

# EstSism - Estação Sísmica de baixo custo com Raspberry Pi, sensores geofone e acelerômetro MEMS

Lempe, L. F.<sup>1\*</sup>; Colistete Jr.<sup>2\*</sup>, R.; Vicente, J. F.<sup>3\*</sup>

1 Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, ES, Brasil

2 Departamento de Química e Física, Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, ES, Brasil

3 Departamento de Geologia, Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, ES, Brasil

\*e-mail: luizfelipeclemepe@live.com; roberto.colistete@ufes.com; jenesca.lima@ufes.com

---

## Resumo

A utilização de sensores sísmicos apresenta grandes aplicações na área da Geofísica Aplicada, sendo empregados em centros de sismologia, companhias de segurança, atividades de mineração etc. O principal objetivo deste trabalho foi analisar a relação sinal/ruído (SNR) da EstSism, uma estação sismológica confeccionada a baixo custo empregando computador de placa única Raspberry Pi e dois sensores: geofone SM-24 e acelerômetro MEMS LSM303D. Para tanto, foi desenvolvido um software gratuito e de código-aberto em Python para leitura e análise de sinais sísmicos no domínio do tempo e frequência. Testes experimentais foram realizados em laboratório para calibrar os sensores por meio de parâmetros configuráveis, de forma a se obter a melhor SNR. Em seguida, fez-se amostragem de dados em ambientes externos para captar sinais reais em uma ponte do bairro Vila do Sul e no Campus da Universidade Federal do Espírito Santo, ambos no Município de Alegre-ES. Os resultados dos testes de campo demonstraram que o geofone apresenta alta SNR para vibrações de baixas frequências, enquanto o acelerômetro MEMS para vibrações de frequências intermediárias. Face ao alto custo e falta de opções nacionais de dispositivos sísmicos no mercado brasileiro atual, a EstSism mostra-se viável em sismologia e em aplicações sísmicas.

## Abstract

The use of seismic sensors presents great applications in the area of Applied Geophysics, being employed in seismology centers, security companies, mining activities etc. The main objective of this work was to analyze the signal-to-noise ratio (SNR) of EstSism, a low-cost seismic station employing a single board computer Raspberry Pi and two sensors: SM-24 geophone and LSM303D MEMS accelerometer. Therefore, a free and open-source software was developed for reading and analyzing seismic signals in the time and frequency domains. Experimental tests were performed in laboratory to calibrate the sensors by means of configurable parameters, in order to obtain the best SNR. Then, data were sampled in external environments to capture real signals in a bridge in the Vila do Sul neighborhood and in the Campus of the Federal University of Espírito Santo, both in Alegre-ES. The results of field tests have demonstrated that the geophone presents high SNR for low frequency vibrations, while the MEMS accelerometer for intermediate frequency vibrations. In view of the high cost and lack of national options for seismic devices in the current Brazilian market, EstSism is feasible in seismology and seismic applications.

Keywords: Geophysics, Seismology, Sensors, Signal Analysis

## 1. Introdução

A sismologia se baseia na aquisição e análise de ondas sísmicas originadas naturalmente como nos terremotos ou de forma artificial por iniciativa antrópica, como mineração, e atividades petrolíferas. (ERNESTO; USSAMI, 2002). Independente da fonte sísmica, as ondas sísmicas se propagam em todas as direções até alcançarem a superfície terrestre, onde são captadas por meio de dispositivos como geofones, hidrofones e acelerômetros MEMS (Sistemas Micro-Eletromecânicos).

Nos últimos anos, a popularização de sensores, atuadores e microcomputadores tornou esses materiais mais acessíveis, possibilitando aplicação em diversos segmentos - centros de sismologia, companhias de segurança, atividades para a exploração de petróleo e mineração. A exemplo de aplicação de sensores sísmicos à microcomputadores, tem-se o Raspberry Shake, entre USD 370-500, um dispositivo (sismógrafo) com geofone e acelerômetros, 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 (KICKSTARTER, 2018).

