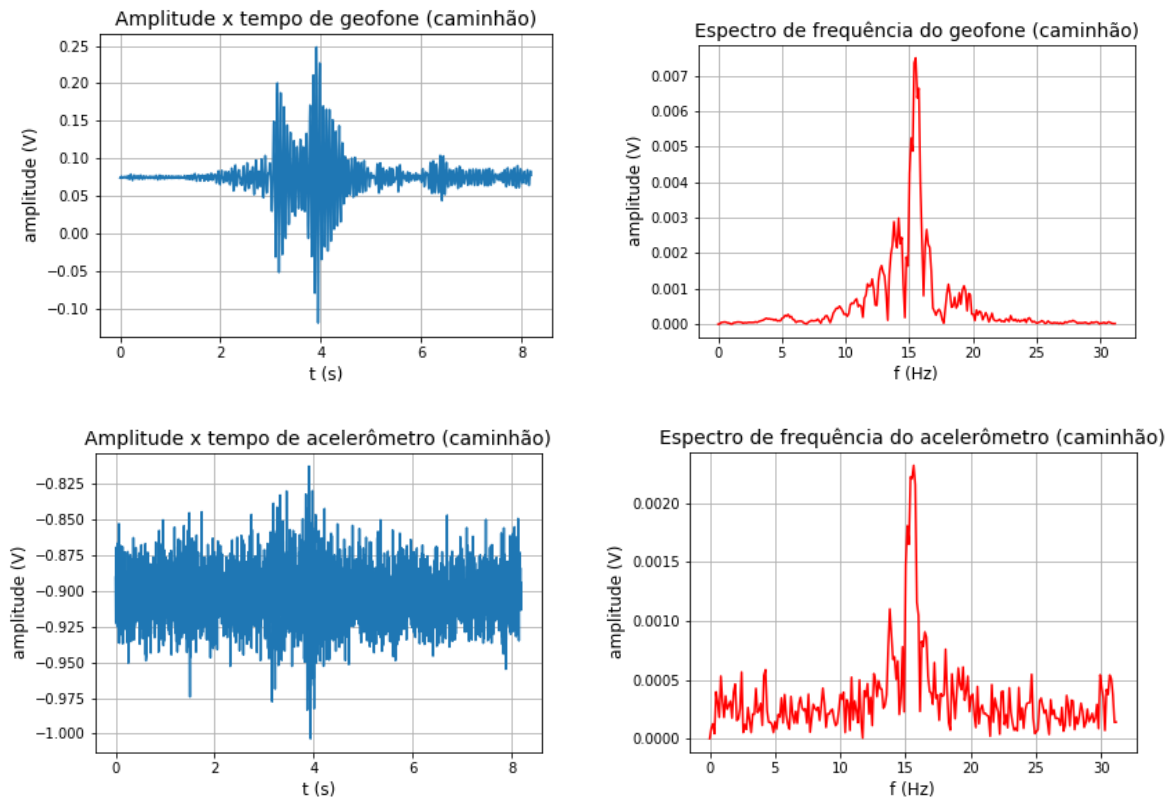


Figura 27. Evento sísmico gerado por um caminhão discriminado no domínio do tempo e o seu respectivo espectro de frequência referente aos sensores geofone e acelerômetro MEMS. Fonte: Autor, 2018.

A Figura 28 mostra um evento sísmico gerado por um carro, posterior à passagem do caminhão na ponte. No domínio do tempo, para o geofone, o evento sísmico é nitidamente identificado, sendo o pico em t igual a 2 s de amplitude entre 0.047 e 0.103 V. Já no acelerômetro, o ruído de fundo sobrepõe ao sinal, não sendo possível sua identificação, assinalando uma baixa SNR. Quanto ao espectro de frequência do sinal para ambos sensores, assinalam aproximadamente 16 Hz de frequência, que corresponde a frequência de oscilação da ponte ao passar o carro.

Um fato importante de se observar é que, apesar do carro e caminhão apresentarem espectros de frequências próximos, que corresponde a oscilação da ponte, no domínio do tempo e frequência, a amplitude da onda registrada pelo caminhão é superior à amplitude da onda gerada pelo carro, o que é de se esperar devido a maior quantidade de eixos nesse veículo.

