

Análise de Ruído Sísmico para a Otimização da Instalação de Estações Sísmicas de Banda Larga na Ilha de S. Miguel

Dissertação de Mestrado

Rodrigo Sousa Arruda

Mestrado em

**VULCANOLOGIA E RISCOS
GEOLÓGICOS**



Ponta Delgada
2018

Análise de Ruído Sísmico para a Otimização da Instalação de Estações Sísmicas de Banda Larga na Ilha de S. Miguel

Dissertação de Mestrado

Rodrigo Sousa Arruda

Orientadores

Professora Doutora Teresa de Jesus Lopes Ferreira
Doutora Rita Alexandra Ávila Melo da Silva Marques

Dissertação de Mestrado submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Vulcanologia e Riscos Geológicos



ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE ACRÓNIMOS	IX
AGRADECIMENTOS	X
RESUMO	XII
ABSTRACT	XIV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	1
2. SISMICIDADE NOS AÇORES	4
2.1. Enquadramento geodinâmico	4
2.2. Sismicidade histórica	6
2.3. Sismicidade instrumental	8
3. INSTRUMENTAÇÃO SÍSMICA	14
3.1. Resenha histórica	14
3.2. Princípios de funcionamento de sismómetros	17
3.2.1. Sismómetros mecânicos	17
3.2.2. Sensores de força balanceada - <i>Force Balanced Accelerometers (FBA)</i>	19
3.3. Sismómetros de banda larga	21
4. ANÁLISE DE RUÍDO SÍSMICO	23
4.1. Causas e implicações	23
4.2. Densidade Espectral de Potência	26
4.3. Modelos de ruído sísmico	30
4.4. Caracterização de eventos em gráficos PDF	33
5. SELEÇÃO DE LOCAIS PARA A INSTALAÇÃO DE ESTAÇÕES SÍSMICAS	36
5.1. Aspectos condicionantes à seleção de locais de estudo para a instalação de estações sísmicas	36
5.2. Abrigos sísmicos	39
5.3. Seleção dos locais de estudo	42
6. CAMPANHAS DE CAMPO	45
6.1. Instalação das estações	49
6.2. Manutenção e recolha de dados	59
6.3. Processamento dos dados	62
7. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	65
7.1. Resultados e análise – Estações permanentes	65
7.1.1. Análise de variação diária	73
7.1.2. Análise de variação sazonal	75
7.2. Resultados e análise - Estações temporárias	77
7.3. Análise das condicionantes de ruído	100
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	107
9. BIBLIOGRAFIA	111

ANEXOS

ANEXO I – Configuração dos parâmetros das estações.....A-1

ANEXO II – PDF das estações permanentes de agosto de 2016A-4

ANEXO III – PDF das estações permanentes de janeiro de 2017A-13

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1

Localização geográfica do arquipélago dos Açores. Mapa apresentado com coordenadas geográficas, datum WGS84. 4

Figura 2.2

Enquadramento tectónico do arquipélago dos Açores, encontrando-se representadas as principais estruturas morfotectónicas. Legenda: NA – placa Norte-Americana; EU – placa Eurasiática; NU – placa Núbia; CMA – Crista Média Atlântica; ZFK – Zona de Fratura Kurchatov; ZFNA – Zona de Fratura Norte dos Açores; ZFF – Zona de Fratura do Faial; ZFA – Zona de Fratura Açor; ZFPA – Zona de Fratura Princesa Alice; ZFP – Zona de Fratura do Pico; ZFEA – Zona de Fratura Este dos Açores; RT – Rift da Terceira; FG – Falha Glória; FI – Flores; C – Corvo; G – Graciosa; T – Terceira; SJ – S. Jorge; FA – Faial; P – Pico; SMG – S. Miguel; SMA – Sta. Maria; FO – Ilhéus das Formigas; BPA – Banco Princesa Alice, BA – Banco Açor; BJC – Banco D. João de Castro; BM – Banco do Mónaco; BWG – Bacia Oeste da Graciosa; BEG – Bacia Este da Graciosa; FH – Fossa Hirondele; BSM – Bacia de S. Miguel; DF – Desfiladeiro das Formigas (Carmo, 2014). 5

Figura 2.3

Localização epicentral dos principais sismos históricos dos Açores (Gaspar *et al.*, 2015). 8

Figura 2.4

Rede sísmica permanente do CIVISA. Cada ponto vermelho representa uma estação sísmica. Mapa apresentado com coordenadas geográficas, datum WGS84. 10

Figura 2.5

Carta epicentral dos Açores, no período compreendido entre 1 de janeiro de 1997 e 31 de dezembro de 2016 (dados CIVISA, 2017). Zonas sismogénicas definidas pelo CIVISA: 1 – Santa Maria; 2 – São Miguel; 3 – Terceira; 4 – Graciosa; 5 – São Jorge; 6 – Pico; 7 – Faial; 8 – Flores; 9 – Corvo; 10 – Região dos Ilhéus das Formigas; 11 – E dos Açores (Falha Glória); 12 – N dos Açores; 13 – Bacia SE de São Miguel; 14 – Banco Grande Norte; 15 – Bacia de Santa Maria; 16 – N de São Miguel; 17 – Crista do Mónaco; 18 – Bacia Hirondele S; 19 – Banco D. João de Castro; 20 – Bacia Hirondele N; 21 – N da Terceira; 22 – Bacia S da Terceira; 23 – Bacia E da Graciosa; 24 – N da Graciosa; 25 – Canal N de São Jorge; 26 – Canal São Jorge – Pico; 27 – Bacia W da Graciosa; 28 – N do Faial; 29 – Crista do Condor; 30 – Zona N de Fratura dos Açores; 31 – W do Faial; 32 – Crista Média Atlântica; 33 – S dos Açores; 34 – E de Flores e Corvo. Mapa apresentado com coordenadas geográficas, datum WGS84. 13

Figura 3.1

Na mitologia Hindu, o planeta era segurado por oito elefantes que estavam no topo de uma tartaruga gigante. Quando uma destas criaturas se movia ocorria um sismo (Coles, 2013). 14

Figura 3.2

Modelo do sismoscópio de Zhang Heng (*Seismograph*, 2016). 15

Figura 3.3

Esquema de um sismómetro de inércia (*in*: Montalvo, 2005; adaptado de Espíndola e Jiménez, 1994). 18

Figura 3.4

Esquema de funcionamento dos acelerómetros de força balanceada (adaptado de Havskov e Alguacil, 2004). 20

Figura 3.5

Classificação dos diferentes tipos de sensores conforme a sua faixa de frequência (adaptado de Ortiz *et al.* 2001). 21

Figura 4.1

Exemplo de uma série contínua de dados referente a 24 horas de registo na estação SET2. É possível observar algum ruído ao início da manhã e ao final da tarde. 28

Figura 4.2

Exemplo de estimativas de PSD, efetuado a partir de registos individuais. A vermelho, o registo associado à passagem de um automóvel e a azul o registo de fundo da estação (McNamara e Buland, 2004). 29

Figura 4.3

Mapa estações utilizadas na elaboração dos modelos de ruído (Peterson, 1993). 31

Figura 4.4

Representação gráfica das curvas de PSD utilizadas para definir os modelos de ruído. As curvas dos dois modelos estão representadas a vermelho (adaptado de Peterson, 1993). 32

Figura 4.5

Exemplo de PDF onde são demonstrados os efeitos de certos eventos (McNamara e Buland, 2004). 34

Figura 5.1

Exemplo de abrigo sísmico para um sensor de banda larga (adaptado de Trnkoczy *et al.*, 2012). 40

Figura 5.2

Níveis de PSD relativos ao sensor instalado à superfície para os períodos selecionados, referente à componente horizontal das estações. As profundidades foram 0, 4,3, 89 e 152 m (adaptado de Trnkoczy *et al.*, 2012). 41

Figura 5.3

Localização das estações do CIVISA na ilha de S. Miguel. As estações de três componentes estão representadas a vermelho, enquanto que as de uma só componente estão representadas a verde. Mapa apresentado com coordenadas no sistema UTM, datum WGS84 zona 26S. 43

Figura 6.1

Proteção térmica em poliestireno a cobrir o sensor sísmico em SET2. 47

Figura 6.2

Exemplo de variação de temperatura ao longo de um dia em MESC. O dia selecionado foi o que apresentou maior amplitude térmica. 48

Figura 6.3

Aspeto geral da cave sísmica da estação SET2. 49

Figura 6.4

Fosso de SET2. Na parte superior da foto encontra-se o sensor de banda larga dentro da proteção térmica e na parte inferior da foto o sensor de curto período. 50

Figura 6.5

Equipamento em SET2. À esquerda o equipamento de aquisição e transmissão de dados do sensor de curto período, ao centro as baterias ligadas aos painéis solares e à direita o digitalizador da estação de banda larga dentro da caixa de transporte. 51

Figura 6.6

Aspeto geral do abrigo da estação MESC. 52

Figura 6.7

Fosso em MESC. Visível a proteção térmica do sensor de banda larga. O sensor de curto período encontra-se no canto superior direito da base em betão, assinalado a vermelho. 53

Figura 6.8

Equipamento em MESC, já com as baterias extra ligadas e com o digitalizador dentro da caixa de transporte. 54

Figura 6.9

Aspeto geral do abrigo da estação sísmica PFET. 55

Figura 6.10

Aumento da abertura pré-existente para passagem do cabo de GPS. 56

Figura 6.11

Equipamento em PFET. Note-se a ausência de fosso, ficando todo o equipamento ao mesmo nível. 56

Figura 6.12

Localização do Centro Ambiental do Priolo a vermelho, na zona da Reserva Florestal de Recreio da Cancela do Cinzeiro. Mapa apresentado com coordenadas no sistema UTM, datum WGS84 zona 26S. 58

Figura 6.13

Manutenção e recolha de dados em MESC. É utilizado um computador portátil para ligação ao digitalizador, permitindo assim controlar a estação e recolher os dados. 59

Figura 6.14

Estrutura dos dados obtidos antes da fase de tratamento dos mesmos. Cada pasta diária possui um ficheiro para cada componente da estação, mais um ficheiro SOH. 63

Figura 7.1

Estações pertencentes à rede sísmica permanente do CIVISA, na ilha de S. Miguel. As estações calibradas estão representadas a vermelho, enquanto que as estações não calibradas estão representadas a verde. Mapa apresentado com coordenadas no sistema UTM, datum WGS84 zona 26S. 65

Figura 7.2

PDF da estação FRA1, componente vertical, com dados referentes a agosto de 2016. 67

Figura 7.3

PDF da estação MESC, componente vertical, com dados referentes a agosto de 2016. 67

Figura 7.4

PDF da estação PCNG, componente vertical, com dados referentes a agosto de 2016. 68

Figura 7.5

PDF da estação PMAT, componente vertical, com dados referentes a agosto de 2016. 68

Figura 7.6

PDF da estação PRCH, componente vertical, com dados referentes a agosto de 2016. 69

Figura 7.7

PDF da estação PVER, componente vertical, com dados referentes a agosto de 2016. 69

Figura 7.8

PDF da estação VIF, componente vertical, com dados referentes a agosto de 2016. 70

Figura 7.9	
PDF da estação LFA, componente vertical, com dados referentes a agosto de 2016.....	70
Figura 7.10	
PDF da estação CMLA, componente vertical, com dados referentes a agosto de 2016.	71
Figura 7.11	
Valores de moda das componentes verticais das diferentes estações de S. Miguel para o mês de agosto de 2016.....	72
Figura 7.12	
Valores de moda da estimativa de PSD comparando o período noturno (das 22h às 8h) com o período diurno (das 9h às 19h), na componente vertical da estação MESC, utilizando os dados do mês de agosto de 2016.....	74
Figura 7.13	
Valores de moda da estimativa de PSD comparando o período noturno (das 22h às 8h) com o período diurno (das 9h às 19h), na componente vertical da estação PRCH, utilizando os dados do mês de agosto de 2016.....	75
Figura 7.14	
Valores de moda das componentes verticais das estações FRA1 e CMLA para o mês de janeiro de 2017.....	76
Figura 7.15	
Gráfico PDF da estação instalada em SET2 para o período de dados compreendido entre 22 de junho e 13 de julho de 2017.....	80
Figura 7.16	
Gráfico PDF da estação instalada em SET2, para o período noturno, com os dados compreendidos entre 22 de junho e 13 de julho de 2017.....	81
Figura 7.17	
Gráfico PDF da estação instalada em SET2, para o período diurno, com os dados compreendidos entre 22 de junho e 13 de julho de 2017.....	82
Figura 7.18	
Gráfico PDF da estação instalada em MESC para o período de dados compreendido entre 15 de agosto e 3 de setembro de 2017.	85
Figura 7.19	
Gráfico PDF da estação instalada em MESC, para o período noturno, com os dados compreendidos entre 15 de agosto e 3 de setembro de 2017.	86
Figura 7.20	
Gráfico PDF da estação instalada em MESC, para o período diurno, com os dados compreendidos entre 15 de agosto e 3 de setembro de 2017.	87
Figura 7.21	
Gráfico PDF da estação instalada em PFET para o período de dados compreendido entre 24 de agosto e 11 de setembro de 2017.....	90
Figura 7.22	
Gráfico PDF da estação instalada em PFET, para o período noturno, com os dados compreendidos entre 24 de agosto e 11 de setembro de 2017.	91

Figura 7.23	
Gráfico PDF da estação instalada em PFET, para o período diurno, com os dados compreendidos entre 24 de agosto e 11 de setembro de 2017.	92
Figura 7.24	
Localização do ponto de amostragem localizado no Pico do Gaspar, Furnas. Mapa apresentado com coordenadas no sistema UTM, datum WGS84 zona 26S.	93
Figura 7.25	
Aspetto geral da cave sísmica da estação PPGR.	94
Figura 7.26	
Detalhe do fosso bem como da proteção térmica adaptada ao fosso e ao sensor.	95
Figura 7.27	
Gráfico PDF da estação instalada em PPGR, para o período de dados compreendidos entre 11 de dezembro de 2008 e 1 de fevereiro de 2009.	97
Figura 7.28	
Gráfico PDF da estação instalada em PPGR, para o período noturno, com os dados compreendidos entre 11 de dezembro de 2008 e 1 de fevereiro de 2009.	98
Figura 7.29	
Gráfico PDF da estação instalada em PPGR, para o período diurno, com os dados compreendidos entre 11 de dezembro de 2008 e 1 de fevereiro de 2009.	99
Figura 7.30	
Gráfico PDF da componente vertical da estação CMLA 00.	101
Figura 7.31	
Gráfico PDF da componente vertical da estação CMLA 10.	102
Figura 7.32	
Gráfico PDF da componente horizontal (BH2) da estação CMLA 00.	103
Figura 7.33	
Gráfico PDF da componente horizontal (BH2) da estação CMLA 10.	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Principais sismos históricos dos Açores (intensidades na escala MM56) (adaptado de Madeira, 1998, Silveira, 2002 e Gaspar <i>et al.</i> , 2015).....	7
Tabela 2.2 Rede sísmica do CIVISA.....	11
Tabela 3.1 Frequências associadas a diferentes eventos (adaptado de Havskov e Ottemöller, 2010).....	19
Tabela 6.1 Resumo das deslocações e trabalhos efetuados nas estações.....	60
Tabela 7.1 Dados da estação CMLA (dados IRIS/GSN).....	66
Tabela 7.2 Períodos de dados utilizados nos gráficos PDF.....	77
Tabela 7.3 Dados da estação PPGR, situada no Pico do Gaspar, Furnas.....	94

LISTA DE ACRÓNIMOS

CAD – Centro de Aquisição de Dados
CIVISA – Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores
CMA – Crista Média Atlântica
CVARG – Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos
FBA – *Force Balanced Accelerometers* (Acelerómetros de Força Bbalanceada)
FFT – *Fast Fourier Transform* (Transformada Rápida de Fourier)
FG – Falha Glória
GSN – *Global Seismograph Network*
IM – Instituto de Meteorologia
INMG – Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica
IRIS – *Incorporated Research Institutions for Seismology*
ISS – *International Seimological Summary*
IVAR – Instituto de Investigação em Vulcanologia e Avaliação de Riscos
NHNM – *New High Noise Model*
NLNM – *New Low Noise Model*
PDF – *Probability Density Function* (PDF, Função Densidade de Probabilidade)
PSD – *Power Spectral Density* (Densidade Espectral de Potência)
RT – *Rift* da Terceira
RUVS – Rede Universitária de Vigilância Sismovulcânica
SIVISA – Sistema de Vigilância Sismológica dos Açores
SOH – *State of Health*
UAç – Universidade dos Açores
USGS – *United States Geological Survey*
ZFAG – Zona de Fratura Açores-Gibraltar
ZFEA – Zona de Fratura Este dos Açores

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho apenas foi possível com o apoio e ajuda de diversas pessoas. Expresso aqui o meu profundo agradecimento a todos quantos os que de uma forma ou outra deram o seu contributo, de forma especial:

- ao Magnífico Reitor da Universidade dos Açores, Professor Doutor João Luís Gaspar, pelas facilidades concedidas, que tornaram possível a concretização deste trabalho;

- ao Professor Doutor Nicolau Wallenstein, coordenador do curso de mestrado, pela forma como coordenou o grupo de mestrandos;

- à Professora Doutora Teresa Ferreira, orientadora científica deste trabalho, pelo tempo e interesse que cedeu para a realização do mesmo, pela revisão científica dos textos e troca de ideias;

- à Doutora Rita Marques, orientadora científica deste trabalho, pelo acompanhamento de todo o trabalho efetuado, partilha de bibliografia, conselhos, discussão de ideias e revisão de científica dos textos;

- a todos os docentes do curso de Mestrado, pelo interesse e partilha de conhecimentos;

- aos funcionários Ernesto Sousa e Victor Sousa, pela sua paciência e disponibilidade durante os trabalhos de campo;

- a todos os colegas de Mestrado pela solidariedade, amizade e convívio proporcionados ao longo do curso;

- aos colegas Sérgio Oliveira e Arturo Montalvo pela ajuda fornecida em todo o trabalho, especialmente na parte de informática, com o equipamento de monitorização e pelas ideias fornecidas;

- aos elementos do CAD, Rogério Sousa, Ana Rosa Medeiros, Irina Araújo, João Couto, Ana Rita Cabral, Adriano Pimentel e Sário Armas pelo enorme companheirismo, amizade, convívio e ajuda;

- a todos os colegas do Instituto de Investigação em Vulcanologia e Avaliação de Riscos que, de uma forma ou outra, contribuíram no desenvolvimento deste trabalho;

- a toda a minha família, em especial aos meus pais, pela compreensão, apoio e ajuda que sempre transmitiram, tornando possível o desenvolvimento deste trabalho, bem como, o meu desenvolvimento pessoal;

- a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste trabalho, o meu profundo agradecimento.

RESUMO

Localizado no oceano Atlântico Norte, o arquipélago dos Açores é composto por nove ilhas de origem vulcânica, distribuídas por três grupos geográficos (Ocidental, Oriental e Central), numa área de confluência de três placas litosféricas: as placas Norte-Americana, Euroasiática e Africana. Como consequência deste enquadramento, o arquipélago é palco de uma elevada sismicidade e frequentes manifestações vulcânicas, que são registadas deste o seu povoamento.

Dada esta atividade, torna-se imprescindível a monitorização dos sistemas vulcânicos e sísmicos ativos, sendo que a entidade responsável por esta monitorização é o Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores (CIVISA). Atualmente esta entidade possui uma rede de monitorização sísmica composta por 36 sensores de curto período, distribuídos por sete das nove ilhas do arquipélago.

Neste contexto, e face à contínua evolução dos equipamentos de monitorização e devido às limitações de resolução/configuração da rede de monitorização, o CIVISA decidiu melhorar as capacidades da rede através da instalação de estações sísmicas de banda larga. Este tipo de estações é caracterizado pela sua elevada sensibilidade numa ampla gama de frequências. No entanto, a máxima rentabilização destas capacidades está dependente das condições do local em que as estações são instaladas.

Desta forma, foi utilizado o método de McNamara e Buland (2004), que procura quantificar os níveis de ruído registados em cada estação, de forma a verificar as condições do local. Como tal, inicialmente, utilizou-se o mesmo método para verificar os níveis de ruído registados pela rede do CIVISA, estabelecendo um nível de base para os níveis de ruído registados pelas estações permanentes, permitindo ainda verificar a proveniência dos diferentes tipos de ruído, bem como os seus comportamentos em função de diferentes períodos sazonais e/ou diários, e em função da frequência/período dos mesmos.

Assim, foram instaladas estações de banda larga em diferentes abrigos sísmicos de forma provisória, sendo os dados resultantes utilizados para verificar os níveis

de ruído em cada local e verificar a influência do desenho das caves sísmicas no nível de ruído registrado.

No geral, verificou-se que as estações instaladas na ilha apresentam níveis de ruído elevados, resultantes da atividade humana, oceânica e atmosférica. Apesar disso, foi possível selecionar três locais com as condições necessárias para albergar uma estação sísmica de banda larga, sendo ainda possível a recomendação de medidas capazes de reduzir os níveis de ruído das estações resultantes dos processos mencionados, aplicadas quer nos sensores sísmicos, como na construção de abrigos sísmicos, pretendendo com isso aumentar a qualidade dos dados. Para além disto, a documentação deste processo servirá como linha de orientação para facilitar estudos futuros semelhantes ou estudos que utilizem os dados provenientes das estações utilizadas.

ABSTRACT

Located in the Northern Atlantic Ocean, the archipelago of the Azores is composed of nine volcanic islands, spread over three main geographic groups (Occidental, Oriental and Central) in a confluence area of three lithospheric plates, the North American, the Eurasian and the African plates. Consequently, the archipelago is marked by frequent seismic and volcanic events.

Given the high levels of seismic and volcanic activity, it is essential the monitoring of the volcanic active systems present in the region. The Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores (CIVISA) is, currently, the responsible entity for such monitoring. It has a permanent seismic network composed by 36 short period sensors dedicated to seismovolcanic monitoring, spread over seven of the nine islands of the archipelago.

Due to the continuous technological evolution of the monitoring equipment and the limitations of the monitoring network, CIVISA decided to improve the network capabilities by installing broadband seismic stations. This type of sensors is characterized by its high sensitivity and resolution over a wide range of frequencies. However, the site conditions in which these sensors are installed can limit the sensors capability to detect seismic events, and therefore the installation is a process that requires several requirements.

The McNamara and Buland (2004) method quantifies the noise levels recorded in each station in order to verify the site conditions. Given this, beforehand the same method was used to establish a baseline for the noise levels recorded by the seismic permanent stations composing the CIVISA network, also allowing to confirm the sources of noise and its behaviour depending on annual and daily periods, and the frequency/period of the resulting signals.

The broadband seismic stations were temporary installed in different seismic vaults to obtain data records from each site. The collected data was used to verify the noise levels of each site and to verify the influence of the seismic vaults design have on the noise levels.

Overall, it was possible to verify that the seismic stations present on the island are marked by high noise levels as a result of human, oceanic and atmospheric

processes. Despite this, it was possible to select three different sites that were adequate to permanently install a broadband station, and to define some recommendations that are capable of reducing the noise levels recorded by the stations, and therefore improving the quality of the acquired data. These improvements include both measures to be applied on seismic stations and on seismic vaults and are based on information retrieved during this study. Furthermore, the documentation of all this process will be used as a guideline for similar studies but in other sites, or other studies based on the data used on this study.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Objetivos

O presente trabalho foi realizado no âmbito do Mestrado em Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, inserido na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade dos Açores (UAç), com a colaboração do Departamento de Geociências e do Instituto de Investigação em Vulcanologia e Avaliação de Riscos (IVAR), anteriormente designado por Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos (CVARG), e incide sobre a análise do contributo do efeito de sítio e das condições de instalação de estações sísmicas para o ruído sísmico registado.

Os grandes eventos sísmicos estão, na maioria dos casos, associados a grandes perdas. O aumento da densidade populacional, das infraestruturas técnicas e do nível de complexidade da sociedade significa um aumento do potencial de perdas associadas a fenómenos destrutivos (Baubion, 2013). Neste contexto, a monitorização sísmica assume um importante papel na mitigação do risco sísmico, especialmente em regiões como o Arquipélago dos Açores, onde é registada uma atividade sísmica frequente e por vezes com magnitude elevada. A mitigação do risco sísmico implica o estudo da fonte sísmica de forma a conhecer a natureza e características da mesma. Tal estudo, fornece informações sobre sinais sísmicos que possam ser considerados anómalos, em particular no caso da monitorização vulcânica, em que os eventos sísmicos podem ser os primeiros indícios de uma reativação vulcânica.