Em relação à aplicação de geofones e acelerômetros em dispositivos sísmicos, no que diz respeito ao espectro de amplitude de sinal, verifica-se algumas características pares entre ambos. Em função de padrões de ruídos diferentes no ambiente, os geofones registram sismos com baixas frequências (inferiores a dezenas de Hz) enquanto os acelerômetros MEMS medem melhor frequências intermediárias (centenas de Hz). Assim, o geofone disporia de maior vantagem na SNR com a energia de reflexão para longas distâncias (HONS, 2008).

Após a aquisição sísmica por meio dos sensores, o sinal sísmico é geralmente expresso em função do tempo e das coordenadas espaciais a fim de que seja analisado. Contudo, em diversas ocasiões, torna-se mais adequado representar o sinal no domínio da frequência, quer seja ele temporal ou espacial, por meio de um algoritmo – *Fast Fourier Transform* (Transformada Rápida de Fourier) (ROSA, 2010).

Este trabalho teve como objetivo analisar a relação sinal/ruído da EstSism, uma estação sísmica confeccionada a baixo custo (USD 120-190) utilizando computador de placa única Raspberry Pi (RPi), sensores geofone SM-24 e acelerômetro MEMS LSM303D. Para tanto, foram feitos diversos testes em laboratório com os sensores na captação do sinal sísmico para sua calibração, e, posteriormente, análise das aquisições sísmicas feitas em campo, verificando a SNR em ambos sensores.

## 2. Materiais e métodos

A metodologia foi dividida em duas etapas: a primeira etapa consistiu na confecção da EstSism e calibrações dos sensores feita por meio de testes laboratoriais, incluindo o desenvolvimento do software para leitura dos sensores e análise espectral dos sinais sísmicos; a segunda etapa se referiu a etapa de campo, no qual foi realizada a aquisição de sinais sísmicos em ambiente externo para posterior análise e interpretação de sinais sísmicos reais.

De acordo os testes em laboratório, determinou-se os seguintes parâmetros configuráveis (Tabela 1) para cada sensor, a fim de se obter a melhor SNR e sensibilidade do dispositivo sísmico.

Tabela 1: Parâmetros configurados para cada sensor: geofone (SM-24) e acelerômetro (LSM303D).

	<b>Gain(V)</b>	<b>Rate(Hz)</b>	<b>dT(s)</b>	<b>Fs (Hz)</b>
SM-24	16 = ±0.256	860	0.002	500
	<b>AODR (Hz)</b>	<b>Bandwidth (Hz)</b>	<b>dT(s)</b>	<b>Fs (Hz)</b>
LSM303D	800	362	0.002	500

O parâmetro *Rate* e AODR, 860 Hz e 800 Hz, respectivamente, assegurou resultados mais confiáveis, uma vez que, de acordo com o teorema de Nyquist, a taxa de amostragem deve ser, no mínimo, duas vezes maior que a componente de maior frequência do sinal a ser medido, sendo a do acelerômetro e a do geofone, 362 Hz e 240 Hz, respectivamente. Ademais, uma frequência de amostragem (*Fs*) de 500Hz e período de amostragem de 0,002s garantem uma largura de banda coerente com a sensibilidade de cada sensor.

Em relação a confecção do dispositivo, foi utilizado como plataforma de hardware e

software o microcomputador de placa única Raspberry Pi modelo 3B (Figura 1).

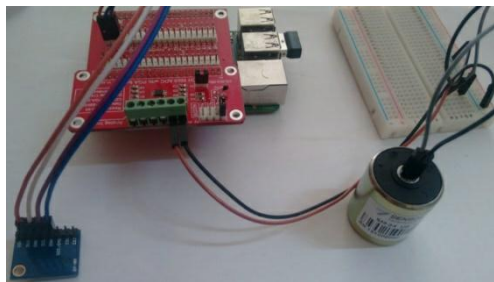


Figura 1: EstSism : à esquerda, o acelerômetro (azul); no centro, Raspberry Pi 3B com placa ADC 16 bits (vermelho) e KEYES (vermelho) com extensor de GPIO; à direita, geofone SM-24. Fonte: Autor, 2018