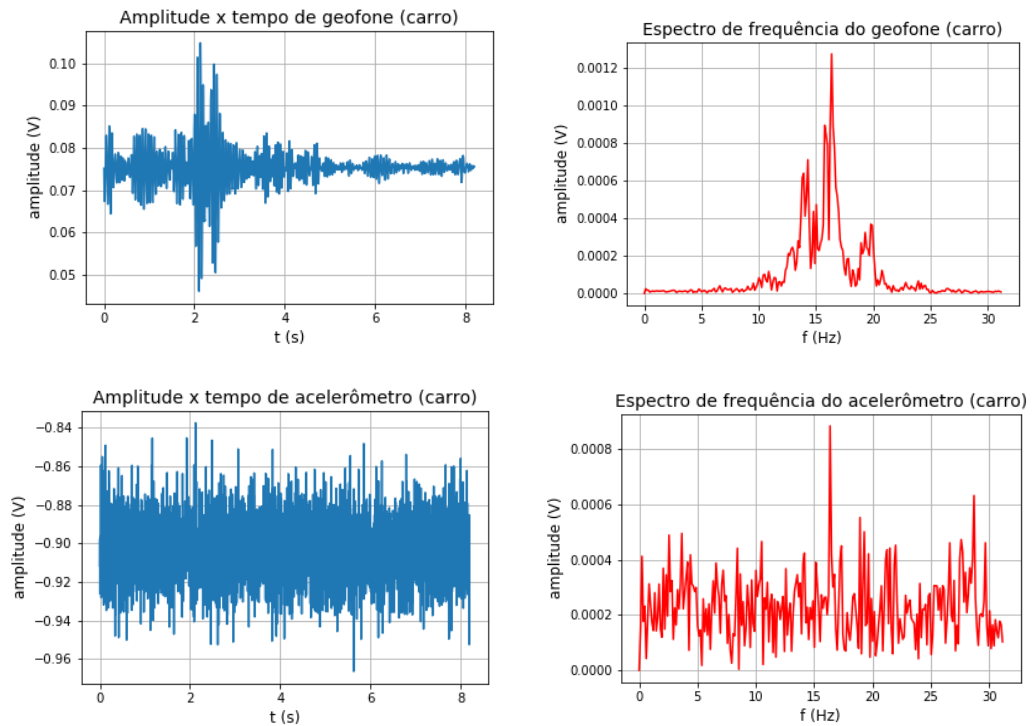


Figura 28. Resultados do evento sísmico gerado por um carro representado no domínio do tempo e o seu respectivo espectro de frequência referente aos sensores geofone e acelerômetro MEMS. Fonte: Autor, 2018.

4.2.2 Aquisição de dados em ambiente afastado

A aquisição de dados nesse ponto teve por objetivo captar vibração de fundo, ou seja, vibrações naturais (sismos não induzidos). As medições foram realizadas no Campus de Alegre-UFES (Figura 29).



Figura 29. Dispositivo sísmico de aquisição (esquerda); local onde foi feito a medição (direita). Fonte: Autor, 2018.

Os resultados da oscilação de fundo registrados pelos sensores encontram-se na Figura 30. No gráfico do domínio do tempo do geofone, mesmo que a presença de ruído de fundo seja muito intensa no sinal, alguns picos são evidentes durante todo tempo de amostragem. Um fato relevante é a oscilação do sinal DC (ruído de fundo contínuo sobre o qual varia o sinal) de forma lenta no decorrer do tempo. Na medição de campo sobre a ponte (Figura 26), o sinal DC se manteve constante para ambos sensores. Possíveis razões para esse comportamento oscilante do sinal DC deverá ser estudado posteriormente. A baixa sensibilidade do acelerômetro MEMS (Figura 30) para vibrações de baixa frequência e amplitude mais uma vez apresenta resultados com ruído de fundo sobrepondo o sinal. No espectro de frequência dos sensores há baixa resolução devido ao grande número de sinais (600.000 dados). Ainda assim, é possível notar a intensidade de ruídos no sinal do acelerômetro, além de quatro componentes de frequência: 1, 50, 100 e 150 Hz. Também é interessante notar no espectro de frequência do geofone componentes de maior frequência com menores amplitudes em relação ao espectro de frequência do acelerômetro, possivelmente devido a sua sensibilidade para baixas frequências.