Para além da monitorização sísmica, outra forma de mitigação implica o estudo de eventos sísmicos ocorridos no passado de forma a caracterizar zonas quanto ao seu potencial sísmico. A partir desta avaliação é possível proceder à criação de medidas em termos de ordenamento do território. Mais recentemente têm sido utilizadas novas tecnologias na mitigação do risco sísmico, levando ao desenvolvimento de sistemas de alerta precoce (e.g. Allen e Kanamori, 2003; Gasparini e Manfredi, 2014).

O desenvolvimento destes sistemas iniciou-se no final da década de 60 com o objetivo de proteger as linhas férreas de alta velocidade no Japão, tendo mais

tarde iniciado o seu desenvolvimento em outras zonas de elevada sismicidade como no México, Taiwan, E.U.A. (Califórnia). O sistema utiliza sensores sísmicos, que ao detetar a chegada de ondas primárias (ondas P) enviam o registo sísmico desta para uma central onde, reunidos os registos de diversas estações, são calculados parâmetros do evento tais como a sua magnitude e localização. É ainda calculada a aceleração máxima do solo, sendo que se este parâmetro ultrapassar um dado valor predefinido é emitido um alerta com a estimativa do tempo de chegada das ondas secundárias (ondas S) e da intensidade expectável. À medida que fica disponível mais informação sobre o evento estas estimativas e parâmetros são atualizadas. A difusão da informação é realizada via televisão, rádio, telemóvel ou pela *internet*, e em certos casos permite a desativação automática de transportes ferroviários ou indústrias perigosas antes da chegada das ondas S. Como estes sistemas são ativados após a ocorrência de um sismo, utilizam as velocidades dos meios de transmissão de informação de forma a que o alerta seja entregue antes da chegada das ondas mais destrutivas e, como tal, a eficácia destes sistemas está dependente da sua distância ao epicentro, sendo que o alerta pode ser recebido segundos ou até alguns minutos antes da chegada das ondas S.

Face à aplicação de sistemas de alerta torna-se vital a contínua atualização das redes de monitorização sísmica, de forma a garantir a qualidade dos sinais registados, possibilitando uma maior eficiência no tratamento e estudo dos dados obtidos. Para além disto, os avanços tecnológicos na instrumentação utilizada na monitorização, nomeadamente nos sensores sísmicos, garantem uma maior sensibilidade e fiabilidade na deteção de sinais em cada nova geração de equipamentos desenvolvidos para o efeito (Agnew, 2002).

O Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores (CIVISA) gere uma rede de monitorização sísmica para a deteção de sinais sísmicos de origem tectónica e vulcânica. No âmbito da contínua atualização desta rede, irão ser instalados sensores sísmicos de banda larga em todas as ilhas do Arquipélago. Este tipo de sensores sísmicos, dadas as suas características, requerem cuidados especiais no seu processo de instalação. Como tal, este estudo, realizado na ilha de S. Miguel, teve por objetivo identificar locais aptos para essa

instalação, tendo por base o estudo prévio de ruído sísmico nesses mesmos locais.

Neste trabalho pretende-se descrever todos os procedimentos efetuados para o estudo do ruído sísmico e para o estabelecimento de critérios a ter em consideração na seleção de locais para a futura instalação de sismómetros de banda larga. Assim, no segundo capítulo, após um breve enquadramento geodinâmico do arquipélago, é revista a situação atual da sismicidade na região dos Açores. Neste ponto é igualmente revista a sismicidade histórica, desde o povoamento até à atualidade, bem como a sismicidade instrumental e a evolução das redes de monitorização sísmica na região.

O terceiro capítulo introduz a temática dos sensores de banda larga, incidindo no progresso que tem sido feito no seu desenvolvimento, no princípio de funcionamento, nas vantagens e desvantagens, e nos requisitos necessários para o correto funcionamento, aproveitar ao máximo as suas capacidades de deteção.

A metodologia a utilizar na análise dos dados recolhidos ao longo do trabalho é discutida no quarto capítulo. As fontes de ruído sísmico e as suas implicações nos registos obtidos são igualmente abordados.

A seleção dos locais para instalação de sensores de banda larga e obtenção dos respetivos registos sísmicos é afetada pela distância a fontes de ruído sísmico e, assim, os critérios habitualmente utilizados para essa seleção são abordados no quinto capítulo.

No sexto capítulo são apresentados todos os procedimentos realizados no campo e no sétimo capítulo é realizada a análise dos dados, bem como a sua discussão. No último capítulo são elaboradas as conclusões finais.

2. SISMICIDADE NOS AÇORES

2.1. Enquadramento geodinâmico

O Arquipélago dos Açores é fortemente condicionado pelo contexto geodinâmico em que se insere. Situado no Oceano Atlântico Norte, entre as latitudes 37° e 40° N e as longitudes 25° e 31°W (figura 2.1), este arquipélago, formado por nove ilhas de origem vulcânica, encontra-se na área de confluência de três placas litosféricas, a placa Norte-Americana, a placa Eurasiática e a placa Africana, estando associadas a estas, outras importantes estruturas tectónicas tais como, a Crista Média Atlântica (CMA), a Zona de Fratura Açores-Gibraltar (ZFAG), que inclui o *Rift* da Terceira (RT) e a Falha Gloria (FG), e a Zona de Fratura Este dos Açores (ZFEA) (e.g. Madeira *et al.*, 2015).

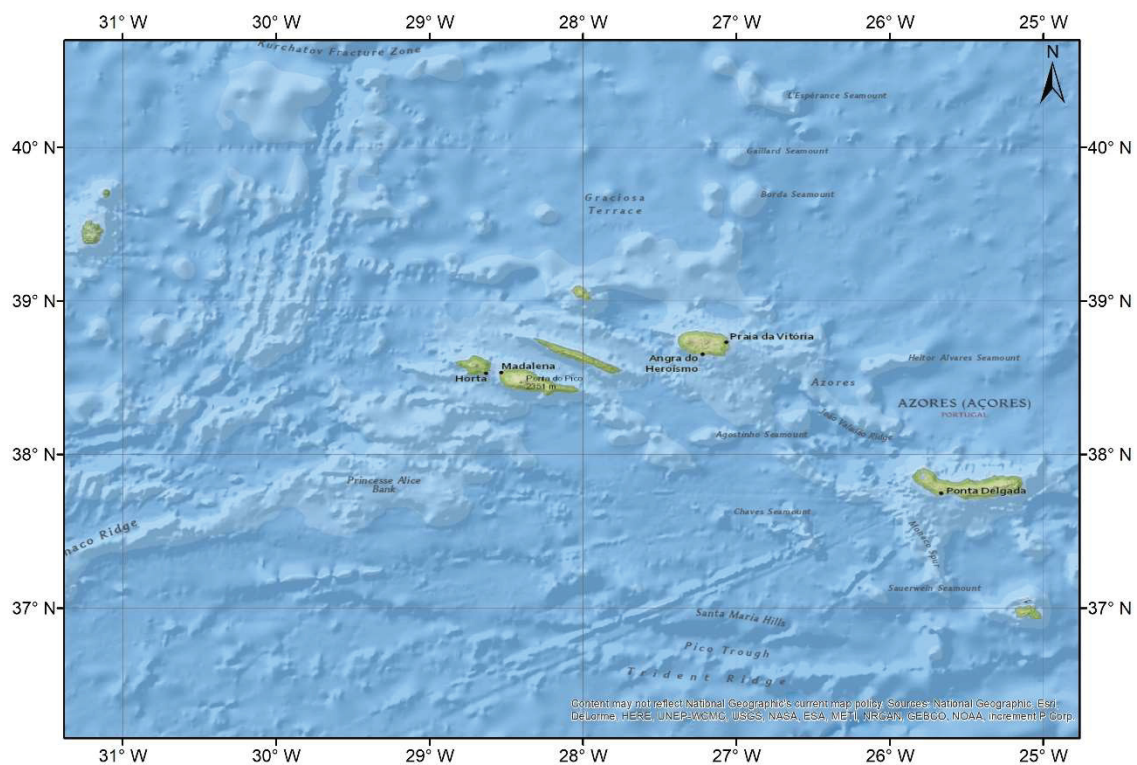


Figura 1.1 – Localização geográfica do arquipélago dos Açores. Mapa apresentado com coordenadas geográficas, datum WGS84.

A CMA corresponde à fronteira entre as placas Norte-Americana e as placas Euroasiática e Africana (Núbia), sendo materializada pela presença de um rifte bem desenvolvido com exceção na região dos Açores e Islândia. Tratando-se de

uma estrutura distensiva pura é marcada por uma elevada sismicidade (Carmo, 2005; Madeira, 1998; Searle, 1980).

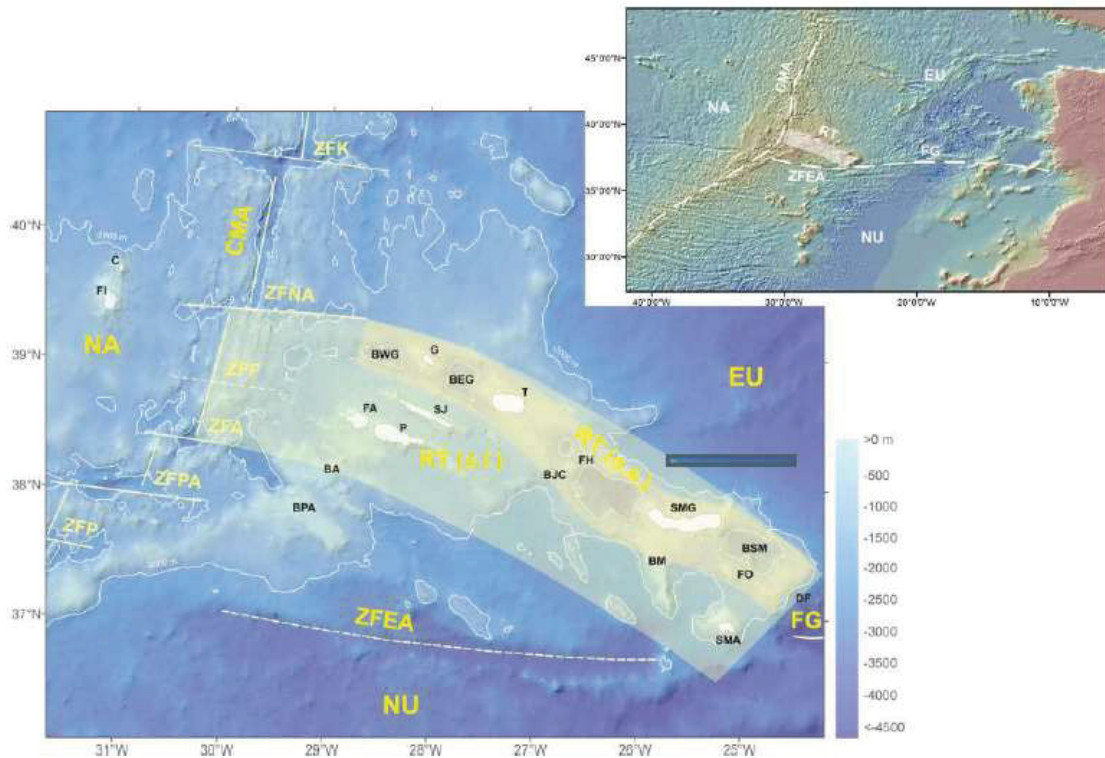


Figura 2.2 – Enquadramento tectónico do arquipélago dos Açores, encontrando-se representadas as principais estruturas morfo-tectónicas. Legenda: NA – placa Norte-Americana; EU – placa Eurasiática; NU – placa Núbia; CMA – Crista Média Atlântica; ZFK – Zona de Fratura Kurchatov; ZFNA – Zona de Fratura Norte dos Açores; ZFF – Zona de Fratura do Faial; ZFA – Zona de Fratura Açor; ZFPA – Zona de Fratura Princesa Alice; ZFP – Zona de Fratura do Pico; ZFEA – Zona de Fratura Este dos Açores; RT – Rift da Terceira; FG – Falha Gloria; FI – Flores; C – Corvo; G – Graciosa; T – Terceira; SJ – S. Jorge; FA – Faial; P – Pico; SMG – S. Miguel; SMA – Sta. Maria; FO – Ilhéus das Formigas; BPA – Banco Princesa Alice, BA – Banco Açor; BJC – Banco D. João de Castro; BM – Banco do Mónaco; BWG – Bacia Oeste da Graciosa; BEG – Bacia Este da Graciosa; FH – Fossa Hirondelle; BSM – Bacia de S. Miguel; DF – Desfiladeiro das Formigas (Carmo, 2014).

A ZFAG, como o próprio nome indica, estende-se desde o arquipélago dos Açores até à região do estreito de Gibraltar, correspondendo à fronteira entre as placas Euroasiática e a placa Africana (Núbia) (figura 2.2), na qual estão localizadas, ao longo do seu segmento ocidental, as ilhas do grupo Central (Terceira, Graciosa, S. Jorge, Pico e Faial) e as ilhas do Grupo Oriental (S. Miguel e S. Maria). Esta falha encontra-se dividida em sectores distintos quanto às suas características e morfologia: o denominado RT corresponde à atual fronteira entre as placas Euroasiática e Africana (Núbia) e foi definido por Machado (1959) pela disposição geográfica quase linear das ilhas Graciosa, Terceira, S. Miguel e ilhéus das Formigas, intercalado por 6 bacias tectónicas e

um vulcão submarino. No entanto, presentemente o RT é interpretado como não estando restrito a este alinhamento de elementos morfoestruturais, correspondendo na realidade a uma faixa densamente fraturada e vulcanicamente ativa que compreende os grupos Central e Oriental (Madeira, 1998; Carmo, 2005; Carmo, 2014);

O sector da FG estende-se desde do RT até à longitude 15° W, sendo esta uma estrutura que apresenta uma morfologia nítida no fundo oceânico, com um alinhamento geral E-W. É ainda pautada por uma sismicidade pouco frequente, mas com eventos de magnitude elevada (Searle, 1980; Carmo, 2005);

A ZFEA corresponde ao sector que se desenvolve entre a CMA e a FG. É considerada uma estrutura inativa correspondente à antiga fronteira entre as placas Africana e Euroasiática, sendo caracterizada por apresentar uma sismicidade quase nula e uma morfologia bastante degradada (e.g. Searle, 1980).

Por outro lado, nesta região há ainda a considerar a presença de uma pluma mantélica sob a região dos Açores, sendo a mesma responsável por um magmatismo intenso e pela ocorrência de anomalias batimétricas, gravimétricas, térmicas e na geoquímica de basaltos (Lourenço, 2007 e Pacheco *et al.*, 2013). O enquadramento geodinâmico, está na origem da elevada atividade sísmica e vulcânica existente na região, a qual tem sido registada desde o seu povoamento.

2.2. Sismicidade histórica

Fruto do enquadramento geodinâmico do arquipélago, a sismicidade na região dos Açores pode ser considerada, no geral, como elevada. De facto, desde o povoamento do arquipélago, no séc. XV, são diversos os relatos históricos de eventos naturais ocorridos na região, entre eles eventos sísmicos que resultaram em danos e perdas, tanto humanas como materiais, que dada a escala da região, foram bastante significativos (Silveira, 2002).

Inicialmente, os eventos de maior severidade foram relatados em detalhe por alguns cronistas que demonstravam interesse no tema, designadamente

Frutuoso (1522-1591), Montalverne (1629-1726), Cordeiro (1717), entre outros. Mais tarde, com o desenvolvimento da imprensa local, os eventos mais relevantes ocorridos na região passaram a ser relatados e difundidos por este meio (Silveira, 2002).

No geral, verifica-se que, atualmente, os sismos que ocorrem na região são de magnitude baixa a moderada, sendo sentidos com baixas intensidades. No entanto, da análise efetuada às compilações de eventos históricos, ressalta a ocorrência de alguns eventos de carácter danoso, os quais geraram vítimas mortais e grandes perdas materiais (tabela 2.1 e figura 2.3). Realça-se o primeiro grande sismo de que há registo documental nos Açores, ocorrido a 22 de outubro de 1522 na ilha de S. Miguel, detalhadamente relatado por Frutuoso (1522-1591). Este evento e os, movimentos de vertente que desencadeou, provocaram cerca de 5000 mortos, pelo que é considerada a maior catástrofe natural na região e a segunda ao nível nacional, logo a seguir ao terramoto de Lisboa em 1755 (Marques *et al.*, 2009).

Tabela 2.1 – Principais sismos históricos dos Açores (intensidades na escala MM56) (adaptado de Madeira, 1998, Silveira, 2002 e Gaspar *et al.*, 2015).

Data	Intensidade	Zona mais afetada	Magnitude	Consequências
1522-10-22	X	Vila Franca do Campo		Cerca de 5000 mortes. Grandes destruições.
1571/Jun-Jul	VI/VII	Terceira		Crise sísmica. Algumas destruições.
1614-05-24	X-XI (?)	Praia da Vitória		Destruição quase total.
1647-06-09	V/VI	Terceira		Crise sísmica. Algumas destruições.
1713-12-08	VI/VII	S. Miguel		Crise sísmica. Algumas destruições.
1730-06-13	IX-X (?)	Luz e Praia		Destruição quase total.
1757-07-09	XI	S. Jorge		Cerca de 1000 mortes. Grandes destruições.
1800-06-24	VII-VIII	Vila Nova e S. Sebastião		Grandes destruições.
1801-01-26	VIII-IX	Cabo da Praia e Fonte Bastardo		Grandes destruições.
1837-01-21	IX (?)	Luz e Praia		Destruição quase total.
1841-06-15	IX	Praia da Vitória		Grandes destruições.
1852-04-16	VII	S. Miguel		Várias mortes.
1926-08-31	X	Horta		20 mortes, 200 feridos. Grandes destruições.
1932-08-05	VIII	Povoação		Vários feridos. Grandes destruições.
1935-04-27	VIII-IX	Povoação		1 morto. Grandes destruições.
1937-11-21	VII	Santa Maria		
1939-05-08	VII	Santa Maria	7 Mb	
1952-06-26	VIII	Ribeira Quente		Grandes destruições.
1958-05-13	IX-X	Praia do Norte		Grandes destruições.

1964-02-21	VIII	Velas		Grandes destruições.
1973-11-23	VIII	Santo António		Grandes destruições.
1980-01-01	VII	Angra do Heroísmo	7.2 Mb	54 mortes, 400 feridos. Grandes destruições na Terceira, Graciosa e S. Jorge.
1998-07-09	VIII	Ribeirinha	5.8 MD	8 mortes e mais de uma centena de feridos. Grandes destruições no Faial e Pico.

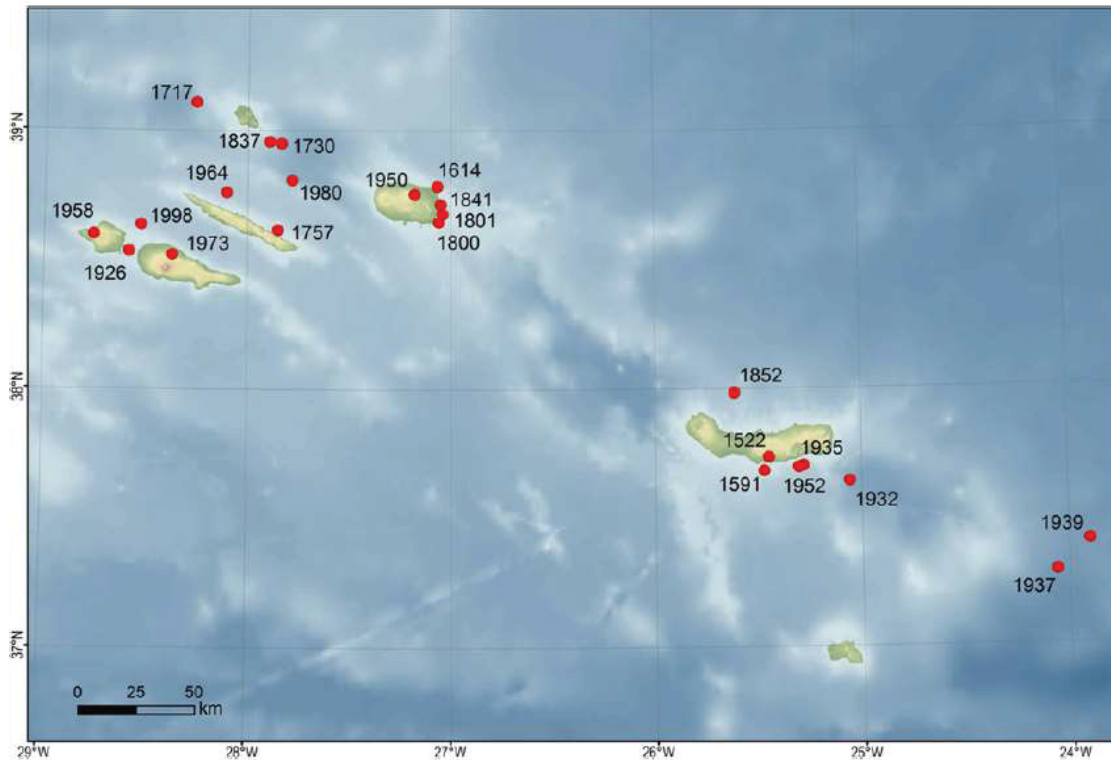


Figura 2.3 – Localização epicentral dos principais sismos históricos dos Açores (Gaspar *et al.*, 2015).

2.3. Sismicidade instrumental

A sismicidade instrumental nos Açores teve início em 1902, com a instalação das primeiras estações sísmicas em Ponta Delgada (S. Miguel) e na Horta (Faial), acompanhando a instalação da rede sísmica mundial, sendo mais tarde, em 1932, instalada uma terceira estação em Angra do Heroísmo (Terceira). Devido ao reduzido número de estações existentes, a capacidade de deteção era fraca, sendo apenas registados eventos de magnitude média a elevada e muitas vezes com erros de cálculo significativos, também em parte devido ao rudimentar sistema de sincronização de relógios (Carmo, 2005).

Tal situação alterou-se com o sismo de 1 de janeiro de 1980, sendo este o evento impulsionador da monitorização sísmica nos Açores. Na região foram instaladas várias estações sísmicas, as quais integraram mais tarde a Rede Universitária de Vigilância Sismovulcânica (RUVS). A rede, do então designado Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica (INMG), sofreu também uma ampliação, com a aquisição de novos instrumentos. Estas duas redes operaram independente até 1997, tendo por isso qualidade inferior nos dados obtidos e na determinação dos parâmetros sísmicos (Carmo, 2005; Silveira, 2002).

Em abril de 1997, o Instituto de Meteorologia (IM), antigo INMG, e o CVARG, da UAc, celebraram um protocolo de cooperação, criando o Sistema de Vigilância Sismológica dos Açores (SIVISA), permitindo melhorar a qualidade dos dados obtidos, bem como a qualidade dos cálculos efetuados (Carmo, 2005).

Em 2007, a colaboração entre estas duas instituições cessou. Posteriormente, em 2008, é criado o Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores (CIVISA), fruto de um protocolo entre o Governo Regional dos Açores e a UAc, tendo o CIVISA assumido a monitorização sismovulcânica do arquipélago, integrando várias técnicas de monitorização, nomeadamente geofísica (sísmica), geoquímica e geodésica.

Atualmente, a rede sísmica permanente gerida pelo CIVISA é composta por 36 estações sísmicas de curto período, distribuídas pelas ilhas dos grupos Oriental e Central (figura 2.4 e tabela 2.2). Esta rede foi definida de forma a garantir a monitorização dos principais sistemas vulcânicos e tectónicos ativos conhecidos, estando grande parte dos sensores instalados em abrigos sísmicos construídos em betão para o efeito, servindo de proteção contra condições ambientais adversas e para salvaguarda dos equipamentos.