No RPi, foi utilizada a linguagem de programação em Python científico : Python, Jupyter Notebook, NumPy e Matplotlib. Para a captação do sinal sísmico, foram utilizados dois sensores : geofone SM-24 10Hz (Figura 2) e acelerômetro MEMS LSM303D (Figura 3). Uma vez que o geofone gera sinais analógicos, uma placa ADC (Analog to Digital Converter) de 16 bits foi necessária para realizar a conversão analógico-digital do sinal.

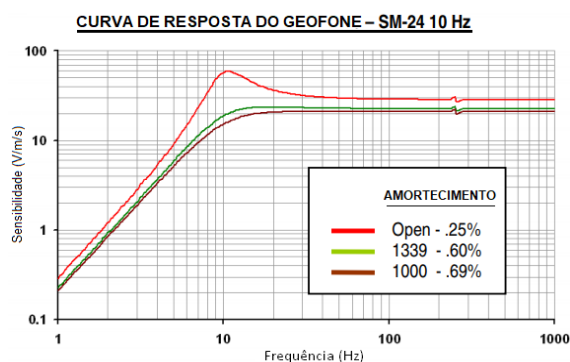


Figura 2: Geofone modelo SM-24 (inferior) usado no dispositivo sísmico e a sua respectiva curva de resposta (superior). Fonte: SENSOR NEDERLAND B.V, 2018.

Após os testes e calibração de cada sensor, foram realizadas aquisições de sinais sísmicos em ambiente externo. A análise de sinais sísmicos corresponde a uma análise de eventos sísmicos representados, primeiramente, no

domínio do tempo e, posteriormente, no domínio da frequência, analisando-se o espectro de frequência dos sinais amostrados (KEAREY et al., 2009).

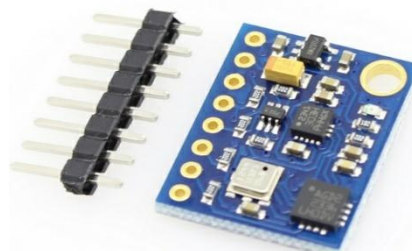


Figura 3: Placa GY-89 com acelerômetro MEMS modelo LSM303D (inferior). Fonte: THAOYU ELETRONICS, 2018.

A aquisição sísmica foi feita numa ponte do Bairro Vila do Sul e na UFES (Universidade Federal do Espírito Santo) em Alegre, no estado do Espírito Santo (ES). Em cada um desses pontos foram amostrados 600.000 sinais sísmicos num intervalo de 1.200s. Durante a aquisição feita na ponte, utilizou-se um cronômetro em sincronia com o dispositivo sísmico, objetivando correlacionar o tempo dos eventos sísmicos marcados no cronômetro - ao passar um carro ou caminhão, por exemplo, com os picos de amplitude nos gráficos do domínio do tempo. Já a aquisição feita no campus da UFES teve como objetivo apenas captar ruído de fundo e sinais naturais.

A aquisição de sinais sísmicos ocorreu de forma simultânea entre os sensores, ambos acoplados ao RPi. Durante a aquisição, os dados são armazenados numa lista do tipo “.csv”, onde, mais tarde, foram analisados por outro software responsável por fazer a leitura do arquivo “.csv” e representar os sinais sísmicos no domínio do tempo e frequência, esta via conversão por meio de algoritmo *FFT*.

### 3. Resultados e discussões

Os resultados da primeira aquisição sísmica durante 1.200s realizada na ponte do bairro Vila do Sul em Alegre-ES, Figura 4, encontram-se na Figura 5.



Figura 4: Ponte no bairro Vila do Sul, Alegre-ES, onde foi feita a aquisição de dados. Fonte: Autor, 2018.