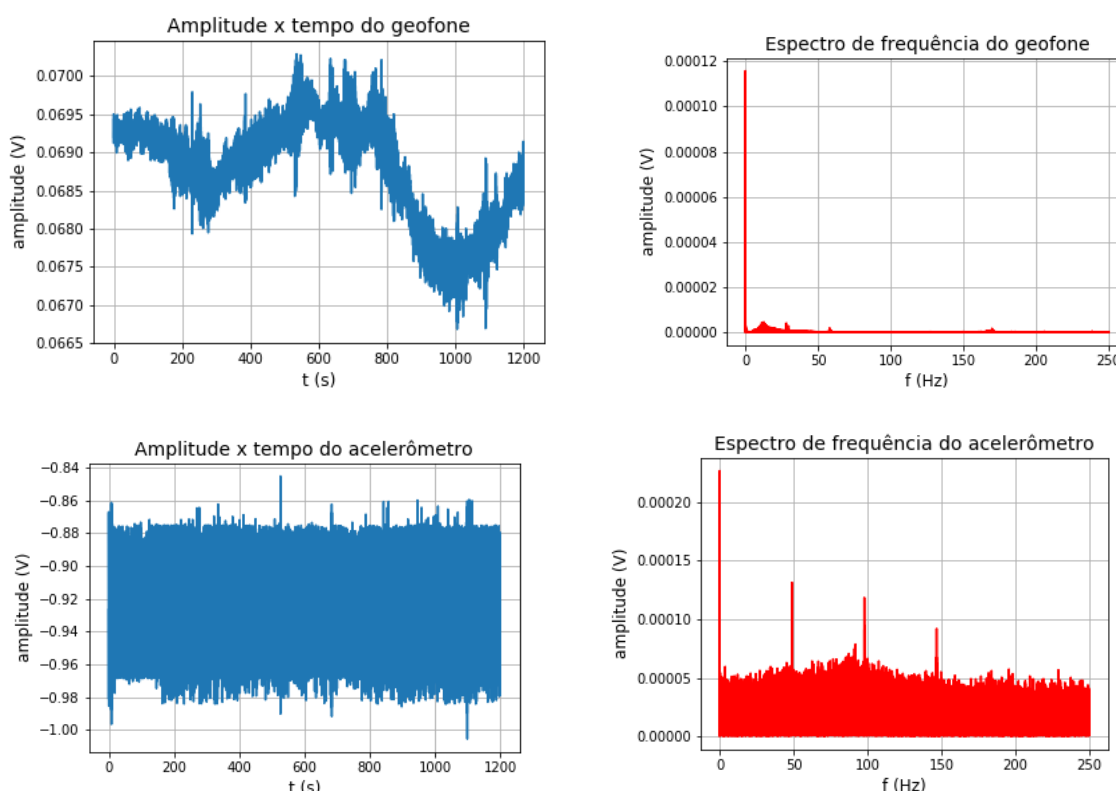


Figura 30. Domínio do tempo e frequência da oscilação de fundo captado pelos sensores geofone SM-24 e acelerômetro MEMS LSM303D. Fonte: Autor, 2018.

Na Figura 31 é mostrado um intervalo dos resultados apresentados na Figura 30 no qual o sinal é analisado com mais detalhe. Pela análise gráfica do domínio do tempo, apesar

da grande intensidade de ruído, se nota alguns picos do sinal em comum a ambos, como em t igual a 6 s. No espectro de frequência do geofone, verifica-se sinais com baixas frequências próximo a 13 Hz e amplitude máxima de 0,00004 V. Com relação ao acelerômetro, sua baixa relação SNR não permite discriminar com precisão os espectros de frequência do sinal, já que estes também são de baixas amplitudes.

Uma vez que a aquisição de sinais foi efetuada no próprio Campus da Universidade, devido à alta sensibilidade do geofone para sinais de baixa frequência, é provável que grande parte dos sinais captados estejam relacionados com sismos artificiais (equipamentos funcionando em laboratório). Para medições mais precisas dos sismos naturais, é necessário fazer medições em ambientes mais isolados.