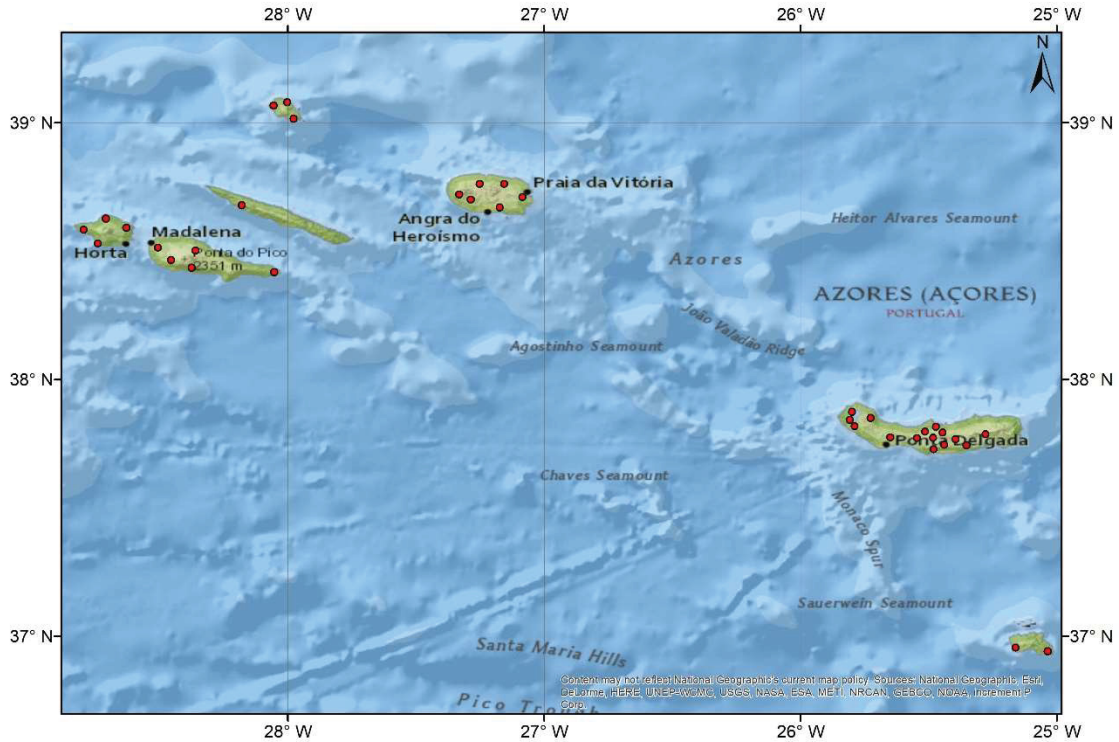


Figura 2.4 – Rede sísmica permanente do CIVISA. Cada ponto vermelho representa uma estação sísmica. Mapa apresentado com coordenadas geográficas, datum WGS84.

Todas as estações sísmicas operadas pelo CIVISA possuem sensores de curto período (1 Hz), sendo a maioria sensores *Lennartz 3D-Lite* de 3 componentes e alguns sensores *Mark L4* de uma componente. As características instrumentais da rede permitem o registo de eventos tectónicos de origem local e regional, uma vez que estes apresentam frequências elevadas e numa gama espectral mais alargada. No entanto, a utilização destes sensores confere à rede uma baixa resolução para eventos distantes de origem tectónica e para determinados tipos de eventos locais de origem vulcânica, dada as baixas frequências que os caracterizam. Os eventos de origem vulcânica têm extrema relevância na monitorização dos sistemas vulcânicos ativos dos Açores, uma vez que permitem caracterizar o estado de atividade destes.

Tabela 2.2 – Rede sísmica do CIVISA.

Ilha	Identificação	Local	Coordenadas	Altitude	Sensor
FAIAL	PCTB	Castelo Branco	38,5301667° -28,7408333°	132 m	Lennartz 3D-Lite
	PCUT	Cedros, Cutelo	38,6268333° -28,7106667°	291 m	Lennartz 3D-Lite
	PLGR	Lomba Grande	38,5908333° -28,6308333°	492 m	Lennartz 3D-Lite
	PTCA	Capelo	38,5845000° -28,7965000°	243 m	Lennartz 3D-Lite
GRACIOSA	PLUZ	Luz	39,0163333° -27,9773333°	98 m	Lennartz 3D-Lite
	PVIA	Vitória	39,0681667° -28,055500°	49 m	Lennartz 3D-Lite
	STGR	Senhora da Ajuda	39,0801667° -28,0020000°	124 m	Lennartz 3D-Lite
PICO	PBOI	Pico dos Bois	38,4363333° -28,3753333°	540 m	Lennartz 3D-Lite
	PCND	Candelária	38,4691667° -28,4623333°	650 m	Lennartz 3D-Lite
	PIED	Piedade	38,4190000° -28,0533333°	235 m	Mark L4
	PMAD	Madalena	38,5143333° -28,5070000°	175 m	Lennartz 3D-Lite
	PTEI	Pico do Teicho	38,4950000° -28,3565000°	820 m	Lennartz 3D-Lite
SÃO JORGE	PAMA	Santo Amaro	38,6796667° -28,1798333°	557 m	Lennartz 3D-Lite
SÃO MIGUEL	CML	Chã da Macela	37,7718333° -25,5455000°	291 m	Mark L4
	FAC	Fajã de Cima	37,7741667° -25,6500000°	191 m	Mark L4
	FRA1	Furnas	37,7430000° -25,3525000°	557 m	Lennartz 3D-Lite
	LFA	Lagoa do Fogo	37,7735000° -25,4826667°	697 m	Mark L4
	MESC	Monte Escuro	37,7933333° -25,4456667°	790 m	Lennartz 3D-Lite
	MIRA	Salto do Cavalo	37,7865000° -25,2783333°	702 m	Mark L4
	PCNG	Congro	37,7675000° -25,3956667°	578 m	Lennartz 3D-Lite
	PFET	Feteiras	37,8180000° -25,7885000°	342 m	Mark L4
	PMAT	Coroa da Mata	37,8160000° -25,4711667°	240 m	Lennartz 3D-Lite
	PRCH	Ribeira Chã	37,7281667° -25,4800000°	225 m	Lennartz 3D-Lite

	PSAN	Santo António	37,8511667° -25,7258333°	395.0 m	Mark L4
	PVER	Pico Vermelho	37,7976667° -25,5138333°	135.0 m	Lennartz 3D-Lite
	SET2	Cumieira Sul	37,8435000° -25,8068333°	697.0 m	Mark L4
	SET4	Seara	37,8746667° -25,7988333°	697.0 m	Mark L4
	VIF	Vila Franca	37,7458333° -25,4391667°	647.0 m	Lennartz 3D-Lite
STA. MARIA	PSPR	Santo Espírito	36,9420000° -25,0351667°	225.0 m	Lennartz 3D-Lite
	PVPO	Vila do Porto	36,9553333° -25,1606667°	225 m	Lennartz 3D-Lite
TERCEIRA	ASBA	Santa Barbara	38,7205000° -27,3311667°	675.0 m	Lennartz 3D-Lite
	PBIS	Biscoitos	38,7618333° -27,2523333°	435.0 m	Lennartz 3D-Lite
	PFAV	Favas	38,7111667° -27,0843333°	153.0 m	Lennartz 3D-Lite
	PPAD	Pico dos Padres	38,7006667° -27,2871667°	305.0 m	Lennartz 3D-Lite
	PRIB	Ribeirinha	38,6715000° -27,1731667°	387.0 m	Lennartz 3D-Lite
	PVNV	Vila Nova	38,7623333° -27,1555000°	150.0 m	Lennartz 3D-Lite

Para além da limitação no tipo de eventos registados, a distribuição geográfica das ilhas, e por consequência das estações, num alinhamento de direção WNW-ESE, reduz a capacidade de deteção e qualidade de análise para eventos com epicentro a NE ou a SW dos Grupos Central e Oriental, enquanto que para eventos com epicentro em terra a rede possui boa resolução (Silveira, 2002).

Tendo em conta a carta epicentral dos Açores, para os últimos 30 anos (figura 2.5) verifica-se a existência de diversas zonas sismogénicas que se evidenciam pela sua elevada sismicidade, como é o caso da zona a W do Faial, a Fossa Oeste da Graciosa, a Crista Submarina Leste da Terceira, a Fossa Hirondelle, a zona central de S. Miguel, a Fossa da Povoação e a região dos ilhéus das Formigas (figura 2.5). De referir que estas zonas sismogénicas foram definidas pelo CIVISA, podendo abranger áreas distintas e possuir designações diferentes. No que toca a valores de magnitude, a sismicidade é marcada, no

geral, por eventos de magnitude média a baixa, ocorrendo ocasionalmente eventos com magnitude superior a 5.

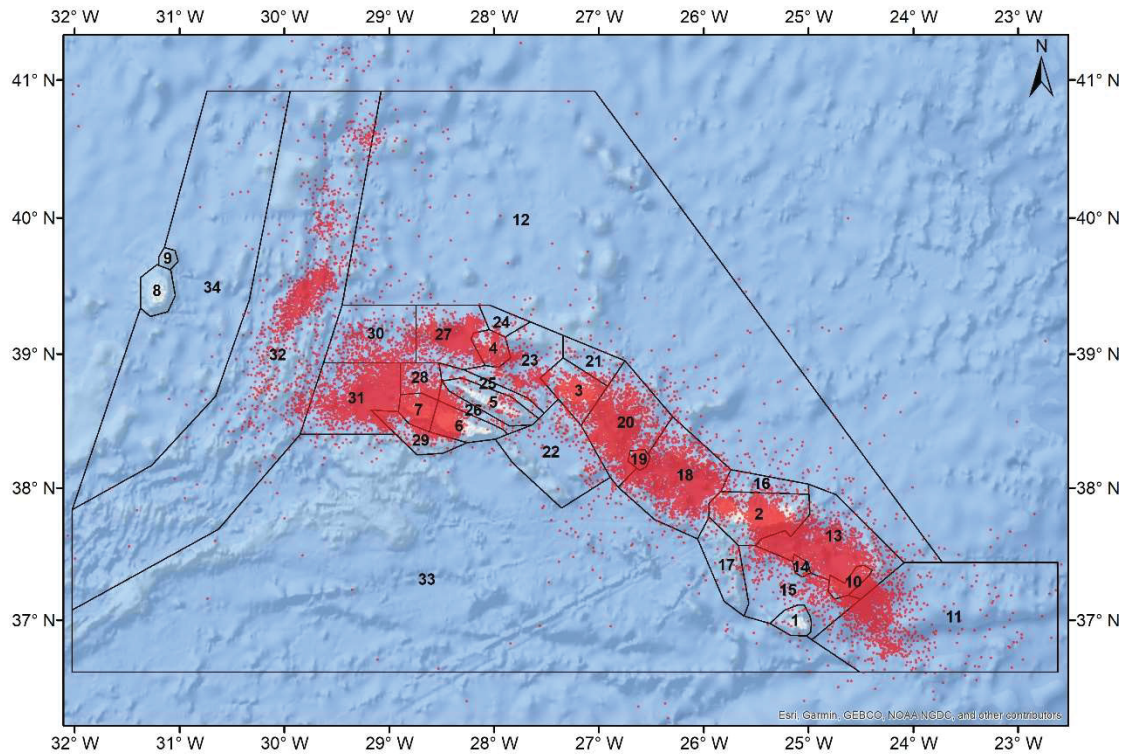


Figura 2.5 – Carta epicentral dos Açores, no período compreendido entre 1 de janeiro de 1997 e 31 de dezembro de 2016 (dados CIVISA, 2017). Zonas sismogénicas definidas pelo CIVISA: 1 – Santa Maria; 2 – São Miguel; 3 – Terceira; 4 – Graciosa; 5 – São Jorge; 6 – Pico; 7 – Faial; 8 – Flores; 9 – Corvo; 10 – Região dos Ilhéus das Formigas; 11 – E dos Açores (Falha Glória); 12 – N dos Açores; 13 – Bacia SE de São Miguel; 14 – Banco Grande Norte; 15 – Bacia de Santa Maria; 16 – N de São Miguel; 17 – Crista do Mónaco; 18 – Bacia Hirondelle S; 19 – Banco D. João de Castro; 20 – Bacia Hirondelle N; 21 – N da Terceira; 22 – Bacia S da Terceira; 23 – Bacia E da Graciosa; 24 – N da Graciosa; 25 – Canal N de São Jorge; 26 – Canal São Jorge – Pico; 27 – Bacia W da Graciosa; 28 – N do Faial; 29 – Crista do Condor; 30 – Zona N de Fratura dos Açores; 31 – W do Faial; 32 – Crista Média Atlântica; 33 – S dos Açores; 34 – E de Flores e Corvo. Mapa apresentado com coordenadas geográficas, datum WGS84.

3. INSTRUMENTAÇÃO SÍSMICA

3.1. Resenha história

Apesar da Sismologia ser uma área de estudo relativamente recente, esta tem sofrido rápidos avanços nos últimos anos. Um dos grandes impulsionadores deste avanço está relacionado com os progressos tecnológicos que se iniciaram no princípio do século XX e que vieram contribuir para a criação de novos sensores, mais sensíveis e robustos.

As antigas civilizações consideravam os sismos, bem como outras catástrofes naturais, obras divinas que serviam como punições pelos pecados cometidos pela sociedade ou, então, eram vistos como fruto de criaturas míticas que habitavam no interior da Terra (figura 3.1) (Agnew, 2002).



Figura 3.1 – Na mitologia Hindu, o planeta era segurado por oito elefantes que estavam no topo de uma tartaruga gigante. Quando uma destas criaturas se movia ocorria um sismo (Coles, 2013).

No entanto, certas culturas, tais como a Chinesa e a Grega, começaram a distanciar-se destas explicações, procurando causas naturais que pudessem explicar tais fenómenos (e.g. Agnew, 2002; Havskov e Alguacil, 2004).

Na cultura Chinesa dominava a ideia que os grandes terremotos eram causados devido ao bloqueio da substância essencial *qi*, estando também associados à decadência das dinastias. Por estes motivos, gerou-se um interesse no estudo e desenvolvimento de mecanismos de deteção destes eventos, levando ao surgimento dos primeiros instrumentos (Agnew, 2002; Havskov e Alguacil, 2004). Acredita-se que o primeiro destes instrumentos tenha sido o sismoscópio, desenvolvido na China, por Zhang Heng, em 132 A. D. (figura 3.2). O instrumento em questão consistia num vaso de bronze com oito figuras de dragão no seu exterior que, com a sua boca, seguravam uma esfera, também ela em bronze. Aquando da vibração provocada por um



Figura 3.2 – Modelo do sismoscópio de Zhang Heng (*Seismograph*, 2016).

evento, o mecanismo no interior do dispositivo abria uma das bocas dos dragões, que por sua vez deixava cair uma das bolas para a boca de um dos oito sapos instalados na base do instrumento, também eles de bronze. Tal gerava um ruído

que alertava para a ocorrência de um evento, sendo que a direção a partir do qual o evento se propagou poderia ser determinada pela observação de qual das bocas dos dragões estava aberta. Registos históricos indicam que este dispositivo apresentava sensibilidade considerável, havendo relatos de ter detetado um sismo a mais de 600 km, não sentido na região em que estava instalado o sismoscópio. No entanto, até hoje, desconhecem-se os princípios de funcionamento de tal mecanismo (*Seismograph*, 2016).

Contudo, só a partir do final do séc. XIX é que os primeiros sismógrafos (sismómetro com registo no local) começam a ser concebidos e fabricados. Um dos pontos-chave no desenvolvimento destes ocorreu em 1880 quando John Milne e a sua equipa formaram a Sociedade Sismológica do Japão e debruçaram-se sobre o estudo de vários tipos de eventos sísmicos que ocorreram no país. Para tal, desenvolveram vários tipos de sismógrafos, tendo sido creditado a John Milne a invenção do primeiro sismógrafo de pêndulo horizontal, que mais tarde foi aperfeiçoado por Fusakichi Omori, permitindo a deteção e gravação de vibrações muito ténues. Estes dispositivos foram utilizados pelas redes sismológicas mundiais até ao fim da Segunda Guerra Mundial (Agnew, 2002, Poppe, 1979).

Os sismógrafos de Milne possuíam limitações ao nível do sensor e do sistema de registo, de tal forma que estes eram apenas adequados na deteção de eventos de grande magnitude. Um importante passo na superação destas limitações foi dado por E. Wiechert, que em 1904 introduziu o seu sensor de pêndulo invertido, tendo este sido o primeiro a possuir um sistema de amortecimento adequado. Estes pêndulos tinham uma grande massa (podendo ter várias toneladas) o que passou a possibilitar o registo de vibrações mais ténues (Ben-Menahem, 1995). Quase em seguida, B. B. Golitsyn desenvolve em 1906 um sistema que permitiu alcançar níveis de precisão e sensibilidade superiores. Tal foi possível graças ao desenvolvimento do primeiro sensor eletromagnético e pela utilização de gravação fotográfica de dados em que a corrente gerada pelo sensor era registada por um galvanómetro que movia um espelho de onde refletia um raio luminoso (Ben-Menahem, 1995).

Todos estes desenvolvimentos ao nível da instrumentação sísmica contribuíram para a sua rápida difusão mundial, aumentando o número de estações sísmicas

no Globo, conduzindo a um período em que as ideias desenvolvidas até 1920 sobre a propagação das ondas e da estrutura interna da Terra foram refinadas e melhoradas, mas sem grandes mudanças nas técnicas e instrumentos empregues (Agnew, 2002, Ben-Menahem, 1995).

Por volta de 1960, os sensores sísmicos voltam a sofrer um novo desenvolvimento. Com o decorrer da Guerra Fria procurava-se melhorar os sensores sísmicos eletromecânicos para que estes fossem capazes de detetar ensaios nucleares subterrâneos clandestinos. Essas mesmas melhorias foram rapidamente implementadas no estudo e monitorização de sinais sísmicos (Montalvo, 2005). Para além disso a Associação Sismológica Internacional disponibiliza regularmente o boletim *International Seismological Summary* (ISS) que facultava informação sobre a sismicidade global, sobre as estações globais bem como o fornecimento ocasional de formas de onda, possibilitando a difusão de dados mundiais a investigadores individuais (Agnew, 2002).

A partir de 1980 surgem os primeiros sensores de força balanceada (Montalvo, 2005). Estes sensores pautam-se por possuírem uma elevada sensibilidade ao longo de uma vasta gama de frequências, podendo desta forma ser utilizado apenas um destes sensores em locais onde antes seriam necessários dois ou mais com bandas de sensibilidades distintas. Para além disto, os contínuos desenvolvimentos nesta área tiveram como objetivos principais o aumento da robustez e versatilidade, e a diminuição nos custos monetários e energéticos, tendo por isso a sua utilização aumentado nos últimos anos. Este tipo de sensor é utilizado em acelerómetros e em estações de banda larga (e.g. Montalvo, 2005).

3.2. Princípios de funcionamento de sismómetros

3.2.1. Sismómetros mecânicos

Este tipo de sensor, também conhecido por sismómetro de inércia, utiliza a inércia de uma massa suspensa por uma mola (figura 3.3). Quando ocorre um deslocamento do solo, o sismómetro é solidário com esse movimento, movendo-se com a mesma aceleração do solo, em oposição à massa suspensa instalada

no interior do sensor que irá, inicialmente, manter-se estacionária dada a sua inércia.

Os sismómetros eletromecânicos resultam da adição de uma componente eletrónica aos sensores mecânicos, permitindo a medição de forma mais precisa do diferencial de movimento entre o corpo do sismómetro e a massa, sendo que para tal, a massa é normalmente constituída por uma bobine envolvida num campo magnético (um íman, por exemplo), sendo que o movimento da massa gera uma alteração do campo magnético, produzindo um sinal elétrico.

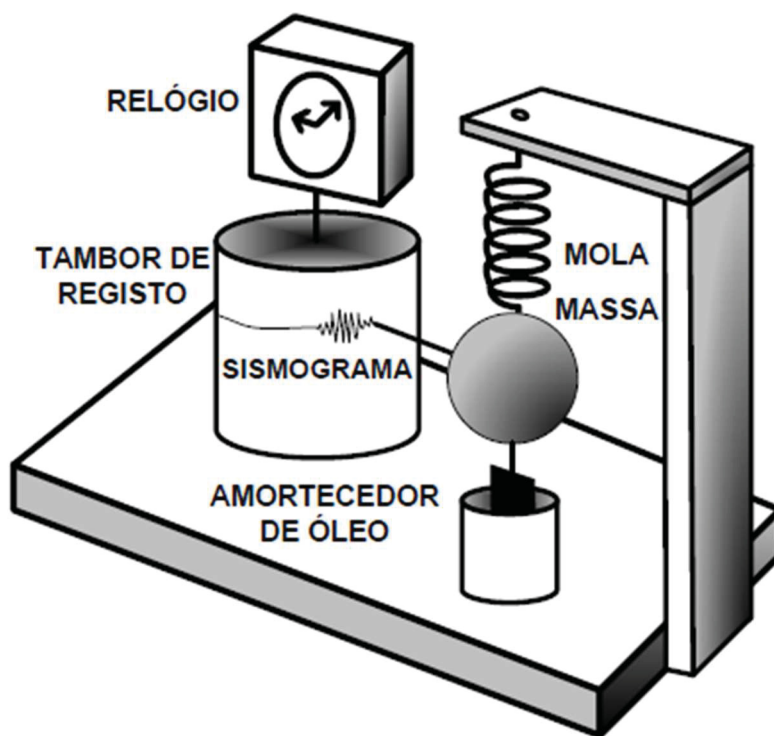


Figura 3.3 – Esquema de um sismómetro de inércia (*in*: Montalvo, 2005; adaptado de Espíndola e Jiménez, 1994).

A principal limitação deste tipo de sensor encontra-se na sua resposta a baixas frequências (tabela 3.3). Nestes casos, em que o deslocamento do solo é caracterizado por um período muito longo, a massa do sismómetro poderá não ter tempo suficiente para acompanhar a movimentação do solo, pelo que o deslocamento não é registado.

Outra limitação resulta do facto de este tipo de sensor apenas conseguir registar acelerações dado que, por ação da mola, a massa tende a retornar ao seu ponto de origem, e como tal, deslocamentos que possuem velocidade constante não são registados. Por fim, deve ser considerado que estes sensores podem ter o seu registo saturado para eventos locais com magnitudes elevadas, afetando a determinação da magnitude e localização do evento. Apesar disto, os sensores de inércia eletromecânicos continuam a ter um papel importante na monitorização sísmica dado o seu baixo custo, facilidade de instalação e transporte, pela sua versatilidade e robustez, sendo em determinadas situações a melhor opção em termos de custo/benefício (Havskov e Alguacil, 2004; Montalvo, 2005; *Seismograph*, 2016).

Tabela 3.1 – Frequências associadas a diferentes eventos (adaptado de Havskov e Ottemöller, 2010).

Frequência (Hz)	Eventos associados
0.00001-0.0001	Marés Terrestres
0.0001-0.001	Oscilações livres da Terra, sismos
0.001-0.01	Ondas superficiais, sismos
0.01-0.1	Ondas superficiais, ondas P e S, sismos com magnitude > 6
0.1-10	Ondas P e S, sismos com magnitude > 2
10-1000	Ondas P e S, sismos com magnitude < 2

3.2.2. Sensores de força balanceada - *Force Balanced Accelerometers* (FBA)

Os sensores do tipo FBA, *Force Balanced Accelerometers* (Acelerómetros de Força Balanceada), são a base dos sismómetros modernos.

Este tipo de sensor, tal como o sensor de inércia, possui no seu interior uma massa calibrada. No entanto, ao contrário do sensor de inércia, que está dependente da movimentação da massa em relação ao corpo do sismómetro para registar deslocamento, este tipo de sensor sísmico utiliza o princípio da força balanceada. Isto significa que a força de inércia que seria responsável pelo movimento aparente da massa em relação ao corpo do sismómetro é

compensada por uma outra força gerada eletronicamente, de tal forma que o movimento da massa em relação ao corpo do sismómetro seja nulo ou o menor possível.