Nota-se claramente que o acelerômetro apresenta menor sensibilidade em relação ao geofone. Além disso, parte da baixa SNR de tal sensor pode estar relacionada ao ruído sob a ponte, aos prolongamentos do fio para fazer as medições ou aos parâmetros relativos a própria configuração (AODR, Bandwidth).

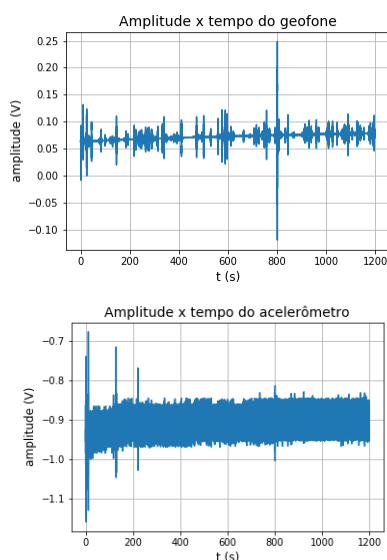


Figura 5: Eventos sísmicos registrados pelos sensores geofone SM-24 e acelerômetro MEMS LSM303D durante a amostragem de 1.200 segundos na ponte do bairro Vila do Sul, Alegre-ES. Fonte: Autor, 2018.

A Figura 6 mostra uma análise mais detalhada de um subintervalo da Figura 5, a qual corresponde a um evento sísmico gerado por um caminhão ao trafegar sobre a ponte expresso do domínio do tempo e seu respectivo espectro de frequência. O pico no gráfico da Figura 6 de amplitude entre -0,10 V e 0,25 V no geofone, e amplitude entre -1,000 g e -0,810 g 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 5. Analisando o espectro de frequência dos sinais de cada sensor (Figura 6), verifica-se que ambos registram componentes de maior frequência próximos a 16 Hz, isto é, a frequência de oscilação natural da ponte gerada pelo movimento do caminhão.

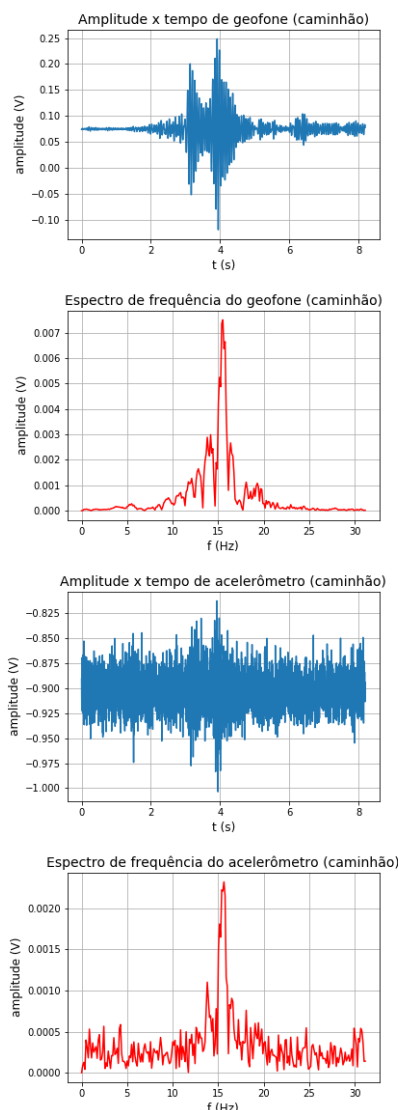


Figura 6: Evento sísmico gerado pela passagem de um caminhão na ponte do bairro Vila do Sul, Alegre-ES, discriminado no domínio do tempo e o seu respectivo espectro de frequência referente aos sensores geofone SM-24 e acelerômetro LSM303D. Fonte: Autor, 2018.

A Figura 7 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 2s de amplitude entre 0.047 e 0.103V. 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 natural 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, com pico que corresponde a oscilação da ponte, tanto no domínio do tempo como na frequência, a

amplitude da onda registrada pelo caminhão é superior à amplitude da onda gerada pelo carro, o que é de se esperar devido à maior massa e quantidade de eixos do caminhão.