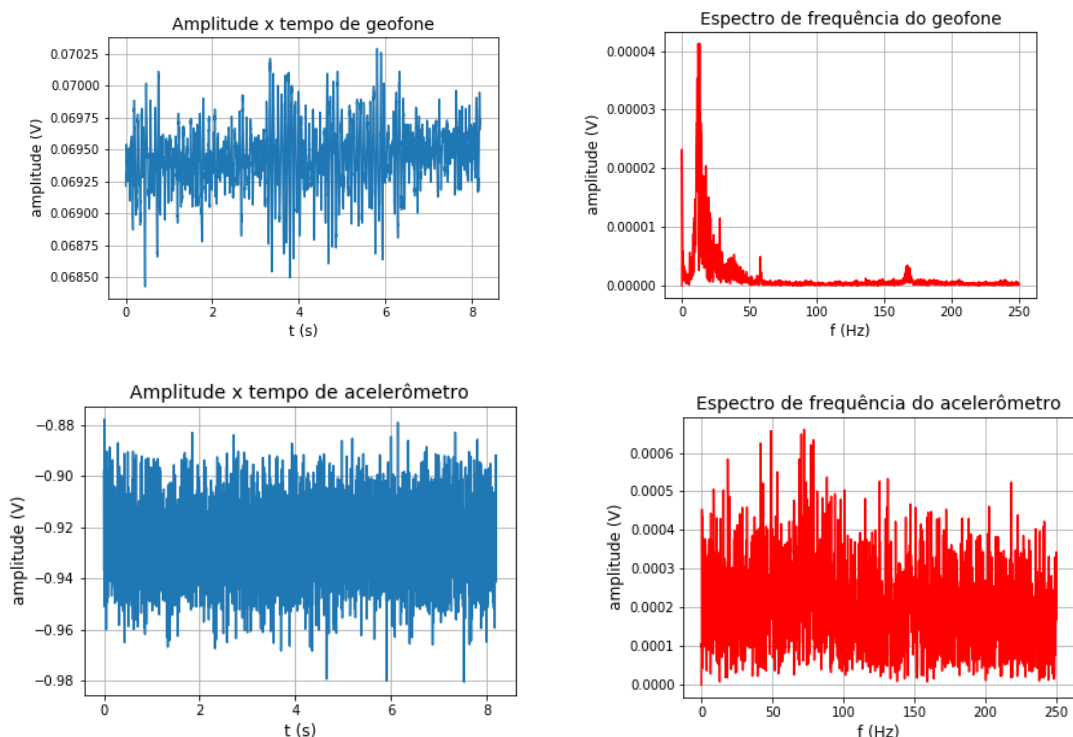


Figura 31. Análise de um intervalo de tempo em relação ao tempo total de amostragem. Fonte: Autor, 2018.

A Figura 32 mostra o intervalo de frequência até 60 Hz com maior resolução em relação à Figura 31 para análise das componentes de frequência captados pelos sensores. No espectro de frequência do geofone são mostrados componentes de baixas frequências com maiores amplitudes, próximos a 13 Hz. Também ocorre componentes com aproximadamente 28 e 58 Hz de menores amplitudes. No acelerômetro, o espectro de frequência do sinal encontra-se incorporado com ruídos, o que impedem a análise de componentes reais dos sinais captados.