De forma a conseguir registar deslocamento, este sensor é caracterizado pela presença de dois transdutores (figura 3.4): o transdutor de deslocamento que é responsável pelo registo do deslocamento da massa através da corrente elétrica que produz em função do deslocamento, e um transdutor de força eletromagnético, que de acordo com a corrente elétrica exerce uma força, que mantém a massa na sua posição inicial. Uma vez que a força de compensação gerada pelo transdutor de força eletromagnético possui a mesma aceleração, mas em sentido contrário à aceleração do solo, trata-se de um sistema de *feedback* negativo, sendo que a corrente necessária para manter a massa em equilíbrio é proporcional à aceleração do solo. Desta forma, é possível determinar essa aceleração através da medição direta da voltagem na resistência do circuito elétrico. Tal significa que uma pequena aceleração resulta numa pequena corrente, enquanto que uma grande aceleração resulta numa grande corrente. Outra vantagem deste sistema é o facto de o parâmetro de saída ser uma voltagem proporcional à aceleração e, como tal, ao instalar no circuito um integrador é possível obter como parâmetro de saída uma corrente proporcional à velocidade (Havskov e Alguacil, 2004; Montalvo, 2005).

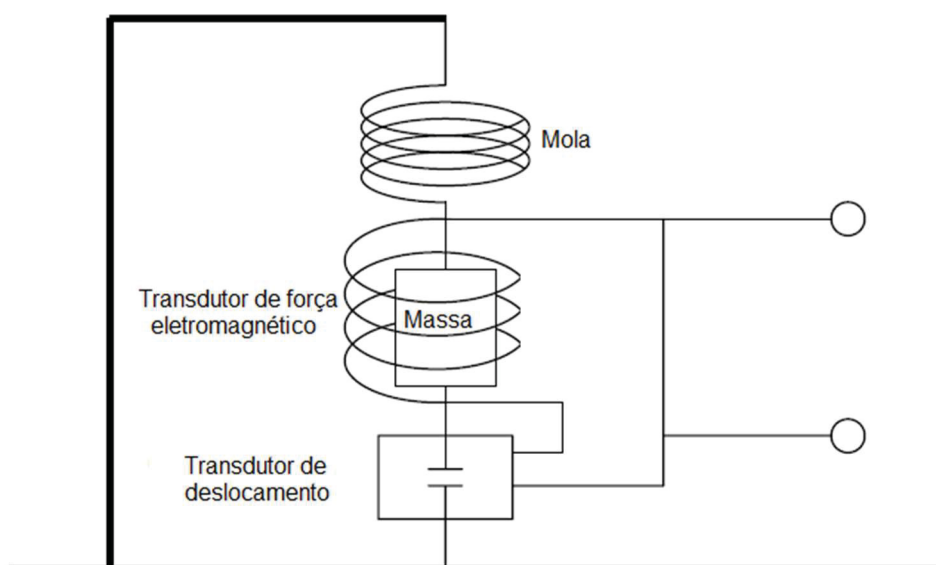


Figura 3.4 – Esquema de funcionamento dos acelerómetros de força balanceada (adaptado de Havskov e Alguacil, 2004).

3.3. Sismómetros de banda larga

Hoje os sensores de banda larga são cada vez mais a escolha preferida para qualquer tipo de rede sísmica. Graças ao seu princípio de funcionamento FBA, são capazes de fornecer informação numa gama de frequências muito maior (0,01 a 50 Hz), permitindo a elaboração de uma maior variedade de estudos, quando comparado com um sensor de curto período (1 a 100 Hz) (figura 3.5), permitindo ainda que os mesmos tenham um elevado ganho dinâmico (elevada sensibilidade do instrumento face à intensidade do movimento sísmico) e cujas massas do mesmo sejam diminutas. Estas características fazem deste sensor um instrumento versátil numa variedade de estudos sísmicos.

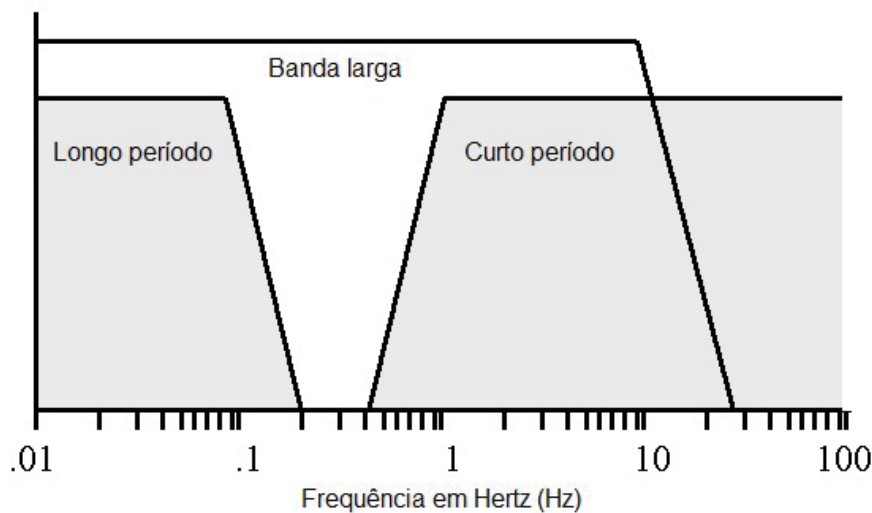


Figura 3.5 – Classificação dos diferentes tipos de sensores conforme a sua faixa de frequência (adaptado de Ortiz *et al.*, 2001).

No entanto, a mesma sensibilidade que permite obter mais dados traduz-se em algumas particularidades que devem ser tomadas em atenção antes e durante a instalação deste tipo de sensor e, mais tarde, durante a análise dos dados obtidos. Tipicamente, os custos de aquisição destes sensores são mais elevados, quando comparados com sensores de curto período. Contudo, por abrangerem uma maior gama de frequências, um único sensor de banda larga pode ser utilizado no lugar de um sensor de curto período e de um sensor de longo período, reduzindo assim as diferenças no custo de aquisição. No que concerne aos custos de manutenção, tendencialmente, serão mais elevados do

que para um sensor de curto período, uma vez que sendo um sensor ativo, necessita de uma fonte de energia estável e, ao contrário dos sensores de curto período, possuem uma eletrônica muito sofisticada cuja manutenção não é passível de ser realizada sem os conhecimentos ou equipamentos do fabricante. Para além disto, a capacidade de deteção destes sensores significa que possuem uma maior capacidade para registar sinais indesejados, pelo que a instalação dos mesmos requer alguns cuidados, ou seja, a instalação em locais ruidosos significa que o ruído registado poderá sobrepor-se aos sinais alvo de estudo (Havskov e Alguacil, 2004). Como tal, estes sensores requerem uma seleção cuidada dos locais de instalação e das condições dos abrigos sísmicos onde são instalados, sendo estes aspetos discutidos no quinto capítulo.

Por fim, é necessário ter em atenção a necessidade de filtragem dos dados pois, mesmo tendo todos os cuidados no que concerne à instalação dos sensores, estes ainda terão um pico de ruído correspondente ao ruído sísmico de fundo natural (0,2-0,3 Hz), sendo por isso necessário a filtragem deste sinal durante a análise de sinais mais ténues (Havskov e Alguacil, 2004). Uma discussão mais aprofundada destas fontes de ruído é feita no capítulo seguinte.

4. ANÁLISE DE RUÍDO SÍSMICO

4.1. Causas e implicações

O ruído sísmico pode ser definido como qualquer sinal indesejado que um sensor sísmico registre. É um parâmetro que deve ser tido em atenção aquando da instalação de uma estação sísmica, em especial no caso da utilização de sensores sísmicos com elevados níveis de sensibilidade. A instalação de sensores em ambientes ruidosos pode originar dados em que os sinais alvo de estudo encontram-se sobrepostos por ruído, dificultando assim o estudo destes.

Em termos gerais, existem duas fontes distintas de ruído: ruído gerado pela própria instrumentação e ruído exterior ao equipamento de monitorização, conhecido por ruído sísmico.

O ruído instrumental induzido pelo sismómetro será, por norma, consideravelmente inferior ao ruído sísmico, de tal forma que num instrumento de qualidade, em corretas condições de funcionamento e na gama de sensibilidade do mesmo, este ruído não deverá sobrepor-se ao ruído sísmico. No entanto, a utilização de outros equipamentos eletrónicos, como amplificadores, sistemas de comunicação ou outros equipamentos por onde os sinais são processados poderão induzir níveis consideráveis de ruído.

Já o ruído sísmico possui como fonte fatores externos ao sistema de deteção, podendo ter expressão suficiente para sobrepor-se aos sinais sísmicos. Essas fontes podem ser diversas e os níveis de ruído registados variam não só com a fonte, mas com um conjunto de fatores diversos, como a litologia por onde se propagam, ou as características dos sensores (Havskov e Alguacil, 2004).

A classificação de ruído sísmico está dependente dos dados obtidos, dos objetivos de estudo e dos métodos de análise. Dados que num contexto seriam considerados ruído, podem ser considerados sinais de interesse numa outra aplicação. Exemplo disto é o ruído de longo período, que pode ser usado em estudos de correlação cruzada entre estações sísmicas (*e.g.* Santos, 2016), mas que no caso de monitorização sísmica regional não possuem grande relevância. Desta forma, ao longo deste trabalho foi considerado como ruído sísmico todas

as fontes de vibração que não se insiram na definição de sismo (Havskov e Alguacil, 2004).

As fontes de ruído são diversas e apresentam-se com frequências distintas (conforme a fonte das mesmas). A fonte de ruído com maior dispersão global resulta de processos oceânicos. Este tipo de ruído, conhecido na literatura inglesa por *oceanic microseism*, apresenta baixas frequências, estando dividido em primário e secundário, sendo tratado por ruído oceânico primário e ruído oceânico secundário neste estudo. O ruído oceânico primário exhibe períodos entre 10 a 20 s e é gerado nas zonas costeiras devido à energia das ondas que é convertida em energia sísmica fruto da interação das ondas com a costa e pelas variações de pressão vertical causada pelas ondas em águas pouco profundas. Dado que esta é uma interação direta, as frequências serão iguais às das ondas responsáveis pela produção deste ruído (Bormann e Wielandt, 2002).

O ruído oceânico secundário, também conhecido por ruído de frequência dupla, dada o seu pico ocorrer com o dobro da frequência ruído primário (entre 4 a 9 s), resulta da interação de ondas oceânicas com frequências iguais, mas que se propagam em direções contrárias. Tal interação gera uma diferença de pressões que se propaga até ao fundo oceânico sem sofrer atenuação, sendo a amplitude deste ruído secundário maior do que o primeiro. A amplitude deste tipo de ruído não se mantém constante ao longo do tempo, estando, em grande parte, dependente das condições oceânicas que prevalecem. Como tal, o ruído será maior aquando da existência de tempestades oceânicas. Desta forma, estações sísmicas situadas na proximidade da costa sofrem um grande aumento de ruído durante tais condições (Bormann e Wielandt, 2002).

O ruído oceânico registado está dependente da distância da estação à costa, pelo que quanto mais afastado da costa menor será este ruído. No entanto, também devem ser consideradas grandes massas de água no interior dos continentes, uma vez que estas também produzem ruído com características idênticas, diferenciando-se no pico de ruído secundário, que ocorre com períodos mais curtos (2 a 4 s) (Bormann e Wielandt, 2002).

O ruído sísmico antropogénico refere-se a todo o ruído gerado por atividades humanas que transmitem vibrações ao solo. Este tipo de ruído, também

conhecido por ruído cultural, é caracterizado pelo domínio de frequências elevadas (a partir dos 2 Hz). As fontes deste tipo de ruído incluem tráfego rodoviário, maquinaria pesada, centrais de produção e transformação elétrica, entre outros. Dado que este tipo de atividades está associado a uma rotina humana diária, muitas destas fontes de ruído possuem maior amplitude durante o período diurno, chegando o ruído a cessar por completo durante a noite e fins de semana (Havskov e Alguacil, 2004).

Muitas vezes é possível distinguir este tipo de ruído pelo facto de cada fonte de ruído estar associada a uma curta gama de frequências ou possuir características próprias. Desta forma, um sensor sísmico que esteja localizado na proximidade de uma indústria pesada, como a produção de energia com recurso a geradores, poderá registar um ruído com uma frequência muito específica durante o funcionamento estabilizado desse gerador. No entanto, essa frequência poderá variar com o tempo, mediante aceleração ou abrandamento do gerador.

Apesar deste tipo de ruído poder apresentar grandes amplitudes, este propaga-se sobretudo através de ondas superficiais de altas frequências, sofrendo por isso rápida atenuação à medida que aumenta a distância e profundidade da sua fonte. Sendo que este ruído varia com a localização e está associado a altas frequências, a mitigação deste passa por uma cuidada seleção de locais para instalação de estações sísmicas, certificando-se que estas são localizadas em locais suficientemente afastados destas fontes de ruído. Contudo, tal nem sempre é possível, pois muitas vezes não é viável a instalação de sensores muito afastados de estradas ou meios populacionais, uma vez que os custos de reparação e manutenção das estações tendem a aumentar com a distância e a degradação das vias de acesso, pelo que estações de difícil acesso podem sofrer de manutenção inadequada ou longos tempos sem reparação (Bormann e Wielandt, 2002).

Existem ainda outros processos naturais responsáveis pela produção de ruído de curto período. O vento, por exemplo, gera ruído dada a vibração gerada quando este embate em estruturas presentes no terreno. O ruído gerado pode apresentar uma grande gama de frequências (entre 0,5 e 60 Hz). Esse ruído está normalmente dependente da forma e dimensão do objeto atingido. Assim,

objetos como postes elétricos podem gerar ruídos de baixa frequência, enquanto que outros objetos não tão altos, ou propícios a balançar, tendem a gerar ruído de frequências mais elevadas. Tipicamente, durante a montagem de estações sísmicas são evitadas grandes irregularidades no terreno, tais como rochedos, árvores de grande porte, penhascos ou áreas ventosas em geral, minimizando desta forma este tipo de ruído (Trnkoczy *et al.*, 2012).

Por fim, existem ainda fontes naturais de ruído de longo período. Este tipo de ruído está associado a processos atmosféricos que são responsáveis por variações da pressão atmosférica. Assim, sensores sensíveis a baixas frequências são capazes de registrar alterações de temperatura dada a variação da pressão que esta produz, alterando a massa da coluna de ar sobre o sismómetro e deformando o solo em que o sensor está assente, gerando um sinal de baixa frequência. Assim, deve ser minimizado o grau de exposição do sismómetro a variações de temperatura e flutuações rápidas de pressão atmosférica (Havskov e Alguacil, 2004).

4.2. Densidade Espectral de Potência

Os níveis de ruído sísmico variam consoante o local e ao longo do tempo, apresentando diferentes intensidades e frequências, conforme a sua fonte. Desta forma, existe a necessidade de proceder à análise dos níveis de ruído a diferentes frequências, de forma a poder classificar cada local quanto ao seu ruído. Tal análise, permite que a instalação de sensores sísmicos seja realizada em locais adequados para cada tipo de sensor, sabendo de antemão as características do ruído nos locais de instalação.

O método definido por McNamara e Buland (2004) tornou-se o método convencional e aceite neste tipo de avaliação, sendo incorporado em diversos pacotes de *software* de análise de dados sísmicos, uma vez que permite comparar características de ruído sísmico de diferentes redes e em diferentes regiões do Globo.

O método engloba o cálculo do *Power Spectral Density* (PSD, Densidade Espectral de Potência), que define a densidade de potência em função da

frequência. A partir destes valores é calculada a *Probability Density Function* (PDF, Função Densidade de Probabilidade), que descreve a probabilidade relativa de uma variável aleatória tomar um dado valor.

O cálculo de PSD segue a metodologia que foi utilizada por Peterson (1993) e Bendat e Piersol (2011), para a definição dos modelos de ruído. Desta forma, a análise é realizada a partir de séries contínuas de dados, para cada componente de uma dada estação (figura 4.1).

O processamento inicial dos dados envolve várias operações que visam facilitar o cálculo de PSD. A análise utiliza as séries de dados contínuos que são divididos em segmentos de uma hora com sobreposição de 50%, de forma a reduzir grandes variações dos valores de PSD. De forma a reduzir ainda mais essas variações, cada segmento de hora é dividido em 13 segmentos, com sobreposição de 75%, sendo ainda aplicados outros métodos para reduzir o número de operações durante o cálculo da Transformada Rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*), minimizar as contaminações em dados com baixas frequências e minimizar os efeitos causados pelas discontinuidades entre segmentos.

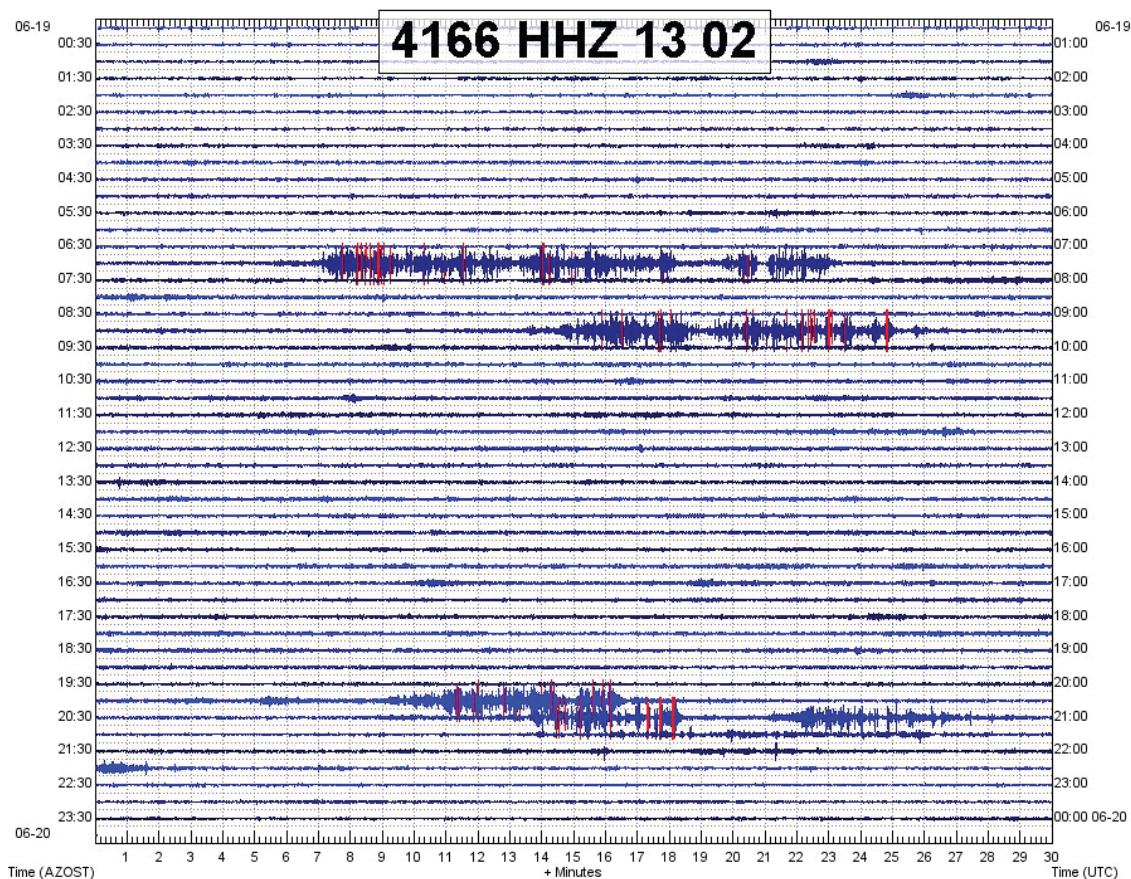


Figura 4.1 – Exemplo de uma série contínua de dados referente a 24 horas de registo na estação SET2. É possível observar algum ruído ao início da manhã e ao final da tarde.

O método mais comum para o cálculo de valores de PSD é através do algoritmo de Cooley-Tukey (Cooley e Tukey, 1965), dada a eficiência computacional deste no cálculo da FFT. À estimativa de PSD obtida é aplicado um fator de correção e removida a correção da resposta do sismómetro e digitalizador, pelo que o valor de PSD total (P_k) é dado por:

$$P_k = \frac{2\Delta}{N} |Y_k|^2 \quad (1)$$

Como tal, a densidade espectral é dada pelo quadrado do espectro de amplitude (Y_k), anteriormente calculado pela FFT, com um fator de normalização de $2\Delta t/N$, em que Δt é o intervalo de amostragem e N é o número de amostras num segmento de tempo.

Para permitir a comparação direta com os modelos de ruído propostos por Peterson (1993), ficou também convencionado representar o valor de PSD em

unidades de decibéis (dB) para acelerações $((m/s^2)^2/Hz)$ (figura 4.2). Este processo é repetido para cada um dos 13 segmentos, sendo calculado um valor médio para cada um dos segmentos, ficando o valor de PSD para cada hora a média desses 13 segmentos. O valor final de PSD para cada hora possuiu um intervalo de confiança de 95%, entre -2,14 dB a +2,87 dB do valor indicado.

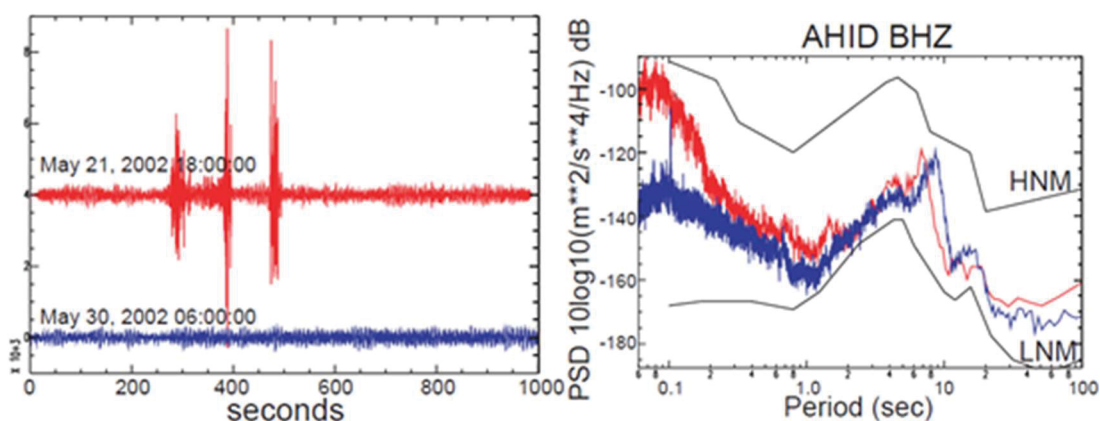


Figura 4.2 – Exemplo de estimativas de PSD, efetuado a partir de registos individuais. A vermelho, o registo associado à passagem de um automóvel e a azul o registo de fundo de uma estação (McNamara e Buland 2004).

De forma a estimar as variações de ruído de uma estação, são geradas PDF a partir dos valores de PSD. Durante o processo são utilizados milhares de valores de PSD, sendo estes acumulados por frequências de forma a obter gráficos de distribuição de potências acumuladas em função da frequência, o que permite medir a densidade relativa dos valores de PSD (quantos dos valores observados estão localizados numa pequena porção do gráfico), sendo as probabilidades codificadas numa escala de cores. A partir da análise destes gráficos é possível obter uma grande variedade de informação quanto ao funcionamento da estação.

Este método de análise de ruído possui a particularidade de não necessitar de verificação e eliminação de eventos sísmicos, falhas do sistema ou outros sinais anómalos, sendo estes sinais mantidos nas séries de dados. Tal é possível uma vez que fenómenos assim, normalmente, estão associados a uma probabilidade muito baixa de ocorrência, enquanto que o ruído sísmico local estará associado a elevadas probabilidades de ocorrência, e por isso fornecem uma representação real do funcionamento da estação. Como tal, a automatização

deste tipo de análise permite estimar alterações na qualidade geral da estação, bem como definir níveis de referência para o ruído sísmico local, permitindo ainda fazer comparações com outras estações, o que permite a rápida deteção de problemas na operação da estação e do sistema de telemetria e armazenamento de dados. A desvantagem deste método prende-se com o grande volume de dados resultantes, sendo necessário muitas horas de dados de forma a obter uma representação real do nível de ruído verificado em cada estação (McNamara e Buland, 2004).