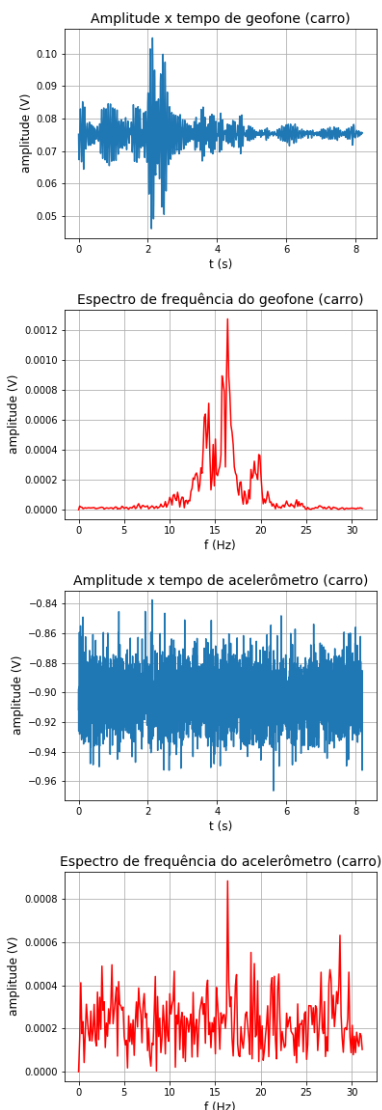


Figura 7: Resultados do evento sísmico gerado por um carro durante a passagem pela ponte no bairro Vila do Sul, Alegre-ES, representado no domínio do tempo e o seu respectivo espectro de frequência referente aos sensores geofone SM-24 e acelerômetro LSM303D. Fonte: Autor, 2018.

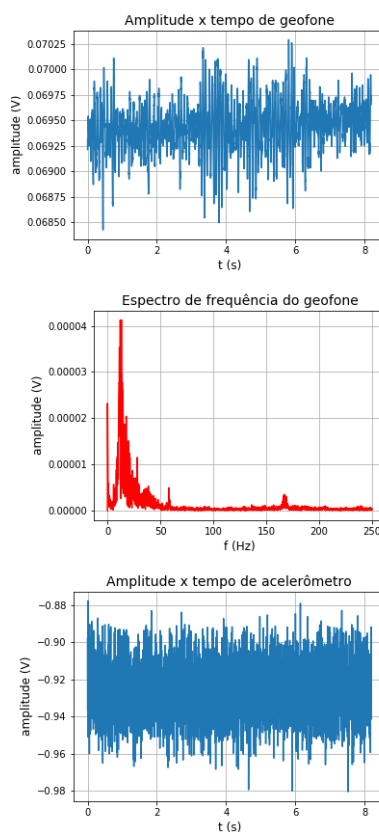
Os resultados da segunda aquisição sísmica, que correspondem a aquisição feita no campus da UFES (Figura 8) em Alegre-ES, encontram-se na Figura 9 e representam um intervalo de toda a aquisição feita. Pela análise gráfica do domínio do tempo, apesar da grande intensidade de ruído, nota-se alguns picos 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 13Hz e amplitude máxima de 0,00004V. 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 baixa amplitude.



Figura 8: Terreno sem uso da UFES-Alegre onde foi feita a medição de ruído de fundo e sinais naturais. Fonte: Autor, 2018.

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 parte dos sinais captados estejam relacionados com sismos artificiais (motores em prédios, tráfego de carros, etc). Para medições mais precisas dos sismos naturais, é necessário fazer medições em ambientes mais isolados, mais distantes de cidade.