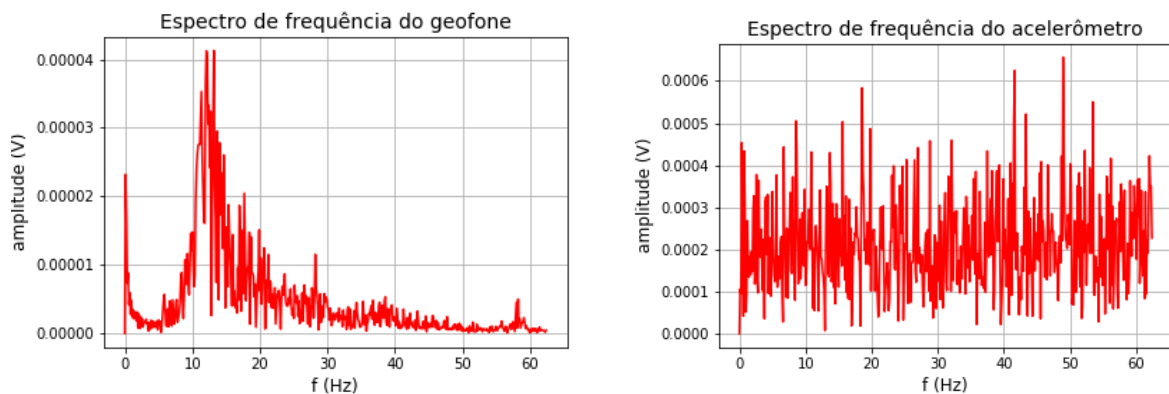


Figura 32. Espectro de frequência com maior resolução dos sinais amostrados. Fonte: Autor, 2018.

4.3 TRABALHOS FUTUROS

Como se objetiva desenvolver um protótipo para usuário final, este trabalho apresentou parte dos resultados obtidos referente ao seu desenvolvimento. Contudo, haverá um planejamento para sua continuação via Projeto de Iniciação Científica intitulado "Protótipo de dispositivo sísmico de baixo custo com geofone SM-24", com resultados previstos até 07/2019. O desenvolvimento desse dispositivo está ligado ao Projeto PRONEX FAPES/CNPq - IoT, no qual fornecerá mais componentes para sua continuação. Dessa forma, pretende-se implementar no dispositivo sísmico varios recursos além de outros presentes no Raspberry Shake, tais como:

- Uso de IoT para transmissão de dados sem fio;
- Utilizar um ADC ADS1256 de 24 Bits de maior resolução, porém tem maior custo;
- Utilizar tela Epaper, no qual apresenta menor consumo de energia e maior legibilidade em ambientes isolados;
- Aumentar a velocidade de leitura do acelerômetro por modificação via drive e/ou otimização via código. Além disso, testar novos acelerômetros com maior sensibilidade;
- Gerar arquivos no formato MiniSEED, conforme usado na indústria do petróleo;
- Fazer uma versão melhorada do software que registre dados de acordo com um intervalo de horas específico, de forma a garantir maior autonomia da bateria para medições de longas durações/dias;
- Utilizar o Raspberry Pi modelo 3A+, que tem a mesma velocidade do Raspberry Pi 3B+ (modelo mais atual e processamento um pouco melhor do que o modelo 3B), porém, tem metade da memória RAM (512MB) e menos conexões (só uma USB de saída).

Além de que apresenta menor custo (US\$25) em relação ao Raspberry Pi modelo 3B e 3B+ somado ao menor consumo de energia e peso;

- Análise de dimensionamento de painel solar para ter alimentação autônoma;
- Testar diferentes configurações de sensores como mostrado na Figura 12;
- Mostrar em servidor web os últimos eventos sísmicos captados pelo dispositivo, visto que o microcomputador de placa única Raspberry Pi tem poder de processamento equivalente ao do Raspberry Shake.

Como diferencial, pretende-se testar outra configuração de hardware, o BBC micro:Bit conectados via bluetooth como uma malha de sensores para aquisição de sinais sísmicos enviando para um BBC micro:bit conectado a um Raspberry que funcionará como *gateway*.

5 CONCLUSÃO

A análise de sinais sísmicos do domínio do tempo e frequência foi de grande relevância para a interpretação dos sinais amostrados. Por vezes, devido à grande complexibilidade da forma de onda, a Transformada Rápida de Fourier (FFT) se faz de suma importância para sua análise, visto que é mais fácil interpretar seu espectro de frequência do que os sinais originais exibidos no domínio do tempo (KEAREY *et al.*, 2009), principalmente quando há baixa SNR e o ruído sobrepõe-se ao sinal. Contudo, no domínio do tempo foi possível discriminar eventos sísmicos e suas amplitudes ao longo do tempo, conforme mostrado durante a amostragem na Ponte do Bairro Vila do Sul.