4.3. Modelos de ruído sísmico

De forma a permitir a comparação e avaliação entre estações sísmicas foram definidos modelos globais de ruído sísmico de fundo. Os modelos propostos por Jon Peterson (1993) resultam do refinamento dos modelos já existentes (*High Noise Model* (HNM) e *Low Noise Model* (LNM) definidos pelo *United States Geological Survey* (USGS)) (Peterson, 1993), sendo estes últimos aceites e utilizados na análise de ruído sísmico para fins de avaliação da qualidade dos sinais.

Para a definição dos modelos propostos por Peterson (1993), foram utilizados dados provenientes de 75 estações sísmicas (figura 4.3), com vários tipos de sensores sísmicos instalados em diferentes países, obtendo-se desta forma uma heterogeneidade de características dos sensores e dos locais, garantido que o ruído induzido por um modelo particular de sensor não se sobrepõe ao ruído sísmico. Destas 75 estações, 74 fazem parte da *Global Seismograph Network* (GSN), estando os seus dados disponíveis para acesso público a partir do centro de dados do USGS e da *Incorporated Research Institutions for Seismology* (IRIS).

Os dois modelos foram criados através da representação gráfica de todos os valores de PSD (figura 4.4). A esta representação gráfica foram traçados segmentos de reta no limite inferior e superior, sendo ignorados alguns picos e ocorrendo alguma sobreposição de forma a preservar a estrutura geral do ruído sísmico.

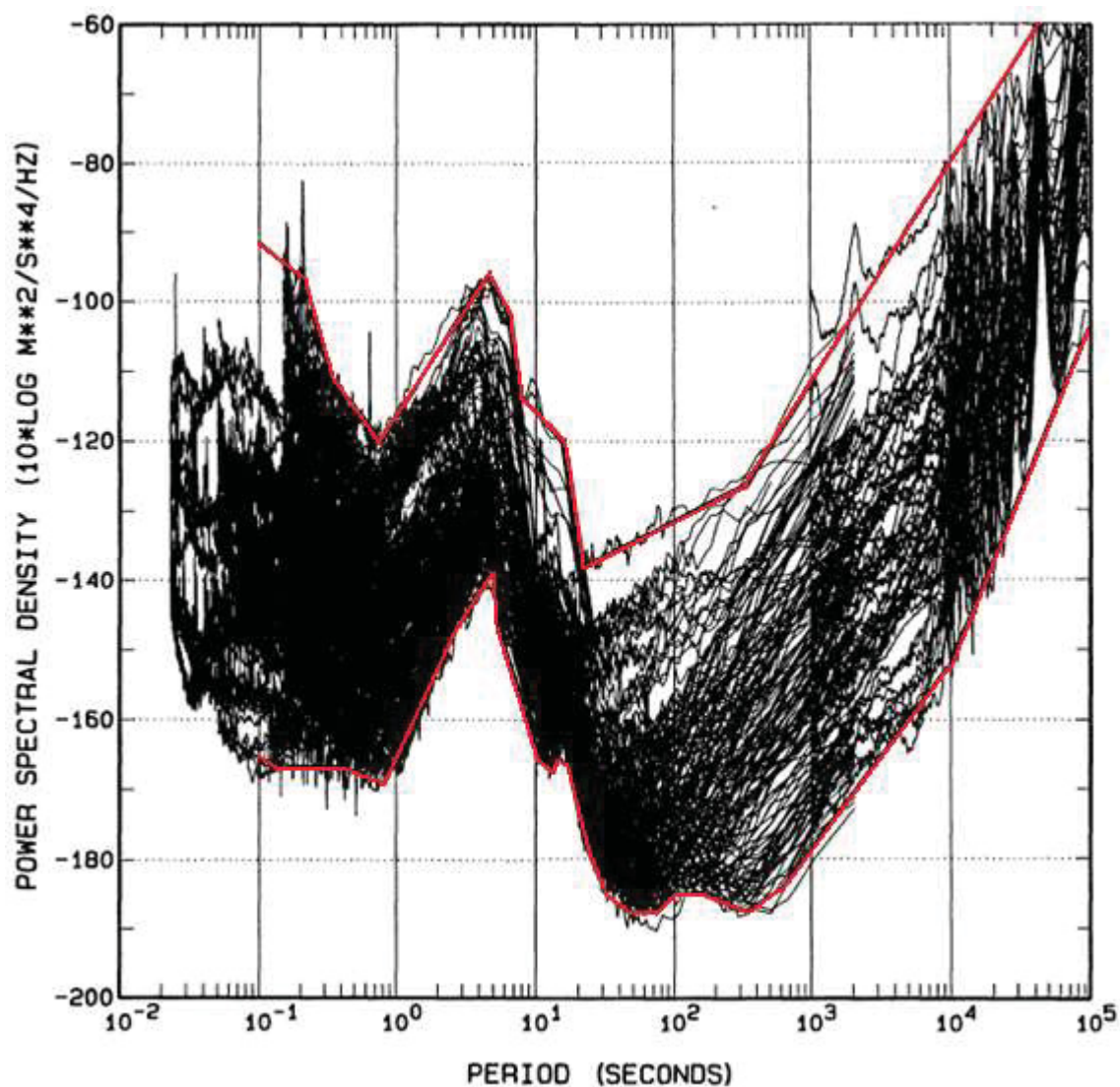


Figura 4.4 – Representação gráfica das curvas de PSD utilizadas para definir os modelos de ruído. As curvas dos dois modelos estão representadas a vermelho (adaptado de Peterson, 1993).

O NLNM (*New Low Noise Model*) é um modelo de espectro de ruído de fundo obtido em condições com níveis de ruído muito baixos, sendo improvável de ser duplicado por uma única estação. O NHNM (*New High Noise Model*) foi obtido a partir das mesmas estações, mas na presença de ruído sísmico elevado, sendo por isso possível encontrar estações com níveis de ruído mais elevados ou que

possuam períodos de tempos em que podem ser afetadas por fenômenos que elevem os níveis de ruído para além dos estabelecidos por este modelo.

Assim, estes dois modelos não foram obtidos recorrendo às estações com níveis de ruído mais baixos e elevados do planeta, mas a partir de dados representativos das estações em períodos de baixo e elevado ruído. Desta forma, é possível a avaliação do desempenho de estações já instaladas e a identificação de locais adequados para a montagem de novas estações.

No decorrer deste trabalho, a análise de ruído seguiu a técnica proposta por McNamara e Buland (2004), tendo como referência os dois modelos de ruído propostos por Peterson (1993).

4.4. Caracterização de eventos em gráficos PDF

O pacote de *software* SEISAN – *Earthquake Analysis Software* (Havskov e Ottemöller, 1999) é um conjunto de programas de análise de sinais sísmicos, o qual possibilita obter informação relacionada com os parâmetros de fonte sísmica. Este é utilizado pelo CIVISA na análise de rotina de eventos sísmicos e catalogação dos mesmos em base de dados.

O programa incluído no SEISAN para criação de PDF engloba dois códigos: CONNOI e EVANOI. O primeiro, CONNOI, lê as formas de onda existentes numa base de dados contínua e gera valores de PSD por classe de frequência, de acordo com o método de McNamara e Buland (2004), para cada segmento de hora. Estes valores são guardados num ficheiro que é posteriormente lido pelo segundo programa, o EVANOI, que estima os valores de PDF. Com este segundo programa são ainda gerados ficheiros com os valores de moda e os ficheiros utilizados na criação dos gráficos.

Os gráficos finais, para além dos dados de PDF, possuem as duas curvas referentes aos modelos de Peterson (1993), o NLNM e NHNM, e ainda os valores de moda, traduzindo assim os valores com maior representação (figura 4.5).

Conforme referido, a análise de PDF permite obter várias informações sobre o desempenho de dada estação. Na figura 4.5, a título de exemplo, são

identificados diversos sinais registados pelo sistema, nomeadamente dois tipos de sinais indicativos do estado de funcionamento da estação. O primeiro encontra-se associado à recentragem automática das massas do sismómetro, apresentando potências entre os -120 e -110 dB. Tal fenómeno é, no entanto, identificado com uma baixa probabilidade de ocorrência (até 1%). Desta forma, um aumento na frequência resultante deste processo seria facilmente identificado, podendo indicar alguma anomalia no funcionamento da estação.

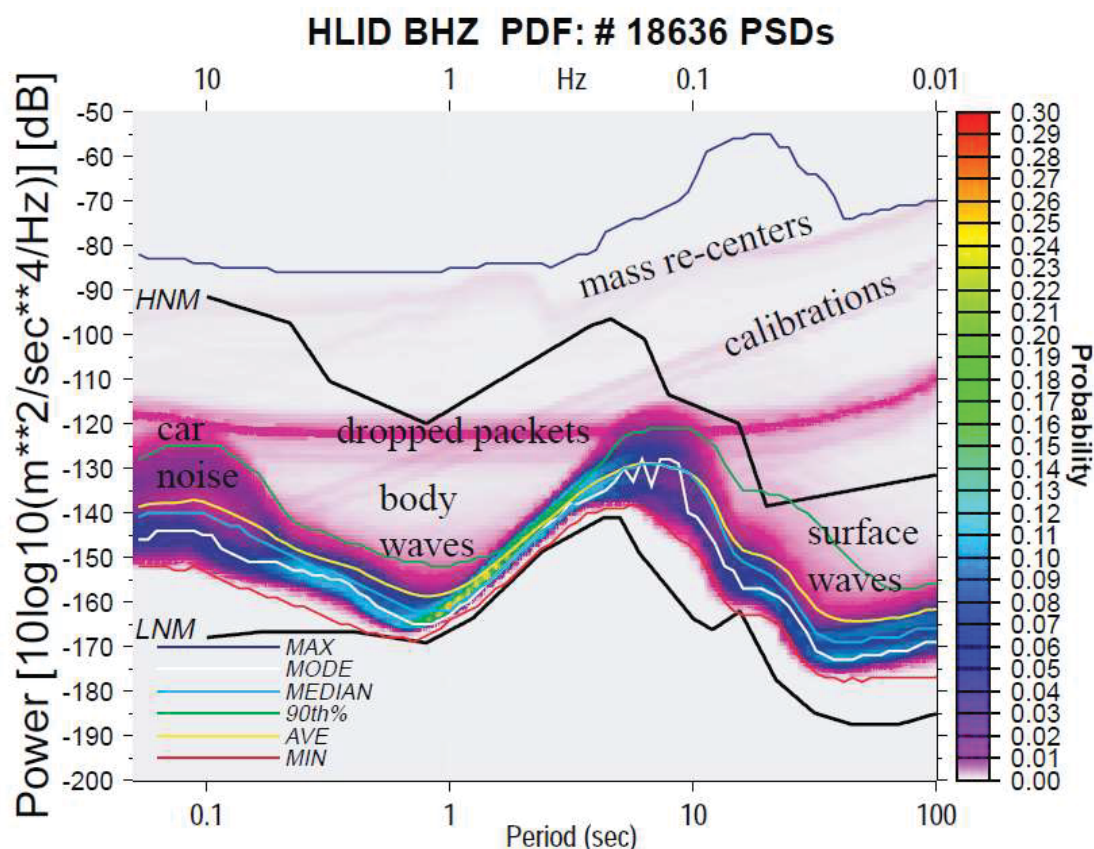


Figura 4.5 – Exemplo de PDF onde são demonstrados os efeitos de certos eventos (McNamara e Buland, 2004).

O segundo tipo de sinal indicativo do desempenho da estação está relacionado com a perda de pacotes de dados. Esta perda é identificada como um sinal de elevada potência, visível a partir dos 5 s entre -120 e -90 dB tendo, no entanto, probabilidade de ocorrência ligeiramente superior à recentragem de massas (1-2%). Apesar disto, apenas para períodos superiores a 10 s este ultrapassa o NHNM. Neste caso concreto, tal facto está relacionado com a telemetria da

estação, que é realizada via satélite; quando esta sofre uma perda de pacotes de dados, estes são substituídos por zeros.

Em termos de ruído sísmico, a estação representada na figura 4.5 apresenta dois picos de energia, sendo o primeiro a baixo período (inferior a 0,1 s), identificado como ruído gerado por tráfego rodoviário e com uma probabilidade de ocorrência inferior ao ruído de fundo. Já para períodos de cerca de 8 s, é visível um pico associado ao ruído oceânico secundário, sendo que o nível de ruído neste período aproxima-se do NHNM. São ainda identificadas as zonas do gráfico referentes às ondas superficiais e de volume, por volta dos 30 s e 1 s, respetivamente.

5. SELEÇÃO DE LOCAIS PARA A INSTALAÇÃO DE ESTAÇÕES SÍSMICAS

5.1. Aspetos condicionantes à seleção de locais de estudo para a instalação de estações sísmicas

A seleção de locais para a instalação de sensores sísmicos revela-se um importante passo na definição de uma rede de estudo. A qualidade do registo sísmico está limitada pelas características do sinal e do ruído presentes no local de amostragem, de tal forma que muitos dos benefícios associados a equipamentos modernos e mais sensíveis, podem ser anulados pelas características dos locais em que estes são instalados. Assim, dado o custo de aquisição dos mesmos, é do interesse da instituição responsável pelo equipamento reunir o máximo de condições favoráveis aos mesmos, de forma a maximizar o aproveitamento de todas as potencialidades dos equipamentos.

O estudo dos locais previamente selecionados permite, através da comparação dos resultados de estudos de ruído, uma tomada de decisão informada sobre os melhores locais, tendo em conta as características dos mesmos, a disposição da rede de monitorização e os objetivos da entidade.

A seleção de possíveis locais para a instalação de sensores deve ser feita tendo em conta diversos fatores, sendo que a importância de cada um destes está dependente da região em estudo e dos objetivos da entidade, pelo que deverão ser assumidos alguns compromissos. Esta seleção procura reduzir ao máximo o número de possíveis locais para a instalação, de forma que o número de locais em que serão realizados estudos de ruído seja reduzido, dadas as limitações temporais e logísticas que este estudo apresenta.

O primeiro destes fatores está relacionado com a zona sísmica em que se insere o local. Quando o principal objetivo de uma rede sísmica é a monitorização da sismicidade a nível regional e a prestação de informação às autoridades de proteção civil, importa que a estação sísmica seja instalada em local que permita a deteção de eventos sísmicos suscetíveis de afetar populações. Desta forma, nesse ponto são utilizados dados sísmicos e socioeconómicos de forma a

identificar áreas gerais em que a monitorização seja pertinente. No caso do arquipélago dos Açores, este aspeto é facilitado pela reduzida área ocupada pelas ilhas e pela distância entre estas. Como tal, este ponto está dependente dos objetivos estabelecidos para a montagem do novo sensor, procurando que a cobertura deste seja o mais eficiente possível, isto é, instalar a estação sísmica numa zona em que se consiga cobrir o maior número possível de zonas em que a monitorização seja essencial.

Outro aspeto importante é a topografia do local. Aqui, pretende-se que locais em que existam grandes acidentes geológicos, como escarpas, montanhas ou rios sejam evitados, uma vez que estes podem afetar o sinal sísmico, bem como evitar locais em que seja propício a existência de grandes variações térmicas, vento, ou descargas elétricas que possam comprometer o equipamento instalado ou a qualidade dos dados.

A topografia pode, também, comprometer o acesso à estação. Tipicamente as estações sísmicas são colocadas em locais afastados de atividades humanas e/ou estradas, de forma a minimizar os níveis de ruído. Como tal, a tendência é instalar as estações em locais mais remotos, não acessíveis através de estradas públicas, a fim de se minimizar os níveis de ruído e as possibilidades de roubo ou vandalismo. No entanto, é necessário que haja um compromisso entre isolamento e acessibilidade à estação. Há que garantir que a estação recebe a manutenção adequada e para tal, o acesso a esta tem de ser viável durante todo o ano, caso contrário, os tempos entre reparações podem ser excessivamente longos, especialmente durante o Inverno. Este aspeto é particularmente importante quando a estação é alimentada por painéis solares e/ou baterias, pois durante o período do Inverno, em que os acessos podem tornar-se intransitáveis, a radiação solar pode não ser suficiente para restabelecer a carga das baterias durante o dia.

Por fim, a topografia do terreno pode também condicionar as transmissões de dados. Considerando que as estações sísmicas são normalmente instaladas afastadas do meio urbano, as comunicações são, normalmente, efetuadas via rádio. Como tal, há que considerar a banda de rádio utilizada e a forma como as comunicações nessa banda são afetadas pela topografia do terreno.

A litologia do local onde as estações sísmicas são instaladas afeta não só a qualidade dos sinais sísmicos registados, bem como os níveis de ruído registados pela estação. No geral, é aceite que um sensor sísmico instalado em solos constituídos por rocha não coerente e/ou com baixa rigidez está sujeito a níveis de ruído superiores. Desta forma, a preferência recai sobre locais que apresentem material mais coeso. No entanto, em locais como os Açores, em que a presença de vulcões associados a intensa atividade explosiva geram espessos depósitos de material mais friável que cobrem grande parte da superfície, tal nem sempre é possível. Assim, o estudo de ruído sísmico pode ajudar a verificar as características do local/solo, de forma a garantir que o que parece ser rocha coerente na realidade não se trate de línguas lávicas, diques ou grandes blocos enterrados em material não consolidado.

Por fim, há que considerar a influência dos abrigos sísmicos. Uma vez que a construção destes afeta diretamente a qualidade dos dados, estes devem ser pensados de acordo com o tipo de sensores a ser instalados, bem como as condições do local.

Dadas as características das ondas de ruído, os níveis de ruído tendem a decair com o aumento da profundidade, o que não se verifica com as ondas sísmicas propriamente ditas. Assim, é natural uma melhoria dos registos quando as infraestruturas de acondicionamento das estações são efetuadas tendo em consideração este aspeto, construindo-se para o efeito fossos suficientemente profundos para atenuar os níveis de ruído. Desta forma, efeitos como o do vento e outras fontes produtoras de ruídos de elevadas frequências serão minimizados ou até mesmo suprimidos.

Todos estes pontos devem ser avaliados quando o objetivo é a instalação de uma nova estação sísmica. No entanto, quando já está estabelecida uma rede de monitorização, existe a opção de se atualizar o equipamento de monitorização existente. Esta última opção tende a agilizar todo o processo de instalação dos sensores sísmicos. Neste caso procura-se identificar as estações sísmicas que serão mais beneficiadas pela atualização do equipamento, procurando-se desta forma melhorar a eficiência da rede de monitorização através da substituição do equipamento mais desatualizado ou que não corresponda às necessidades da rede.

As vantagens desta opção passam pelos custos mais reduzidos em comparação à instalação de raiz de uma nova estação, visto que a maior parte dos aspetos condicionantes à instalação anteriormente mencionados já são conhecidos. No entanto, continua a ser necessário verificar que o local e o abrigo sísmico são adequados a receber equipamentos com maiores potencialidades, sendo por isso necessário realizar um estudo de ruído no local de instalação.

5.2. Abrigos sísmicos

No caso de ser necessário a construção de uma cave sísmica, esta deve ser pensada de acordo com as condições do local, os materiais disponíveis, bem como a qualidade dos dados desejada.

O desenho e construção dos abrigos, ou caves sísmicas, varia muito conforme a localização, tipo de sensor a instalar, objetivos do estudo, materiais disponíveis, etc. No geral, a construção de caves para albergar sensores sísmicos de banda larga procura minimizar variações de temperatura e distanciar o sensor da superfície de maneira a obter níveis de ruído inferiores.

A figura 5.1 representa um exemplo de uma cave sísmica para um sensor de banda larga. Neste, é possível verificar que o grande ênfase da construção foi minimizar os níveis de ruído induzidos pelo abrigo sísmico, sendo utilizados diversos materiais de forma a reduzir variações térmicas no abrigo, reduzindo a área exposta à ação do vento e as vibrações transmitidas pela estrutura ao sensor. É, pois, um exemplo de abrigo sísmico pensado para sensores de banda larga e que cuja construção exigiu recursos temporais, monetários, materiais e humanos consideráveis. No entanto, poderão ter que ser assumidos alguns compromissos na construção dos abrigos sísmicos, pelo que deverão ser considerados alguns aspetos principais neste passo.

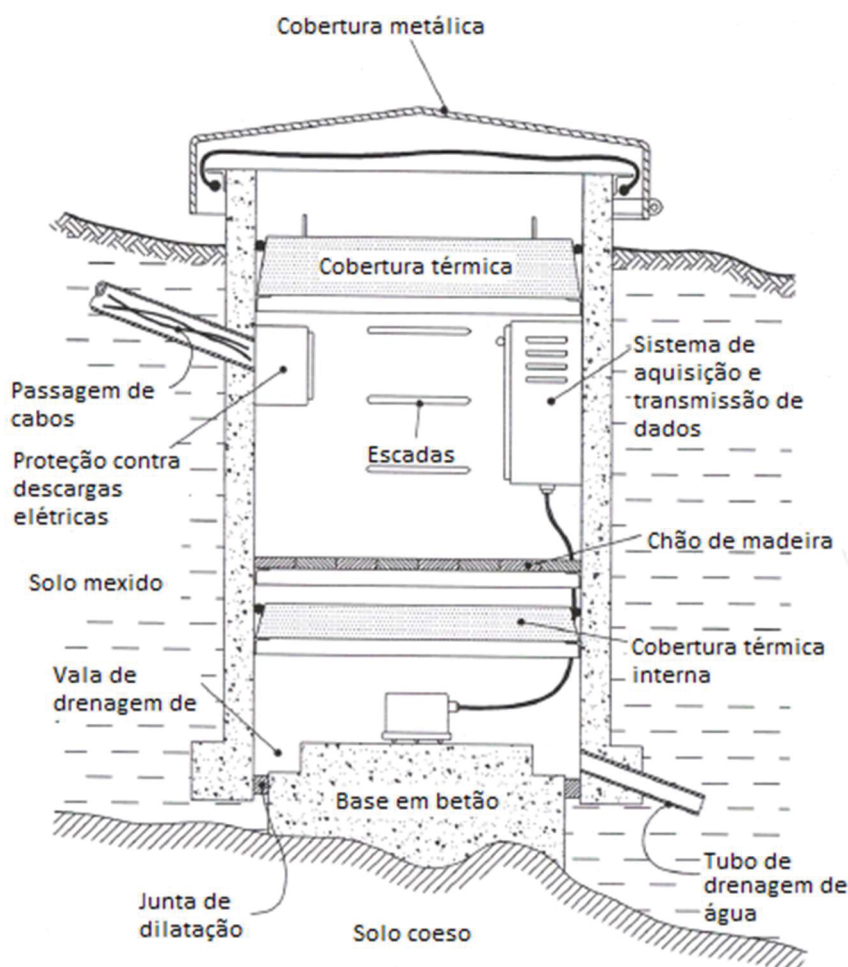


Figura 5.1 – Exemplo de abrigo sísmico para um sensor de banda larga (adaptado de Trnkoczy *et al.*, 2012).

Conforme referido anteriormente, a litologia do local deverá ser constituída por rocha coesa a pouca profundidade, de forma a que o sensor possa estar em contacto direto com esta. A principal razão por esta preferência prende-se com o facto de camadas de rocha coesa serem menos propensas a causar ruídos de baixa frequência resultantes de variações de temperatura, pressão ou fenómenos locais, capazes de provocar deslocamentos. Para além disso, camadas de material pouco coesos são capazes de afetar os sinais sísmicos devido a efeitos de *scattering* (Havskov e Ottemöller, 2010).

Tipicamente, os sensores são instalados alguns metros abaixo do nível do solo, o que permite que ruídos locais sofram atenuação com a profundidade, podendo mesmo ser completamente dissipados. Ademais, a instalação do sensor em profundidade permite que este esteja exposto a temperaturas mais estáveis,

dada a maior estabilidade térmica nessas profundidades. A profundidade varia conforme os objetivos da instalação, tipo de sensor, entre outros. No entanto, bastam alguns metros (cerca de 5 m) para verificar uma melhoria significativa. A figura 5.2 mostra os valores de PSD relativos a um sensor instalado à superfície. Os restantes sensores foram instalados no mesmo local a profundidades de 0, 4,3, 89 e 152 m abaixo da superfície. Os valores de PSD relativos foram calculados para períodos de 30, 100 e 1000 s, utilizando os dados das componentes horizontais da estação. Com isto, é possível observar a rápida atenuação do ruído nos primeiros 4 m, sendo que à medida que a profundidade aumenta a variação de ruído diminui, de tal forma que entre os 89 e 152 m as variações são mínimas (Trnkoczy *et al.*, 2012).