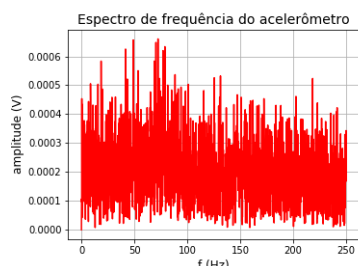


Figura 9: Análise de um intervalo de tempo em relação ao tempo total de amostragem feita no Campus da UFES, Alegre-ES. Fonte: Autor, 2018

## 4. Conclusões

A análise de sinais sísmicos do domínio do tempo e frequência foi de grande relevância para a interpretação dos sinais amostrados. Frequentemente, devido à grande complexibilidade da forma de onda em relação ao tempo, 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 mais intensos e suas amplitudes ao longo do tempo, conforme mostrado durante a amostragem de sinais na ponte do Bairro Vila do Sul (Figuras 5 a 7).

De acordo com os resultados da amostragem na ponte do Bairro Vila do Sul, conclui-se que o acelerômetro MEMS apresenta precisão e maior sensibilidade para sinais com frequência intermediária de amplitudes médias e altas. Este fato pôde ser comprovado pela análise dos sinais sísmicos no domínio do tempo e frequência entre o caminhão (Figura 6) e o carro (Figura 7), no qual o caminhão gerou vibrações com maiores amplitudes, promovendo, assim, uma melhor SNR.

Já os resultados da aquisição na UFES campus, Alegre, comprovam sensibilidade para baixas frequências por parte do geofone, próximo a 10 Hz. Contudo, para captar sismos naturais, a aquisição 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 em Alegre-ES em questão está passível a influência de sismos artificiais.

Um dos principais fatores responsáveis pela baixa SNR do acelerômetro, podem estar ligados aos ruídos de alimentação elétrica do

dispositivo e de fiação (interferência eletromagnética), associados ao ruído aleatório (ruído do ambiente) e ruído coerente (fonte sísmica). 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, reafirmam-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. Por conseguinte, 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.

Como se objetiva desenvolver um protótipo da EstSism adequado para usuário final, este trabalho apresentou os resultados obtidos referente a parte do seu desenvolvimento, com os seguintes trabalhos futuros possíveis:

- uso de ADC's de maior resolução;
- uso de mais geofones (horizontal, vertical, etc);
- teste de outros acelerômetros visando obter maior sensibilidade;
- gravação dos dados em arquivos no formato MiniSEED, conforme usado na indústria do petróleo;
- Uso de IoT (*Internet of Things*, Internet das Coisas) para transmissão de dados sem fio;
- envio de dados pré-processados para servidor web na nuvem (IoT Cloud);
- uso de Raspberry Pi 3A+ de menor consumo de energia para ter maior autonomia com bateria, passando a alguns dias versus pouco mais de 15 horas na versão atual;
- uso opcional de painel solar acoplado a bateria para ter autonomia ilimitada.

O software da EstSism, em Python científico, gratuito e de código-aberto, encontra-se em <<https://github.com/luizfelipecempe/EstSismECF> A2019>.



## 5. Agradecimentos

Agradecemos à UFES no projeto FUTEBOL (<http://www.ict-futebol.org.br/>) que forneceu parte dos materiais da EstSism.

## 6. Referências

[1] 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](http://www.iag.usp.br/~eder/apostila/00_Introducao_a_Geofisica_IAG_USP.pdf)>. Acesso em: 10 ago. 2018.

[2] KICKSTARTER, Raspberry Shake. Disponível em: <https://www.kickstarter.com/projects/angelrodriguez/raspberry-shake-your-personal-seismograph?ref=embarcados>>. Acesso em: 21 de maio 2017.

[3] HONS, M. S. Seismic sensing: Comparison of geophones and accelerometers using laboratory and field data. 155f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Departamento de Geociências, Universidade de Calgary, Calgary. 2008.

[4] ROSA, A. L. R. Análise do sinal sísmico. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGf): 2010.

[5] 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.

[6] KEAREY, P.; BROOKS, M; IAN, H. Geofísica de exploração. Tradução de Maria Cristina Moreira Coelho. São Paulo: Oficina de textos: 2009.

[7] THAOYU ELETRONICS. Disponível em: <<https://www.hotmcu.com/imu-10dof-lsm303dl3gd20-bmp180-p-189.html?cPath=8>>. Acesso em: 28 maio 2019.