O desenvolvimento do software para análise de sinais (Figura 20) apresentou muitas limitações. Houveram inúmeros problemas relacionados com saturação dos sinais do cálculo da FFT, além de problemas com a escala gráfica da frequência. Outras dificuldades encontradas estão relacionadas com o software de análise dos sinais. A representação dos sinais no domínio do tempo e frequência de ambos sensores gerados por um único software apresentava diversos erros de programação. Por conta disso, fez-se dois softwares de análise individuais para cada sensor. Ademais, o software de leitura e análise dos sensores não foram disponibilizados em anexo pois há uma possibilidade de comercialização do protótipo para usuário final. Contudo, até o próximo ano serão vistas todas as possibilidades para sua divulgação ou não.

De acordo com os resultados experimentais em ambiente vibratório (Figura 24) e os resultados da amostragem na ponte do Bairro Vila do Sul (Figura 26, Figura 27 e Figura 28), conclui-se que o acelerômetro MEMS apresenta precisão e maior sensibilidade para sinais

com frequência intermediária de altas amplitudes. Este fato pôde ser comprovado pela análise dos sinais sísmicos no domínio do tempo e frequência entre o caminhão (Figura 27) e o carro (Figura 28), no qual o caminhão gerou vibrações com maiores amplitudes, promovendo assim melhor SNR.

Já os resultados experimentais do geofone em ambiente amortecido (Figura 23) e os resultados de campo para captação de vibração natural (Figura 30 e Figura 31) comprovam sua sensibilidade para baixas frequências, próximas a 10 Hz. Contudo, para captar sismos naturais, a aquisição de sinais sísmicos deve ser feita o mais afastado possível de qualquer outra fonte que possa gerar sismos artificiais, o que não foi o caso das medições aqui feitas. A aquisição de sinais no Campus da UFES está passível a influência de sismos artificiais. Ainda, com relação aos sinais captados pelo geofone, deve-se analisar quais fatores podem estar relacionados com a oscilação do Sinal DC da Figura 30, tendo neste trabalho, razões desconhecidas.

Um dos principais fatores responsáveis pela baixa SNR do acelerômetro, podem estar ligados aos ruídos de alimentação do dispositivo e de fiação, associados ao ruído aleatório (ruído do ambiente) e coerente (fonte sísmica). Ademais, o cálculo teórico de ruído intrínseco do acelerômetro, mostrado na equação (EQ. 4.1), não corresponde ao ruído real, em virtude do valor de densidade de ruído usado como parâmetro está definido para uma taxa de amostragem de 100 Hz. Esse parâmetro definido para o modo *default* não pode ser calibrado. Visto que o ruído intrínseco aumenta proporcionalmente taxa de amostragem (AODR) e largura de banda (*Bandwidth*), conforme mostrado na Tabela 10 (Pirovani, 2018), para uma taxa de amostragem de 800 Hz configurado para o sensor, espera-se um ruído intrínseco maior do que o calculado na EQ. 4.1. À vista disso, sua baixa sensibilidade para detectar sinais de baixas frequências e amplitude podem, de fato, estar associado a todos esses fatores. E, para sinais com baixa SNR, é necessário um processamento especial para sua análise, o que poderá ser implementado em trabalhos futuros como parte do software de análise, a fim de melhorar as informações contidas nas formas de ondas (KEAREY *et al.*, 2009).

Portanto, pela análise geral dos resultados obtidos pelos sensores, reafirma-se os dados comprovados por Hons (2008), visto que o geofone dispõe de alta SNR para baixas frequências, enquanto o acelerômetro MEMS para frequências intermediárias. Sendo assim, conclui-se que ambos sensores são complementares, justificando sua aplicação em sismologia, visto que sismos de altas frequências podem saturar com ruídos os sinais do geofone, sendo registrado apenas por acelerômetros MEMS.