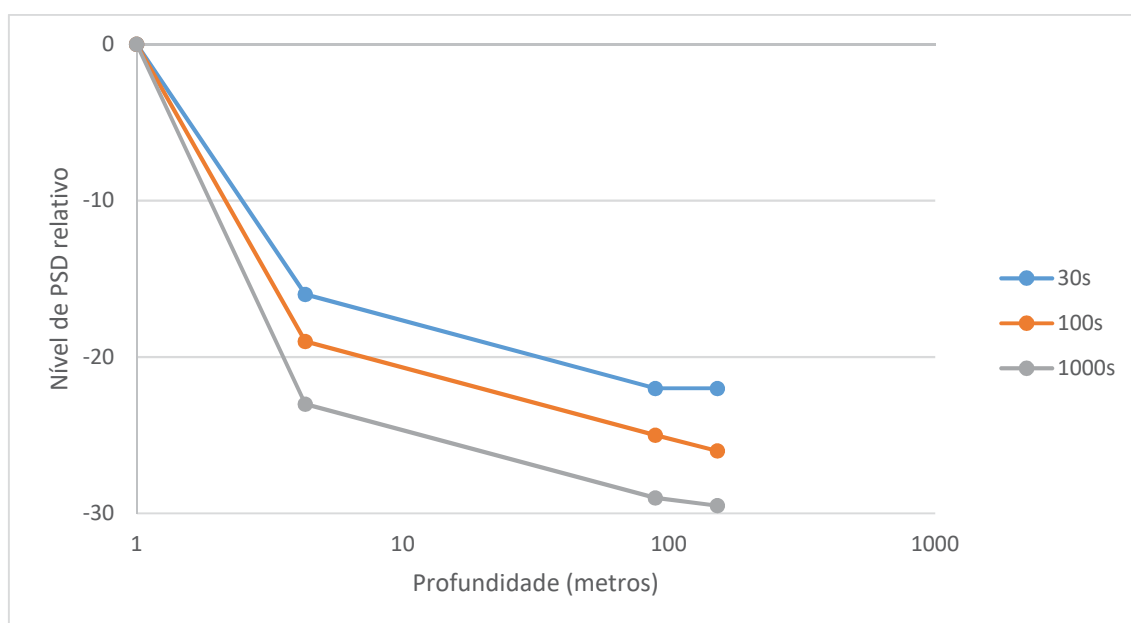


Figura 5.2 – Níveis de PSD relativos ao sensor instalado à superfície para os períodos selecionados, referente à componente horizontal das estações. As profundidades foram 0, 4,3, 89 e 152 m (adaptado de Trnkoczy *et al.*, 2012).

Outro aspeto a ter em conta prende-se com a área exposta à superfície do abrigo, que deverá ser a menor possível, minimizando desta forma a ação do vento e a atenuando os ruídos causados pelo vento e por variações de temperatura. A utilização de tintas de cor clara no exterior do abrigo também contribui para a redução da amplitude térmica no interior da deste.

Por fim, a base em betão sobre a qual o sensor é instalado em condições ideais deve ser desacoplada do abrigo sísmico, de forma a que ruídos gerados por variações térmicas da cave e pela ação que o vento possa causar sobre a cave não sejam diretamente transmitidos pela estrutura do edifício ao sensor sísmico. Apesar disso, este aspeto é considerado por alguns como pouco crítico, sendo que tal função do abrigo sísmico pode criar pontos de entrada de água, pondo em causa o equipamento presente no abrigo, pelo que a preferência passa pela estanquidade da cave sísmica (*Broadband Vault Construction*).

Outros aspetos, mais gerais, a ter em conta prendem-se com a entrada de pequenos animais, pelo que a entrada da cave deve ser suficientemente robusta e estanque de forma a prevenir tais situações.

5.3. Seleção dos locais de estudo

O objetivo inicial deste estudo passava pela identificação de locais aptos à instalação de sensores de banda larga na ilha de S. Miguel. Para tal, procurou-se identificar zonas onde estes sensores fossem mais úteis, tendo em conta a configuração atual da rede, sendo que, posteriormente seria verificada a sua adequabilidade. Desta forma, procuraram-se locais que cumprissem o maior número de requisitos identificados anteriormente.

O primeiro local identificado situa-se no extremo ocidental da ilha. A escolha desta zona prendeu-se sobretudo com as características dos sensores presentes nessa zona, visto que na zona todas as estações sísmicas aqui instaladas estão equipadas com sensores de apenas uma componente vertical (SET4, SET2, PFET, PSAN, FAC, CML) (figura 5.3), o que dificulta a marcação das ondas S, uma vez que estas são mais visíveis nas componentes horizontais (dado que são ondas transversais). Para além disso, por não possuírem ficheiros de resposta e por apresentarem uma só componente, não é possível o cálculo das magnitudes locais (ML) dos eventos sísmicos. Desta forma, a instalação de um sensor sísmico nesta zona iria melhorar a capacidade da rede, uma vez que permitiria o cálculo de magnitudes em eventos de baixa magnitude com epicentro na zona das Sete Cidades ou Fossa Hirondelle. A análise de eventos de

magnitude muito baixa, com epicentro registado em qualquer uma das duas zonas sismogénicas referidas anteriormente, pode ficar comprometida uma vez que, fruto da disposição atual da rede de monitorização sísmica, pode não ser possível calcular as respetivas magnitudes, pois com a dissipação da energia dos eventos, estes não são registados nas estações de três componentes mais próximas, localizadas na parte central da ilha.

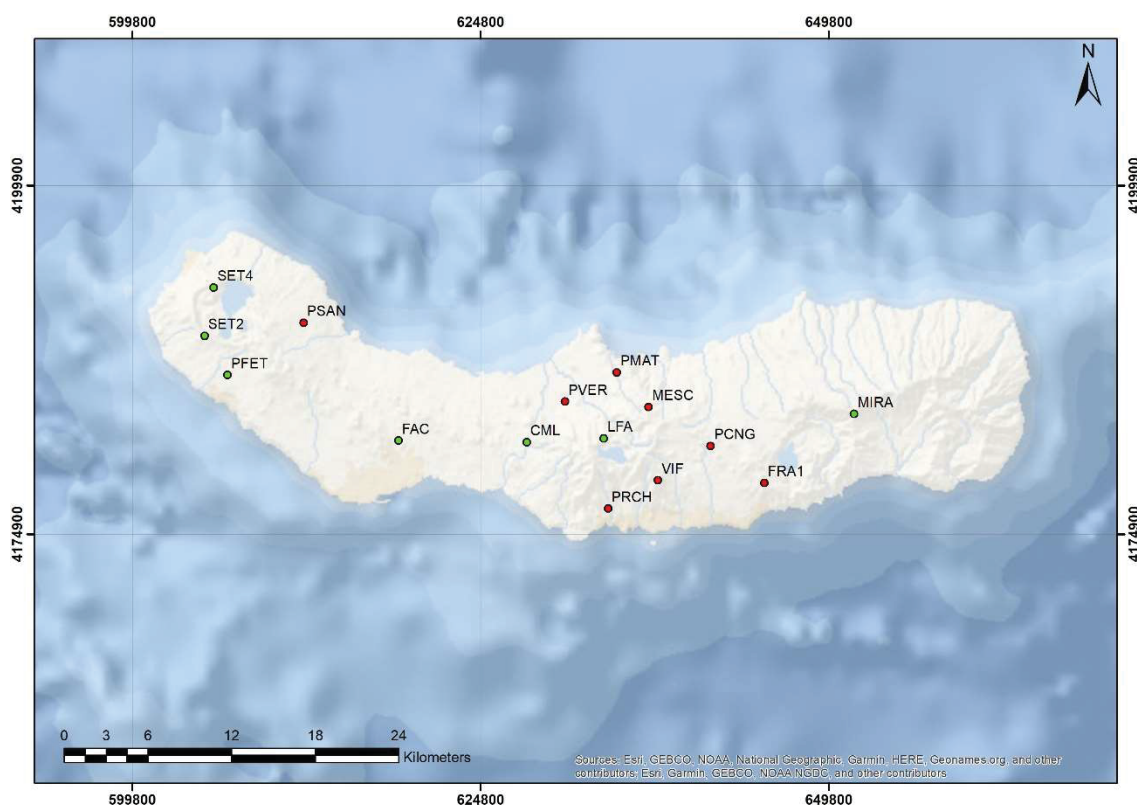


Figura 5.3 – Localização das estações do CIVISA na ilha de S. Miguel. As estações de três componentes estão representadas a vermelho, enquanto que as de uma só componente estão representadas a verde. Mapa apresentado com coordenadas no sistema UTM, datum WGS84 zona 26S.

Outra região que beneficiaria da instalação de um sensor de banda larga corresponde à zona do Vulcão do Fogo. Apesar do Vulcão do Fogo possuir uma cobertura bastante densa, em resposta à elevada atividade deste sistema, os sensores utilizados são todos de curto período (1 Hz). Atendendo ao facto de serem registados eventos de baixa frequência (<2 Hz) neste local, poderia ser benéfico a utilização de um sensor com sensibilidade a frequências mais baixas para fins de deteção destes eventos e para futuros estudos sobre os mesmos.

Por fim, considerou-se que a zona oriental de ilha beneficiaria da instalação de uma estação de banda larga, pois à semelhança da região das Sete Cidades, esta zona apenas possui uma estação de uma componente (MIRA) pelo que a adição de um novo sensor permitiria obter melhores cálculos hipocentrais para eventos localizados na zona das Furnas, Fossa da Povoação e Falha Glória.

6. CAMPANHAS DE CAMPO

Nesta secção pretende-se descrever o processo de aquisição e tratamento de dados, desde a instalação dos sensores nos locais previamente definidos até à justificação das decisões tomadas face às dificuldades encontradas.

Nestas campanhas foram utilizados sensores sísmicos de banda larga *Guralp CMG-3T*, associados a digitalizadores *Guralp DM24S* e um sensor sísmico de banda larga *Streckeisen STS-2* associado a um digitalizador *Kinematics Quanterra Q330*.

Considerando as particularidades dos sensores utilizados, anteriormente expostas, foram tomadas algumas precauções de forma a minimizar os níveis de ruído registados. A particularidade na instalação destes sensores está relacionada com a dificuldade em reduzir o ruído a baixa frequência (0,05 a 0,01 Hz), que afeta sobretudo as componentes horizontais do sismómetro. Como já foi referido, as causas do ruído observado a estas frequências são diversas, podendo estar relacionadas com variações de parâmetros como a temperatura, a pressão barométrica e/ou a existência de vento. Para além destes, a circulação rodoviária nas proximidades da estação, a existência de circulação de ar no local de instalação do sensor ou outros fenómenos capazes de causar deformação do solo, geram ruídos nestas frequências. Como tal, a instalação destes sensores deve ser realizada em material rochoso consolidado e tão profundo quanto possível, de forma a minimizar o ruído registado a baixas frequências.

Assim, antes da implantação dos sensores no campo, foi necessário considerar a proteção dos mesmos. Considerando que, numa primeira fase, os sensores sísmicos serviriam apenas para verificar a adequação dos locais, sendo por isso uma instalação temporária, procurou-se que os sensores ficassem tão protegidos quanto possível, tendo em consideração as restrições temporais e monetárias. Como tal, foi necessário definir as proteções indispensáveis de forma a obter dados representativos de uma instalação permanente. O invólucro dos sensores utilizados é, por definição do fabricante, estanque. No entanto, em instalações que utilizam sensores com respostas a frequência mais baixas, é

necessário a utilização de uma proteção adicional para proteger o sensor de variações de densidade do ar (Forbinger, 2012).

As variações de temperatura geram ruído não só pela deformação do solo, mas também pelas variações a que o sensor é diretamente sujeito e que provocam deformações neste, pelo que se torna fundamental a proteção térmica do mesmo. O principal objetivo é a proteção do sensor das variações de temperatura entre dia e noite e/ou de pontuais, mas rápidas oscilações de temperatura. Idealmente, o sensor não deverá estar exposto a uma variação de temperatura superior a 5° C num período de 24 horas de forma manter a qualidade dos dados (Trnkoczy *et al.*, 2012).

Desta forma, optou-se pela utilização de uma caixa de poliestireno, dadas as propriedades isoladoras do material. Esta proteção foi criada à medida do sensor, de forma a envolvê-lo, mas sem tocar neste, não havendo muito espaço entre o sensor e a proteção (figura 6.1). Este tipo de sensor produz alguma energia térmica durante o seu funcionamento, pelo que a proteção tem igualmente o objetivo de manter a estabilidade térmica do sensor, estratificando o ar dentro da proteção e impedindo a criação de correntes de ar (Havskov e Alguacil, 2004).



Figura 6.1 – Proteção térmica em poliestireno do sensor sísmico em SET2.

Apesar de não ser possível avaliar diretamente a eficácia desta proteção, é possível estimar a eficiência da mesma. Embora o sensor sísmico não possua um termómetro, o digitalizador possui um termómetro interno para monitorizar a temperatura do sistema. A figura 6.2 apresenta a variação da temperatura ao longo de um dia, na estação MESC. Tendo em conta que o digitalizador foi instalado ao nível da superfície e não possui proteção térmica, em oposição ao sensor que foi instalado em profundidade, onde existe maior estabilidade térmica, e protegido termicamente, constata-se que o digitalizador apresenta uma variação térmica de cerca de 2°C ao longo de 24 horas, pelo que permite assumir que a variação térmica do sensor será inferior a 2°C ao longo do dia. Assim, é possível assumir que o sensor se encontra devidamente protegido uma vez que, segundo Trnkoczy *et al.* (2012), a variação de temperatura recomendada para sensores FBA, ao longo de 24 horas, seja inferior a 5°C de forma a utilizar todas as potencialidades de sensores de banda larga.

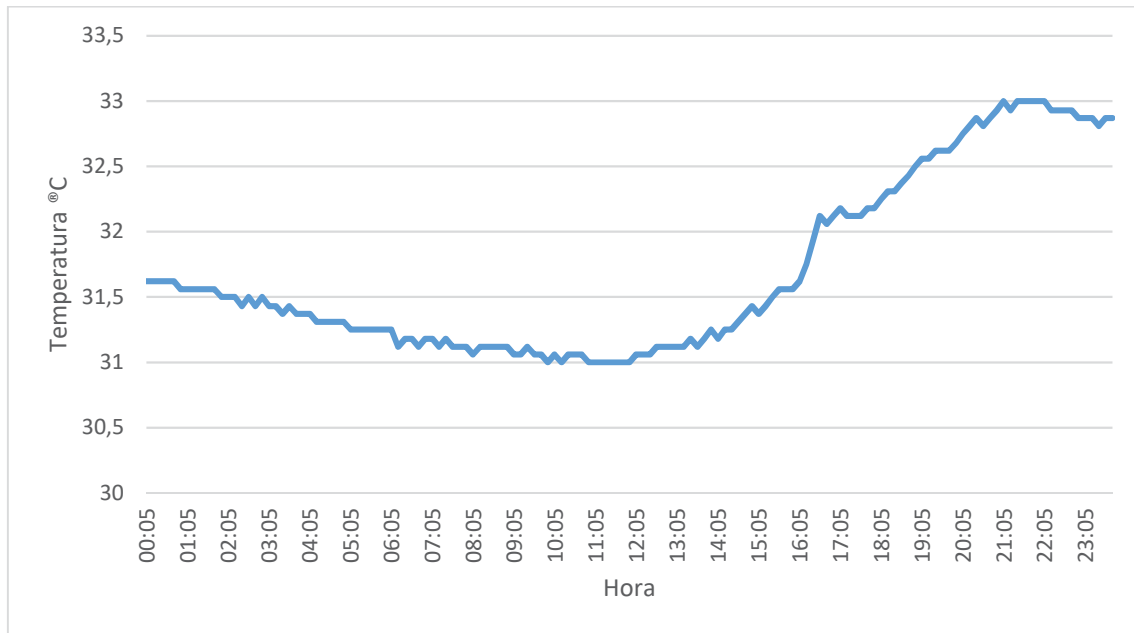


Figura 6.2 – Exemplo de variação de temperatura ao longo de um dia em MESO. O dia selecionado foi o que apresentou maior amplitude térmica.

Todos os sensores foram testados antes da sua instalação no campo. O teste serviu o propósito de confirmar o seu correto funcionamento, bem como dos digitalizadores, do sistema de armazenamento de dados e da antena de GPS. Ainda durante esta fase de testes, os digitalizadores foram programados (Anexo I), definindo-se uma taxa de amostragem de 100 amostras por segundo, de forma a se obter uma boa definição do ruído registado e procurando-se também minimizar aspetos que pudessem interferir com o registo, tais como a recentragem automática das massas que foi desativada. A gravação de dados foi definida apenas para os 3 canais correspondentes às componentes dos sensores e para o canal *State of Health* (SOH), que é utilizado para monitorização do sistema, fornecendo dados sobre a posição das massas dos sensores, temperatura, voltagem e leituras de tempo e de localização do GPS. Tal, permite que apenas a informação importante sobre o funcionamento da estação e os dados das 3 componentes sejam armazenados, poupando desta forma espaço de armazenamento que pode ser utilizado caso a estação tenha de manter-se em registo mais tempo do que o planeado.

6.1. Instalação das estações

A instalação do equipamento seguiu as instruções fornecidas pelo fabricante, pelo que as diferenças na instalação do equipamento devem-se às condições de espaço, energia e construção das caves sísmicas e, no geral, apenas condicionaram a disposição do equipamento.

- SET2

Inicialmente, e conforme discutido anteriormente, procurou proceder-se à instalação de uma estação na parte ocidental da ilha. Desta forma, a preferência recaiu na região das Sete Cidades, tendo sido seleccionada a cave onde se encontra instalada a estação SET2 (figuras 5.3 e 6.3). A escolha da SET2 em detrimento da localização onde se encontra a estação SET4, prendeu-se com o facto de esta última estar localizada na cave de um edifício habitacional, enquanto que a estação SET2 encontra-se num abrigo sísmico construído para o efeito e com painéis solares que garantem a autonomia energética das estações.



Figura 6.3 – Aspeto geral da cave sísmica da estação SET2.

Esta cave, situada na zona das Cumeeiras, inicialmente albergava um tiltímetro, sendo mais tarde substituído por um sensor de curto período de uma só componente. Em termos de instalação, o sensor *Guralp* foi colocado no fundo do fosso existente, que apesar de pouco profundo (cerca de 2 m) fornece algum grau de atenuação de ruído e de estabilização térmica. Uma vez que o objetivo é determinar os níveis de ruído existentes para avaliar a possibilidade de substituir o sensor aqui existente, manteve-se este em funcionamento e a transmitir os dados para o Centro de Aquisição de Dados (CAD) do CIVISA, ficando o sensor de banda larga ao lado deste. Os dados armazenados no digitalizador *Guralp*, eliminando assim possíveis interferências dos sistemas de comunicação (figura 6.4). Ao nível do solo, e ao lado dos sistemas de comunicação e das baterias que garantem o funcionamento dos equipamentos quando os painéis solares não são suficientes, ficou o digitalizador, protegido pela caixa de transporte fornecida pelo fabricante (figura 6.5). Foi tido em consideração o isolamento desta caixa de transporte, de forma a evitar a possível entrada de insetos e de água, visto que no interior da cave, ao nível do solo, encontrava-se alguma água estagnada. Assim, após a caixa ser fechada, todas as aberturas da mesma foram seladas com recurso a silicone.

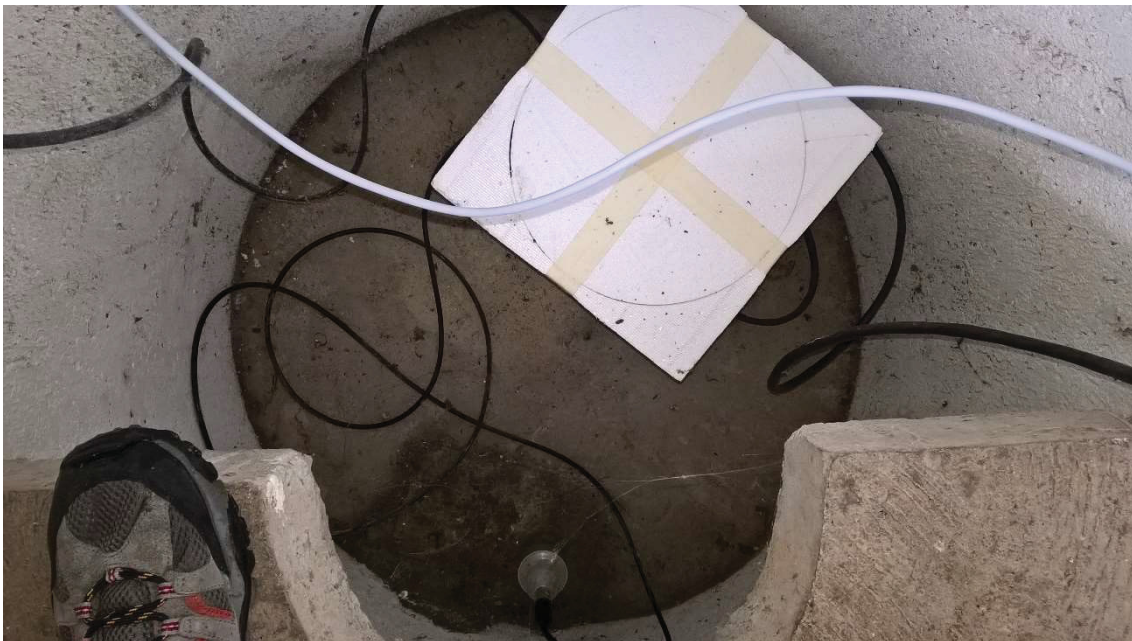


Figura 6.4 – Fosso de SET2. Na parte superior da foto encontra-se o sensor de banda larga dentro da proteção térmica e na parte inferior da foto o sensor de curto período.



Figura 6.5 – Equipamento em SET2. À esquerda o equipamento de aquisição e transmissão de dados do sensor de curto período, ao centro as baterias ligadas aos painéis solares e à direita o digitalizador da estação de banda larga dentro da caixa de transporte.

Em termos de energia, a estação foi ligada às baterias que já se encontravam na cave, sendo tal possível sem sobrecarregar o sistema de fornecimento de energia dada a presença de um segundo painel solar que foi ligado às baterias existentes para compensar o uso de energia extra. Após todas as ligações serem efetuadas, e de se confirmar o correto funcionamento da estação, procedeu-se à calibração e centragem das massas do sensor.

- MESC

Outro local onde se pretendeu instalar um sensor de banda larga é na região central da ilha de S. Miguel. Esta localização serviria, em particular, para a monitorização do Vulcão do Fogo, utilizando as capacidades destes sensores para registar sinais de frequências mais baixas, com ocorrência frequente nesta região.

Foi selecionada para o estudo a cave sísmica da estação MESC, situada na proximidade de Monte Escuro (figuras 5.3 e 6.6). Para tal contribuiu vários fatores, tais como a localização da estação, que é uma das mais isoladas da rede sísmica do CIVISA, e o tipo de construção do abrigo sísmico, que possui o

fosso mais profundo (cerca de 6 m). Dadas estas condicionante é de esperar que os níveis de ruído na cave serão baixos, dada a estabilidade térmica, fruto da profundidade do fosso, e do baixo ruído cultural, fruto da localização da estação. Apesar disto, é necessário verificar os níveis de ruído a frequências mais elevadas, uma vez que, dada a localização da estação, esta pode ser sujeita a condições de vento mais intenso, que podem afetar diretamente o abrigo ou, indiretamente, através da vibração das árvores que se encontram na proximidade do abrigo sísmico.



Figura 6.6 – Aspeto geral do abrigo da estação MESC.

A instalação foi realizada da mesma forma que em SET2, ficando o sensor a registar no fundo do fosso junto com o sensor já aí presente, enquanto que o restante equipamento ficou ao nível do solo. O sensor foi, igualmente, protegido por uma caixa de poliestireno (figura 6.7).



Figura 6.7 – Fosso em MESC. Visível a proteção térmica do sensor de banda larga. O sensor de curto período encontra-se no canto superior direito da base em betão, assinalado a vermelho.