Com relação ao Raspberry Shake, devido ao seu preço de mercado relativamente alto, neste trabalho procurou-se desenvolver todo hardware e software de um dispositivo similar,

com a finalidade de aprendizagem e domínio, além de apresentar um protótipo de baixo custo e software aberto, isto é, mostrar ao público todo o código de programação desenvolvido para leitura dos sensores e análise dos sinais sísmicos (caso não seja comercializado). Para o desenvolvimento do dispositivo sísmico aqui apresentado, o Raspberry Pi Shake serviu como um protótipo de redução de risco, uma vez que grande parte do seu hardware também foi aproveitado no presente trabalho. Contudo, é necessário que algumas implementações ainda sejam feitas, o que acarretará num planejamento para a continuação de seu desenvolvimento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAFRUIT. **Raspberry pi Analog to Digital Converters**. 2016. Disponível em: <<https://learn.adafruit.com/raspberry-pi-analog-to-digital-converters/ads1015-slash-ads1115>>. Acesso em: 22 nov. 2018.

ADAFRUIT. **Technical details**. Disponível em: <<https://www.adafruit.com/product/1085>>. Acesso em: 26 ago. 2018.

AZEVEDO, P. A. de; ROCHA, M. P. **Estudo do método geofísico de sísmica de refração com aplicação no futuro trecho norte do metrô de Brasília**. 2010. 30 f. Monografia (Graduação) - Curso de Física, Departamento de Geociências, Universidade Católica de Brasília, Taguatinga, 2010.

AYLOR, W. K. Business performance and value of exploration 3-D seismic. **The Leading Edge**, Tulsa, v. 14, n. 7, p. 797-801, jul. 1995.

BERTULANI, C.A. Projeto: Ensino de Física à distância. **O que é Geofísica?** 2009. Disponível em: <<http://www.nace.com.br/doc/geofisica.pdf>>. Acesso em: 6 ago. 2018.

CAMBOIS, G. Instrumentation or how many sows' ears does it take to make a silk purse?. **The Leading Edge**, Massy, v. 21, n. 9, p.816-818, set. 2002.

ELEMENT14. **Raspberry Pi 3 Model B**. Disponível em: <https://www.terraelectronica.ru/pdf/show?pdf_file=%252Fds%252Fpdf%252FT%252FTechicRP3.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2018.

ERNESTO, M.; USSAMI, N. **APOSTILA DA DISCIPLINA AGG0115**. 2002. Colaboradores: Eder C. Molina, Leila S. Marques. Disponível em: <http://www.iag.usp.br/~eder/apostila/00_Introducao_a_Geofisica_IAG_USP.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2018.

FABER, K.; MAXWELL, P. W. Geophone Spurious Frequency: What is it and How Does it Affect Seismic Data Quality? **Canadian Journal Of Exploration Geophysics**. [S. l], p. 46-54. dez. 1997. Disponível em: <http://csegjournal.com/assets/pdfs/archives/1997_12/1997_12_geophone_spur_freq.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2018.

FEUP-FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO. **Prospecção geofísica**. Disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/cap_8_ge.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2018.

HORSTMANN, A. **Determinação de pontos de impacto balístico utilizando arranjo de geofones**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro. 2007.

IAG-INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIENCIAS ATMOSFÉRICAS. **O que é geofísica?** Disponível em: <<http://www.iag.usp.br/geofisica/graduacao/content/o-que-%C3%A9-geof%C3%ADsica#>>>. Acesso em: 6 ago. 2018.

JUMIA. **Generic TA-HW-660 3.3V ADS1115-ADC Module Programming Supplies For Raspberry Pi 3/2/B+*Red**. Disponível em: <<https://www.jumia.com.ng/generic-ta-hw-660-3.3v-ads1115-adc-module-programming-supplies-for-raspberry-pi-32bred-11813514.html>>. Acesso em: 29 nov. 2018.

KEAREY, P.; BROOKS, M; IAN, H. **Geofísica de exploração**. Tradução de Maria Cristina Moreira Coelho. São Paulo: Oficina de textos, 2009. 438 p. Original inglês.

KRAFT, M.; LEWIS, C.P.; HESKETH, T.G. Control system design study for a micromachined accelerometer. **IFAC**, Smolenice, v. 2, p. 139-143, jan. 1997.

KRUK, J. V. **Reflection seismic** I. WS 2004/2005, Institut für Geophysik ETH, fev. 2005.

LORENZO, J. M. **Geophones by Tom Boyd Colorado School of Mines**. Disponível em: http://www.geol.lsu.edu/jlorenzo/ReflectSeismol03/Geophones_files/geophones.htm. Acesso em: 13 ago. 2018.

LOWRIE, W. **Fundamentals of geophysics**. Institute of Geophysics, Swiss Federal Institute of Technology, Cambridge University Press, Zürich, Switzerland, 1997.

LUIZ, J.G; SILVA, L.M.C. **Geofísica de Prospeção**. Belém: Cejup, 1995. 311 p.

MOLINA, E. C. Sismologia. Disponível em: http://www.iag.usp.br/~eder/ensinarcompesquisa/Sismologia_f.pdf. Acesso em: 02 out. 2012.

NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. **Introduction to data acquisition**. 2018. Disponível em: <http://www.ni.com/white-paper/3536/en/>. Acesso em: 20 ago. 2018.

NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. **Aquisição de sinais analógicos: largura de banda, teorema de amostragem de Nyquist e aliasing**. 2016. Disponível em: <http://www.ni.com/white-paper/2709/pt/>. Acesso em: 18 ago. 2016.

NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. **O que é condicionamento de sinal?** 2012. Disponível em: <http://www.ni.com/white-paper/10630/pt/>. Acesso em: 21 ago. 2018.

NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. **Aliasing and sampling rate**. 2016. Disponível em: <http://www.ni.com/example/25120/en/>. Acesso em: 21 ago. 2006.

OLIVEIRA, F. **EstGeoMag: Integrando soluções de Hardware, Software e Internet das Coisas na medição de grandezas Geomagnéticas**. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 2017.

PIROVANI, F. E. S. **Uso de acelerômetros MEMS de baixo custo em Sismologia e Geofísica**. Alegre: Anais da Jornada de Iniciação Científica da Ufes, 2018. 4 p. Projeto: Computação Física e Física Computacional Móvel.

PSENCIK, I. **Basics of plane wave propagation and the seismic ray method**. Lecture notes. CPGG/UFBa, Salvador, Brasil, 2000.

RASPBERRY PI FOUNDATION. **Raspberry Pi**. Disponível em: <https://www.raspberrypi.org/>. Acesso em: 19 jan. 2018.

RASPBERRY SHAKE. **Raspberry Shake Products**. Disponível em: <https://raspberrysshake.org/products/>. Acesso em: 28 nov. 2018.

ROSA, A.L.R. **Análise do sinal sísmico**. 2010 ed. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGf), 2010. 668 p.

SENSOR NEDERLAND B.V. **SM-24 Geophone Element**. 2006. Disponível em: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Accelerometers/SM-24%20Brochure.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2018.

SENSORMAG. **Noise measurement**. 2011. Disponível em: <https://www.sensormag.com/embedded/noise-measurement>. Acesso em: 29 nov. 2018.

SERCEL INCORPORATED. **Geophones-Hydrophones**. 2005. Disponível em: <http://www.sercel.com>. Acesso em: 16 ago. 2018.

SHERIFF, R. E. **Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics**. SEG - Society of Exploration Geophysicists, 4a ed., Houston, 2001.

SIEMENS. **Digital Signal Processing: Sampling Rates, Bandwidth, Spectral Lines, and more**. 2017. Disponível em: <https://community.plm.automation.siemens.com/t5/Testing-Knowledge-Base/Digital-Signal-Processing-Sampling-Rates-Bandwidth-Spectral/ta-p/402991>. Acesso em: 22 nov. 2018.

SILVA, E.F.C.DA. **Discussão Sobre Critérios Ambientais para Licenciamento de Pesquisas Sísmicas Terrestres no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Sistema de Gestão) - Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2009.

SPARKFUN. **Geofone SM-24**. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/products/11744>>. Acesso em: 30 nov. 2018.

STMICROELECTRONICS. **LSM303D**. Disponível em: <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/lsm303d.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2018.

TEIXEIRA, W. et al. **Decifrando a Terra**. 2. ed. São Paulo: Nacional, 2009. 624 p.

TEIXEIRA, W. L. E. **Um estudo das condições de percolação e estabilidade em barragens de terra mediante métodos geofísicos: caso do dique de Sant Llorenç de Montgai-Espanha**. 118p. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

THOMAS, J.E. et al. **Fundamentos de Engenharia do Petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.