Inicialmente o sensor não ficou ligado às baterias aí existentes, dado que a cave sísmica não possuía painéis solares extra. Foram utilizadas duas baterias extra (Figura 6.8) para as quais o estado de carga foi verificado periodicamente, de forma a verificar o consumo energético da estação, sendo que ao fim de duas semanas de registo as baterias já apresentavam uma considerável baixa de carga baixa. Dado o baixo consumo energético, decidiu-se ligar o sistema ao painel solar e às baterias existentes, utilizando uma bateria extra de forma a compensar a utilização extra de energia. Para tal, contribuiu, também, a época do ano em que se realizou a recolha de dados, uma vez que o elevado número de horas de radiação solar e a posição do sol no horizonte forneceram energia suficiente para o painel solar restabelecer os níveis de carga durante o dia.



Figura 6.8 – Equipamento em MESC, já com as baterias extra ligadas e com o digitalizador dentro da caixa de transporte.

- PFET

A escolha de PFET decorre dos resultados obtidos na cave da estação SET2 não terem sido satisfatórios (ver capítulo seguinte). Assim, procurou-se uma zona próxima e que tivesse as condições necessárias, pelo que selecionou-se a cave sísmica localizada na zona das Feteiras, sendo esta, das caves sísmicas pré-existent, a mais próxima das Sete Cidades (figura 5.3 e 6.9). No entanto, foi necessário estabelecer um compromisso, uma vez que nesta cave sísmica não existe um fosso, estando todo o equipamento ao nível do solo. Tal situação poderia gerar amplitudes térmicas elevadas, para as quais a proteção térmica utilizada poderia não ser suficiente para minimizar os níveis de ruído associados. Favoravelmente, havia a confirmação de que a litologia deste local era composta por materiais coesos, gerando à partida menos ruído que em SET2, local em que se suspeitava da presença de camadas litológicas compostas por materiais não coesos.



Figura 6.9 – Aspeto geral do abrigo da estação sísmica PFET.

A estação instalada em PFET utilizou o equipamento que havia sido instalado em SET2. Aquando da instalação, verificou-se que o abrigo de PFET não possuía entradas suficientemente grandes para passar o cabo da antena de GPS. Sem esta antena não seria possível gravar os dados, pois o sistema não possuiria a informação horária que é adicionada ao registo contínuo. Esta situação implicou um atraso na instalação e trabalho extra para aumentar uma das aberturas existentes de forma a se poder passar o cabo (figura 6.10).



Figura 6.10 – Aumento da abertura pré-existente para passagem do cabo de GPS.

Após a tarefa extra ter sido finalizada, a instalação decorreu de forma semelhante às restantes estações, tendo todo o equipamento ficado ao mesmo nível, uma vez que, como já referido, o abrigo sísmico não possui fosso (figura 6.11).



Figura 6.11 – Equipamento em PFET. Note-se a ausência de fosso, ficando todo o equipamento ao mesmo nível.

Tendo em consideração o baixo consumo energético da estação, optou-se por ligar o sensor às baterias existentes, sendo o painel solar da estação capaz de carregar as baterias durante o período diurno, mantendo ambas as estações em funcionamento.

- Nordeste

Conforme anteriormente exposto, a rede de monitorização sísmica do CIVISA não possui a cobertura ideal na parte oriental da ilha de S. Miguel, pelo é de todo o interesse reforçar a rede nessa região. No entanto, ao contrário das restantes estações utilizadas neste estudo, o CIVISA não possui um abrigo sísmico nesta parte da ilha, pelo que a realização deste estudo nesta parte da ilha serviria para identificar possíveis locais para a construção de um abrigo sísmico permanente, através da caracterização dos níveis de ruído na zona. De modo a garantir que os níveis de ruído não fossem demasiado elevados, procurou-se que a estação fosse instalada num edifício que cumprisse com o número máximo de recomendações discutidas no quinto capítulo. Assim, e após um preliminar levantamento de edifícios capazes de albergar este tipo de ensaio, estabeleceu-se contacto com o Centro Ambiental do Priolo que possui um edifício na zona da Reserva Florestal de Recreio da Cancela do Cinzeiro, na Vila do Nordeste (figura 6.12)

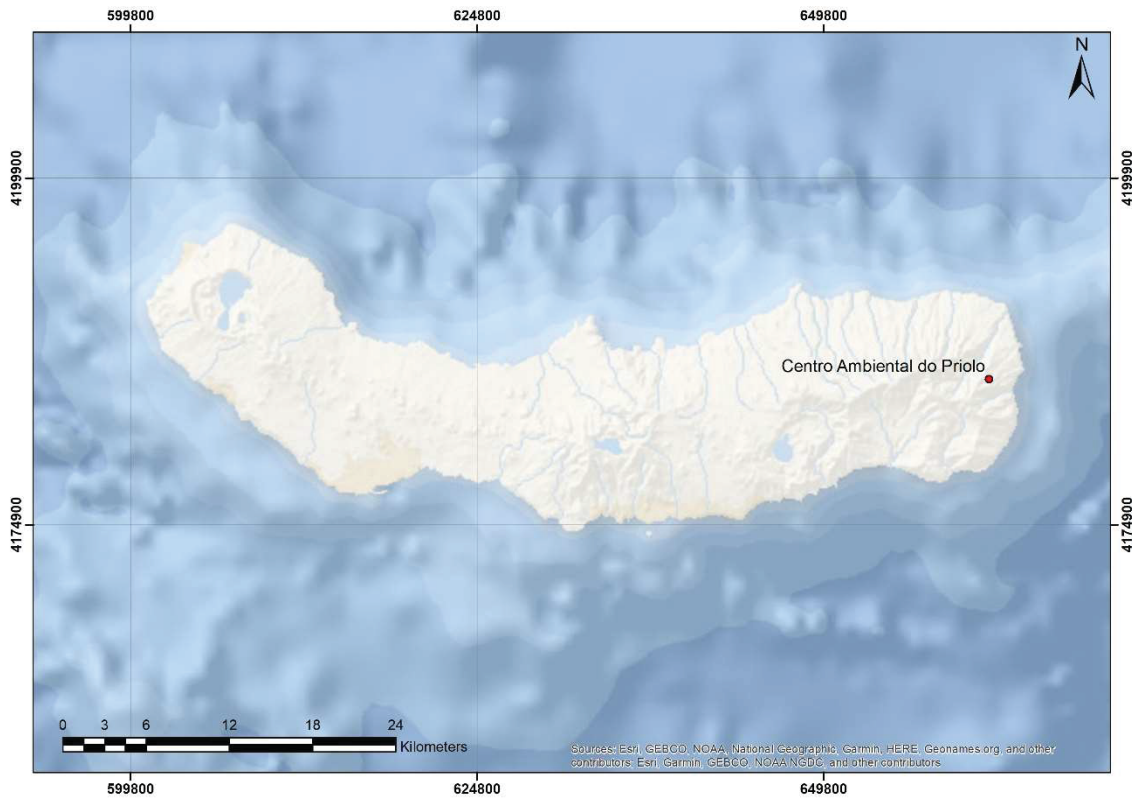


Figura 6.12 – Localização do Centro Ambiental do Priolo a vermelho, na zona da Reserva Florestal de Recreio da Cancela do Cinzeiro. Mapa apresentado com coordenadas no sistema UTM, datum WGS84 zona 26S.

Este edifício, por se encontrar localizado numa zona afastada de centros urbanos e por estar encerrado durante o período de inverno, apresenta condições favoráveis para a caracterização do ruído da zona. Infelizmente, na deslocação ao local verificou-se não ser possível a realização do estudo, uma vez que o edifício estava a ser alvo de obras que induziam níveis elevados de ruído, bem como limitavam a utilização de energia. Para além disso, o local não possuía uma divisão isolada do resto do edifício, nem tinha a possibilidade de passar a antena de GPS da estação para o exterior e fixar a mesma, acrescendo ainda o facto do edifício estar circundado de árvores de grande porte, o que contribuía para níveis de ruído elevados.

6.2. Manutenção e recolha de dados

Durante a análise dos dados para caracterização dos níveis de ruído na ilha de S. Miguel foram elaborados vários gráficos PDF, utilizando períodos temporais diferentes, de forma a identificar o período temporal mínimo para o qual os dados resultantes fossem representativos das condições reais. A partir daqui verificou-se que, para uma taxa de amostragem de 100 amostras por segundo, são necessárias cerca de 2 semanas de dados contínuos para a obtenção de resultados representativos das condições reais.

Assim sendo, procurou-se que todas as estações estivessem instaladas um mínimo de 15 dias, sendo que durante a recolha de dados são verificadas as condições de funcionamento da estação (figura 6.13). Na tabela 6.1 estão resumidas as deslocações às estações, assim como os trabalhos efetuados nas mesmas.



Figura 6.13 – Manutenção e recolha de dados em MESC. É utilizado um computador portátil para ligação ao digitalizador, permitindo assim controlar a estação e recolher os dados.

Tabela 6.1 – Resumo das deslocações e trabalhos efetuados nas estações.

Estação	Dia	Trabalhos efetuados
SET2	6 de junho de 2017	Instalação da estação de banda larga
	21 de junho de 2017	Verificação do estado de funcionamento da estação, calibração do sensor e centragem das massas
	13 de julho de 2017	Verificação do estado de funcionamento da estação, recolha de dados
	24 de agosto de 2017	Desinstalação da estação
MESC	8 de julho de 2017	Instalação da estação de banda larga
	12 de julho de 2017	Verificação do estado de funcionamento da estação, calibração do sensor e centragem das massas, fixação da proteção térmica
PFET	24 de agosto de 2017	Tentativa de instalação da estação de banda larga
	25 de agosto de 2017	Finalização da instalação da estação
	11 de setembro de 2017	Verificação do estado de funcionamento da estação, recolha de dados
Nordeste	15 de janeiro de 2018	Deslocação ao local com o objetivo de averiguar a adequabilidade do mesmo

- SET2

Após a instalação da estação na cave sísmica, a 6 de junho, esta foi deixada a registar durante 15 dias. Findo este período foi efetuada manutenção à estação, com o intuito de se transferir os dados, para realização do estudo de ruído da estação. No entanto, verificou-se que as posições das massas do sensor estavam muito desviadas do centro, a cerca de 70% do seu curso total. A necessidade de centrar as massas advém da estabilização térmica do sensor, que é exposto a grandes diferenças de temperatura durante a sua deslocação para o local e durante a sua instalação. Durante o período de estabilização do sensor, que pode durar vários dias consoante as temperaturas a que é exposto, as massas do sensor deslocam-se. Tal situação impede a utilização dos dados uma vez que, caso as massas não estejam centradas, os dados registados serão afetados, em particular a baixas frequências.

Assim, o sensor foi calibrado e as suas massas centradas, ficando o sensor a registar por um novo período, de forma a obter resultados mais fiáveis. Para além disso, verificou-se também o estado das baterias.

Após 22 dias de registo foi realizada uma nova recolha de dados. Neste período verificou-se que as massas tiveram um deslocamento muito inferior, não ultrapassando os 16% do seu curso, pelo que poderá atribuir-se o deslocamento inicial das massas à estabilização térmica do sensor.

Posteriormente à realização do estudo de ruído a partir dos dados recolhidos, foi decidido remover a estação, sendo esta desinstalada do local a 24 de agosto, de forma a instalar a mesma noutra local.

- MESC

A estação foi instalada no dia 8 de julho. À semelhança da estação instalada em SET2, o sensor ficou no fundo do fosso, enquanto que o restante equipamento ficou à superfície. Devido a este facto, o cabo que ligava o sensor ao digitalizador ingressou pela zona superior da proteção térmica, uma vez que este cabo não possuía comprimento suficiente para entrar pela zona inferior da proteção. Esta situação não é a ideal, uma vez que o cabo estando suspenso por cima do sensor poderia transmitir vibrações diretamente ao sensor, fruto da oscilação do cabo. De forma a minimizar este efeito, o cabo foi preso aos degraus existentes ao longo do fosso e colado à proteção térmica, de forma a impedir que este oscilasse. Importa referir que, após o abrigo sísmico ser fechado são eliminadas as correntes de ar que poderiam gerar tal fenómeno e, dada a profundidade do fosso, este fenómeno apenas ocorreria na parte superior do cabo, não afetando a porção inferior do cabo, próxima do sensor, dado que esta parte se encontra presa à estrutura da cave.

Uma vez que esta estação ficou a funcionar apenas com baterias, sem suporte de um painel solar, foi necessário voltar à estação após 6 dias para verificar o estado das baterias. Tendo em conta a experiência na estação SET2, foi também efetuada a calibração do sensor e centragem das massas deste, uma vez que após este período o sensor já estava estabilizado.

- PFET

A instalação definitiva da estação ocorreu a 25 de agosto. O primeiro deslocamento à estação, após a instalação do sensor, ocorreu após 17 dias de funcionamento, a 11 de setembro. Aqui, verificou-se que o deslocamento das massas tinha sido reduzido (até 30% do curso total). Este aspeto poderá dever-se ao facto de a estação ter ficado em repouso no primeiro dia em que foi colocada no abrigo sísmico, tendo sido ligada apenas no dia seguinte, permitindo desta forma que esta já tivesse algum grau de estabilidade térmica antes de ser colocada em funcionamento. De qualquer forma, neste primeiro deslocamento foi efetuada a calibração do sensor e centragem das massas.

Neste local pretendeu-se identificar qual a influência que uma camada litológica mais coesa possui nos níveis de ruído e verificar a estabilidade térmica do sensor quando instalado ao nível do solo.

6.3. Processamento dos dados

Conforme anteriormente explicado, o método utilizado foi proposto por McNamara e Buland (2004), método este incluído no pacote de *software* SEISAN (Havskov e Ottemöller, 1999).

Apesar de existirem outros pacotes de *software* especialmente dedicados a este tipo de estudo, tal como o PQLX (McNamara e Boaz, 2011), a preferência recaiu no *software* que já é utilizado na rotina do CIVISA, visto que a estrutura das bases de dados, bem como os ficheiros de calibração das estações são, igualmente, elaborados com recurso ao *software* SEISAN.

O primeiro aspeto tido em consideração foi a necessidade da criação de ficheiros de resposta. Estes ficheiros estabelecem a relação entre o deslocamento do solo e os valores que são registados pelo instrumento. Estes ficheiros, para além de serem necessários para o cálculo de vários tipos de magnitudes, são também utilizados na elaboração de gráficos PDF, uma vez que cada estação possui relações diferentes, sendo por isso necessário a criação de um ficheiro de resposta para cada componente de uma estação. Desta forma, foram utilizados os ficheiros de resposta já existentes para as estações permanentes do CIVISA,

e criados novos ficheiros para cada componente das estações de banda larga *Guralp* e *Streckeisen*.

Os ficheiros de resposta foram criados a partir das folhas de calibração fornecidos pelo fabricante, sendo que neste estudo apenas foi necessário indicar os valores do ganho do sensor e o ganho do digitalizador, bem como a taxa de amostragem, frequência natural do sismómetro e taxa de amortecimento. Estes valores são inseridos no código RESP, incluído no pacote de *software* SEISAN (Havskov e Ottemöller, 1999), que por sua vez gera os ficheiros de resposta.

Após a recolha dos dados no campo, estes foram devidamente guardados, procedendo-se a uma visualização dos mesmos, de forma a identificar algum registo anormal antes do tratamento dos dados.

Os dados foram armazenados por estação e por dia, sendo que em cada pasta diária os dados são armazenados por componente. Desta forma, em cada pasta diária encontram-se 3 ficheiros de registo correspondentes a cada componente da estação e um quarto ficheiro correspondente ao ficheiro SOH (figura 6.14).

Name	Size	Type	Modified
2017-07-18	4 items	Folder	Mar 28 2033
2017-07-19	4 items	Folder	Mar 28 2033
4172.HHE.04-0000.mseed	4,8 MB	Program	Jul 20
4172.HHN.04-0000.mseed	4,9 MB	Program	Jul 20
4172.HHZ.04-0000.mseed	4,8 MB	Program	Jul 20
4172.SOH.00-0000.mseed	290,8 kB	Program	Jul 20
2017-07-20	4 items	Folder	Mar 28 2033
2017-07-21	4 items	Folder	Mar 28 2033
2017-07-22	4 items	Folder	Mar 28 2033
2017-07-23	4 items	Folder	Mar 28 2033
2017-07-24	4 items	Folder	Mar 28 2033
"2017-08-03" selected (containing 4 items)	4 items	Folder	Mar 28 2033

Figura 6.14 – Estrutura dos dados obtidos antes da fase de tratamento dos mesmos. Cada pasta diária possui um ficheiro para cada componente da estação, mais um ficheiro SOH.

Devido a limitações do sistema e do programa, é apenas possível o processamento de ficheiros horários pelo que é necessário converter os ficheiros diários em ficheiros horários.

Para facilitar a visualização dos ficheiros, e considerando que 24 horas de registo com três componentes geram 72 ficheiros, optou-se por unir num só ficheiro as três componentes. Desta forma, os ficheiros de registo finais correspondem a uma hora de registo das três componentes da estação.

Esta edição ocorre na pasta de trabalho do programa, sendo para tal necessário editar os nomes dos ficheiros antes de os transferir para esta pasta, uma vez que estes possuem nomes iguais. Após esta edição, os ficheiros são transferidos de forma automática para uma base de dados contínua criada para o efeito. A partir deste momento é possível, de uma forma simples, a visualização e aplicação dos métodos seleccionados para a geração dos gráficos PDF.

7. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

7.1. Resultados e análise - Estações permanentes

Para a caracterização dos níveis de ruído sísmico observados na ilha de S. Miguel, mais concretamente associados à rede sísmica permanente do CIVISA, foram calculados gráficos de PDF a partir dos valores de PSD obtidos ao longo do mês de agosto de 2016 e janeiro de 2017 (gráficos completos no anexo II e III). Para tal, foram utilizados os ficheiros de forma de onda obtidos para estes períodos temporais, para cada componente das estações sísmicas de S. Miguel, que à data se encontravam calibradas (figura 7.1).

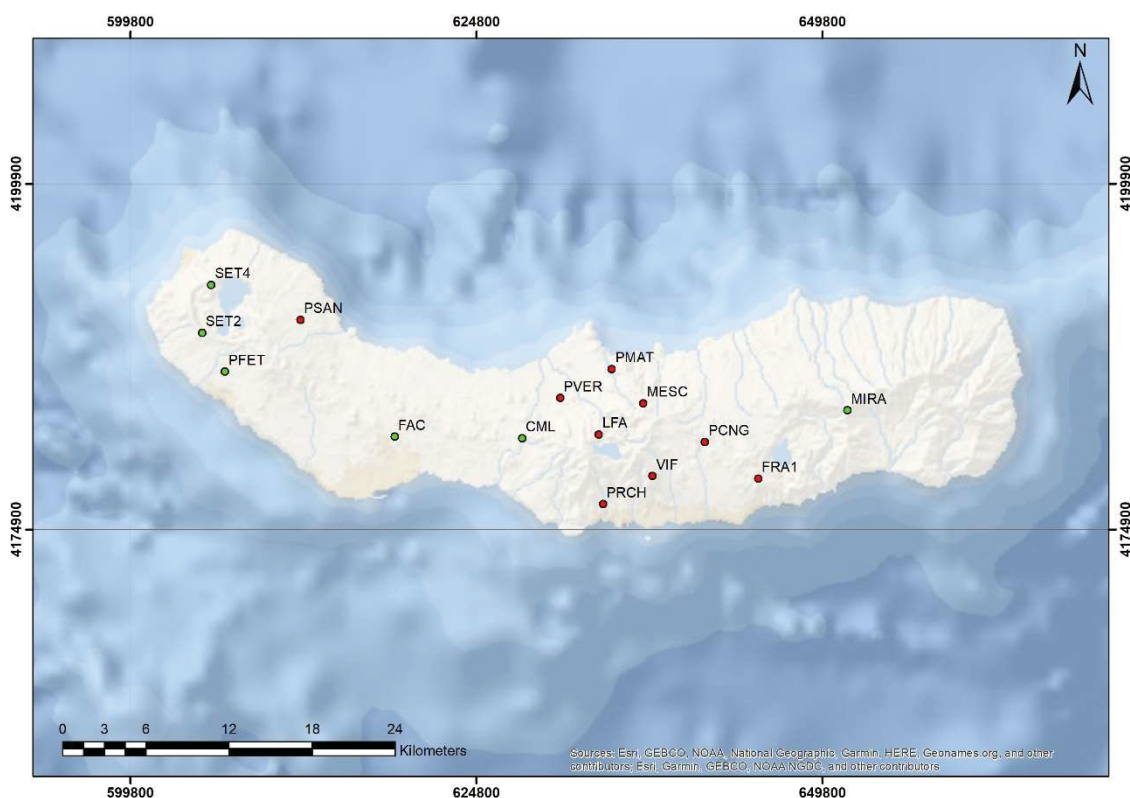


Figura 7.1 - Estações pertencentes à rede sísmica permanente do CIVISA, na ilha de S. Miguel. As estações calibradas estão representadas a vermelho, enquanto que as estações não calibradas estão representadas a verde. Mapa apresentado com coordenadas no sistema UTM, datum WGS84 zona 26S.

O CIVISA possui um sistema de armazenamento contínuo de dados, responsável pela criação de ficheiros diários para cada componente das estações. No entanto, não foi possível a elaboração de PDF na componente E-W da estação PCNG em janeiro de 2017.

Adicionalmente, foi realizada o mesmo tipo de análise à estação sísmica CMLA (tabela 7.1). Esta estação, localizada na ilha de S. Miguel, faz parte da rede IRIS-GSN (*Global Seismographic Network*), que à data, possuía cerca de 150 estações distribuídas pelo planeta, fornecendo dados em tempo real, de livre acesso, sem custo para o utilizador e com grande rigor na qualidade dos dados obtidos. Como tal, esta estação de banda larga pode ser utilizada como referência para fins de avaliação da qualidade do sinal de outras estações instaladas na região.

Tabela 7.1 - Dados da estação CMLA (dados IRIS/GSN).

Nome	CMLA
Região	Chã da Macela
M (UTM, WGS84, zona 26S)	629980
P (UTM, WGS84, zona 26S)	4180622
Altitude	429 m
Sensor (designação 00)	Geotech KS-54000
Sensor (designação 10)	Guralp CMG-3T (até 2017-06-24) Streckeisen STS-5 (após 2017-06-24)

A partir dos dados das componentes verticais referentes ao mês de agosto de 2016 (figuras 7.2 a 7.10) (anexo II) é possível identificar algumas tendências transversais a todas as estações da rede sísmica do CIVISA. Para períodos a partir dos 6-7 s os níveis de ruído são superiores ao NHNM. Tal deve-se ao facto de os sensores em análise serem sensores de curto período, pelo que acima deste período, o ruído eletrónico sobrepõe-se ao ruído de fundo, dada a perda de sensibilidade do sensor para estes períodos. Verifica-se também, que abaixo de 0,1 s, os níveis de ruído tendem a aumentar para a generalidade das estações do CIVISA, o que se deve à interferência eletrónica dos sistemas de comunicação e amplificação. Observa-se também que nestes casos (períodos inferiores a 0,1 s), os valores de moda encontram-se próximos dos valores mínimos registados. Tal sugere que os níveis de ruído nestes intervalos tendem a ser estáveis, sendo por isso a condição normal dessas estações.

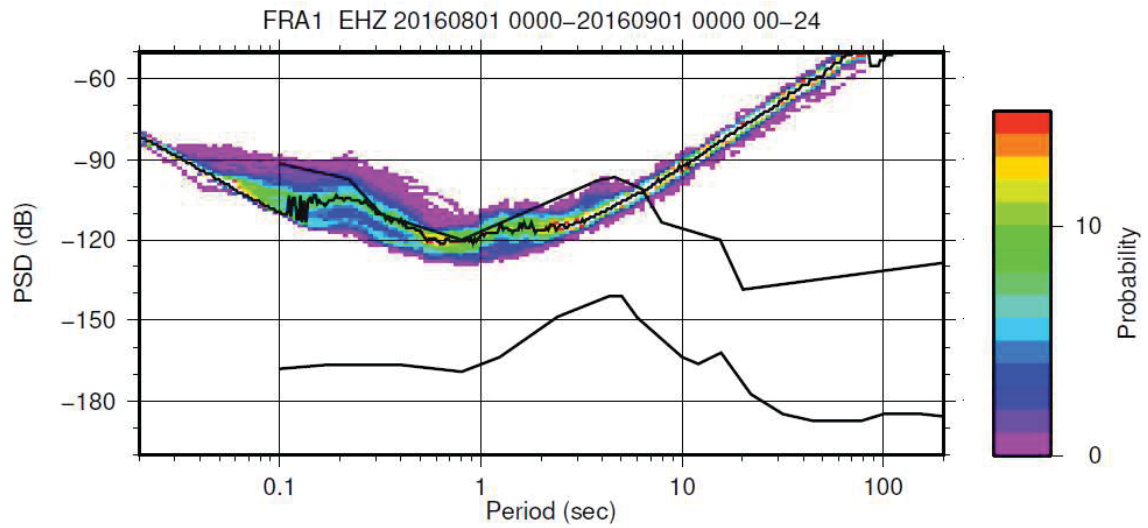


Figura 7.2 – PDF da estação FRA1, componente vertical, com dados referentes a agosto de 2016.

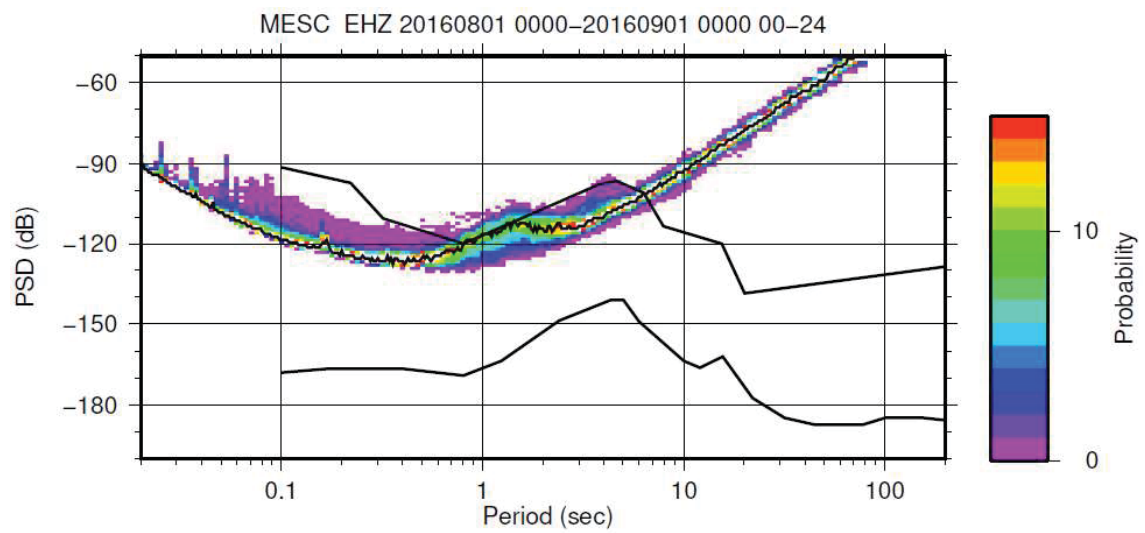


Figura 7.3 - PDF da estação MESC, componente vertical, com dados referentes a agosto de 2016.

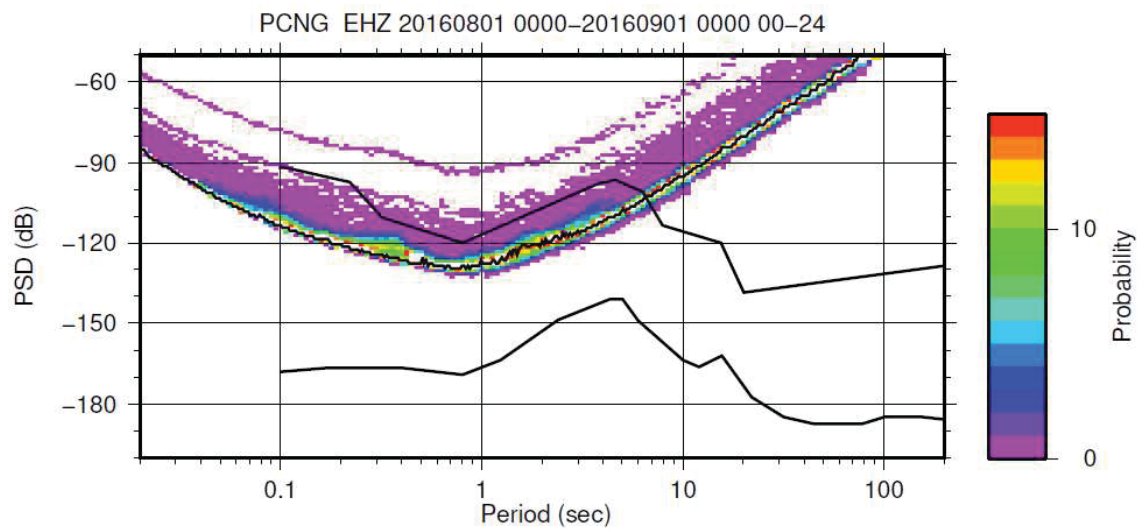


Figura 7.4 - PDF da estação PCNG, componente vertical, com dados referentes a agosto de 2016.

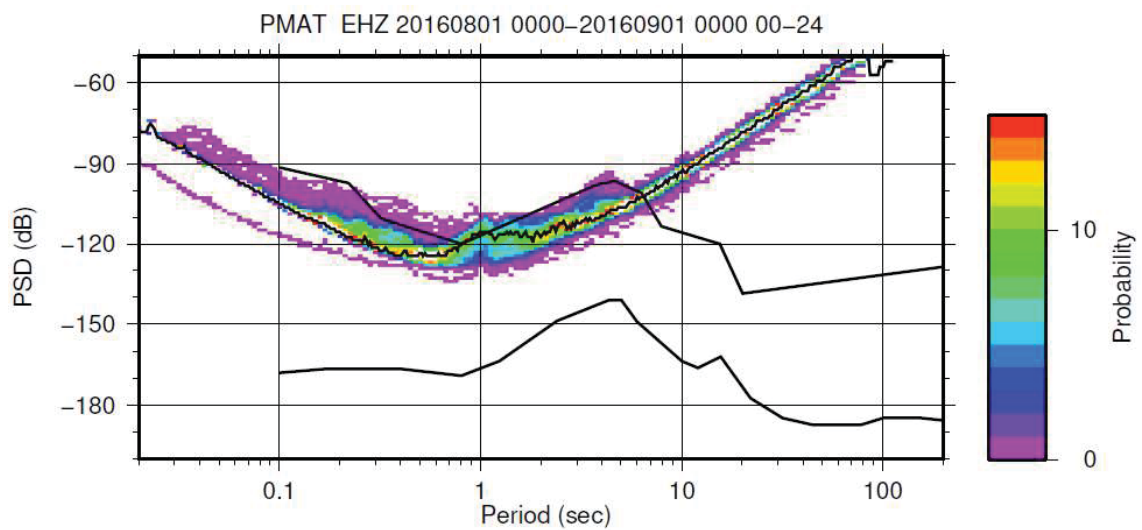


Figura 7.5 - PDF da estação PMAT, componente vertical, com dados referentes a agosto de 2016.

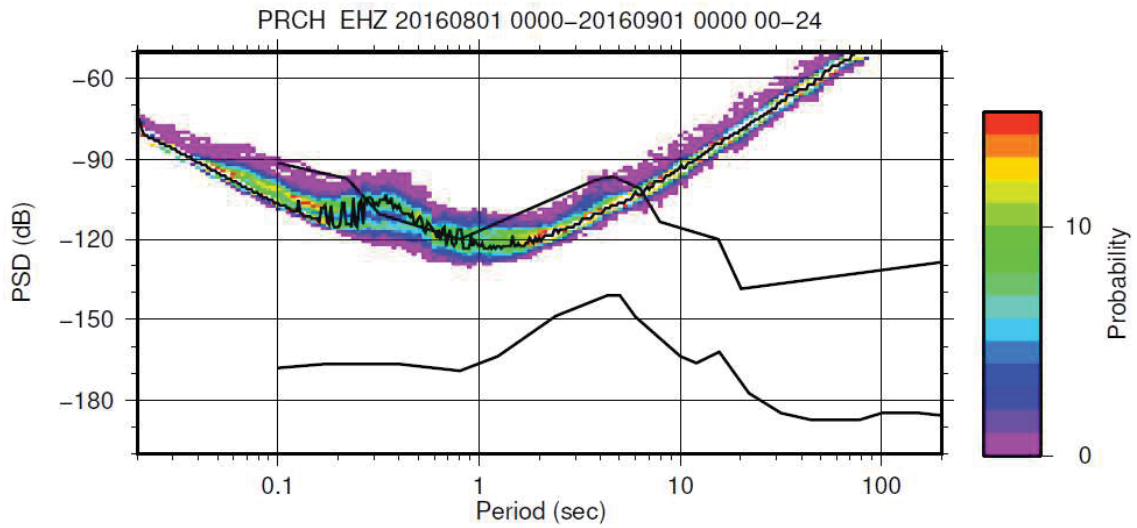


Figura 7.6 - PDF da estação PRCH, componente vertical, com dados referentes a agosto de 2016.

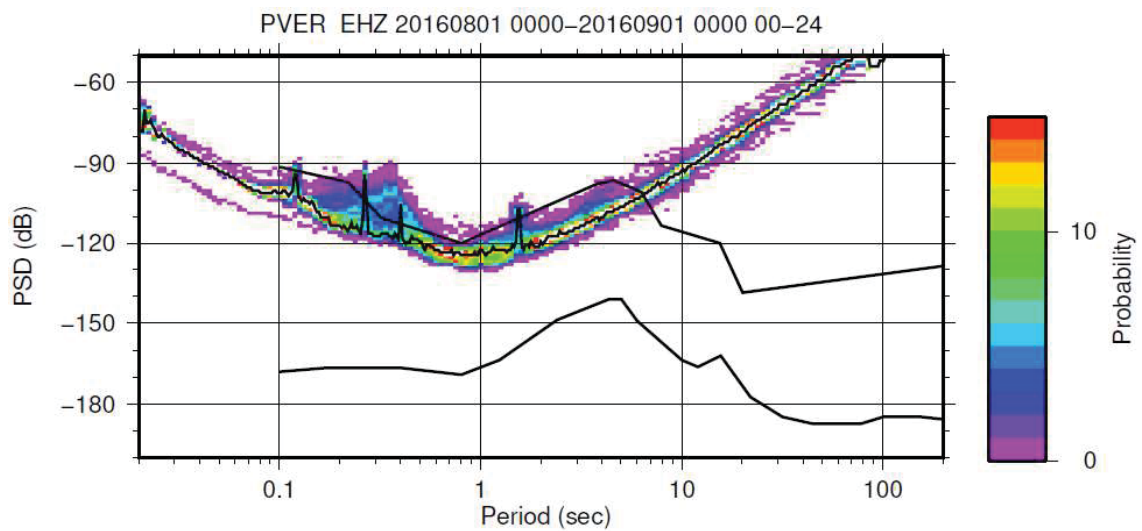


Figura 7.7 - PDF da estação PVER, componente vertical, com dados referentes a agosto de 2016.

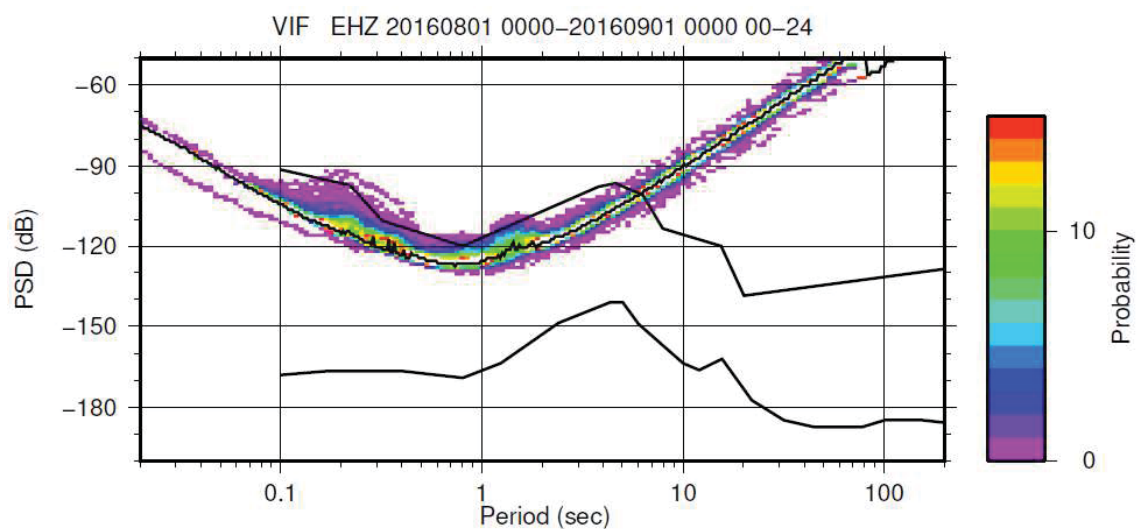


Figura 7.8 - PDF da estação VIF, componente vertical, com dados referentes a agosto de 2016.

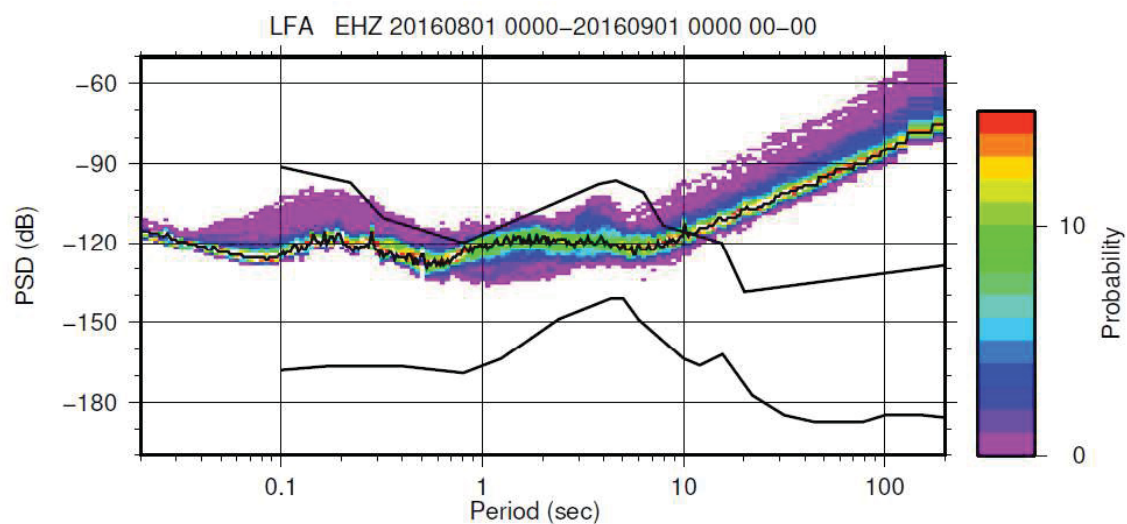


Figura 7.9 - PDF da estação LFA, componente vertical, com dados referentes a agosto de 2016.

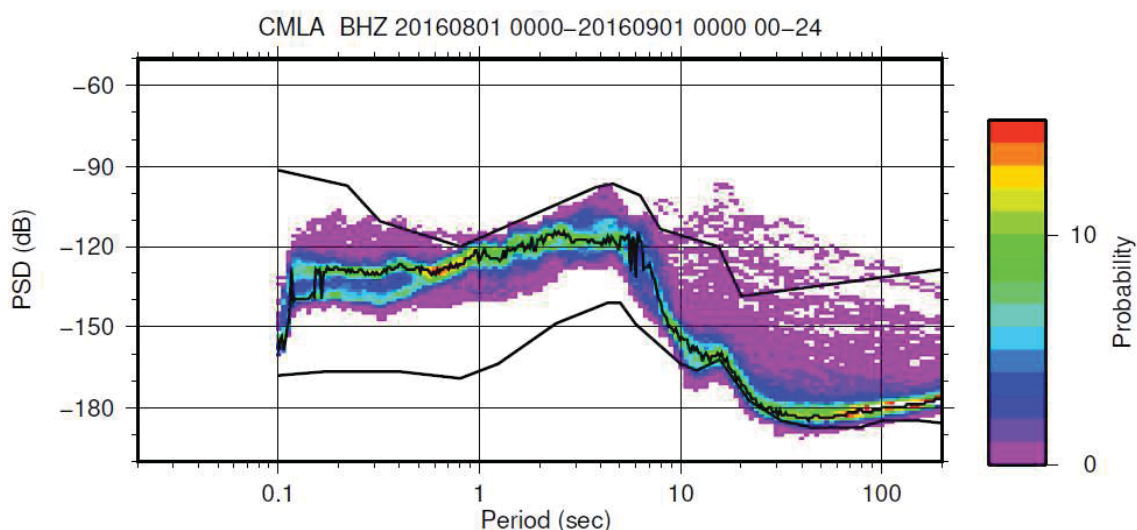


Figura 7.10 - PDF da estação CMLA, componente vertical, com dados referentes a agosto de 2016.

Assim, considera-se que é será abaixo deste período de 6-7 s que estão contidos a maioria dos sinais sísmicos registados na rede permanente do CIVISA. Abaixo deste período, os níveis de ruído das estações da rede são, no geral, elevados. A origem deste ruído, nestas frequências, possui diversas fontes. A intensa atividade agrícola e pecuária que é realizada na região, associada ao tráfego rodoviário e condições climáticas mais adversas, contribuem para os níveis de ruído elevados para períodos abaixo de 1 s. Dadas as características destas fontes de ruído verifica-se, para estes períodos, variações de ruído na rede dependentes do local da estação, das condições ambientais e do período de amostragem. De facto, em certas estações é possível verificar grandes oscilações nas potências registadas, para as frequências mais elevadas, podendo atingir amplitudes de 30 dB.

O ruído gerado por processos oceânicos possui elevada expressão nos níveis de ruído registados na rede do CIVISA. Dada a localização do arquipélago, em pleno Oceano Atlântico Norte, e dada a reduzida dimensão das ilhas, que não permite que as estações sejam instaladas a distâncias suficientemente afastadas da costa de forma a atenuar esse ruído, verifica-se que para períodos acima de 1 s, os níveis de ruído são igualmente elevados, estando as componentes horizontais, em certos casos (MESC e PMAT), acima do NHNM (anexo II). Uma vez que este ruído está fortemente dependente das condições oceânicas em vigor, os níveis de ruído na ilha são relativamente homogêneos,

variando pouco de estação para estação. Tal fonte de ruído explica, igualmente, o registo de ruído mais elevado nas componentes horizontais das estações.

Associado a este ruído oceânico é possível identificar outro pico nos valores de probabilidade de ruído próximo dos 5 s relacionado com o ruído oceânico secundário registado na rede, sendo este pico mais significativo durante o mês de janeiro de 2017 (anexo III). Ainda no mês de agosto, é possível identificar um pico associado ao ruído oceânico primário na estação CMLA, entre os 10 e os 20 s (figura 7.10).

As linhas que traduzem o valor de moda (figura 7.11) fornecem também algumas informações pertinentes, dado que estas representam os valores com maior probabilidade de ocorrência. Com base nestes valores é possível estabelecer comparações entre as várias estações analisadas. No geral, a estação CMLA é a que apresenta níveis de ruído mais baixos, exceto entre 0,3 a 3 s. Dado esta faixa ser dominada por ruído oceânico, os níveis de ruído mantêm-se semelhantes entre as estações de S. Miguel em análise.

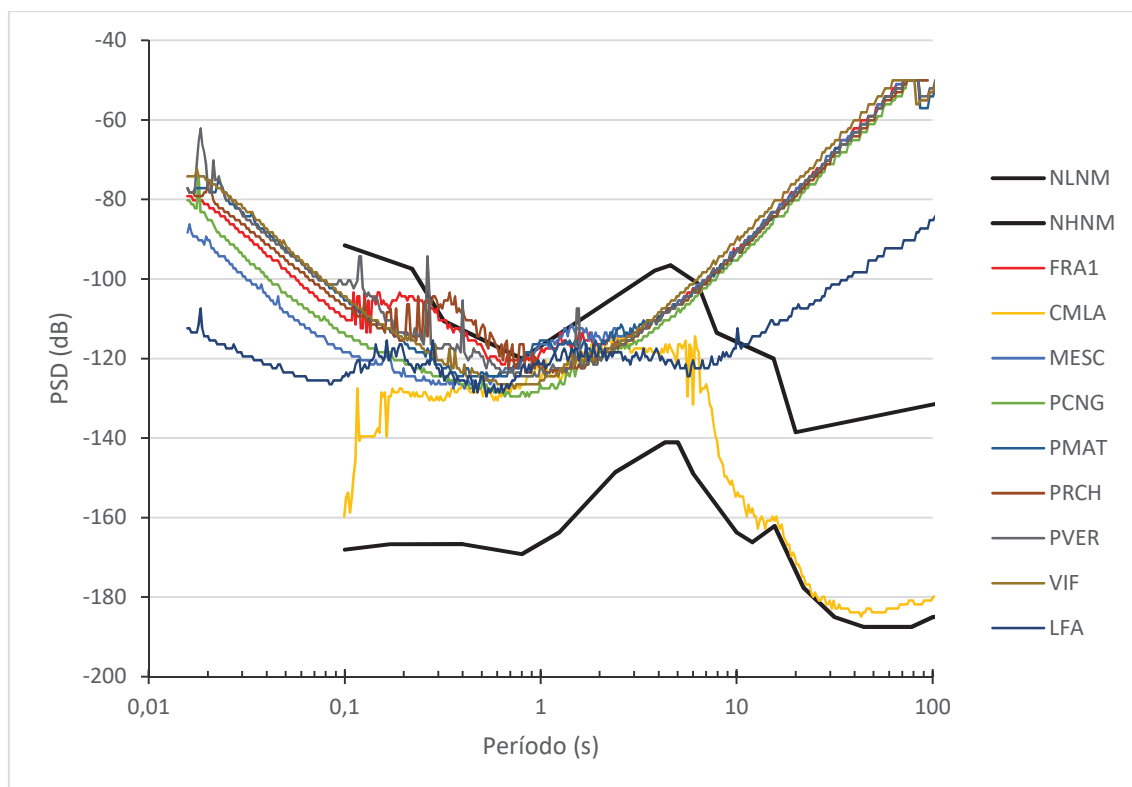


Figura 7.11 - Valores de moda das componentes verticais das diferentes estações de S. Miguel para o mês de agosto de 2016.

Nas estações do CIVISA, as maiores diferenças entre estações ocorrem entre 0,1 e 1 s, podendo atingir os 30 dB de diferença entre as estações menos ruidosas e as mais ruidosas. Para este período, verifica-se que as estações menos ruidosas são MESC, PCNG e LFA, e as mais ruidosas são PVER, PRCH e FRA1. Ainda para este intervalo de períodos, ao comparar as estações da rede do CIVISA com a estação de “referência” CMLA, verifica-se que em relação às estações menos ruidosas do CIVISA, os níveis são semelhantes. No entanto, abaixo de 0,1 s, os níveis de ruído tendem a ser 10 a 20 dB superiores a CMLA.

É possível verificar diferenças nos valores de ruído entre a estação LFA e as restantes estações da rede do CIVISA (figura 7.11) provenientes de o facto de a estação LFA utilizar um sensor diferente das restantes estações e de uma só componente.

7.1.1. Análise da variação diária

De forma a estabelecer a proveniência do ruído para períodos inferiores a 1 s, foi realizada uma análise comparativa entre o período diurno e o noturno. Ao longo deste trabalho, os gráficos de PDF foram elaborados considerando os dados referente às 24 horas de cada dia. No entanto, o *software* utilizado permite a seleção de dados referentes a determinado período do dia. Desta forma, para esta comparação foram selecionados para o período diurno, os dados referentes ao período entre as 9h e as 19h, e para o período noturno, o período compreendido entre as 22h e as 8h. Para tal, foram selecionadas as estações MESC e PRCH, uma vez que é possível verificar grandes oscilações de ruído na estação PRCH, enquanto que MESC possui menores níveis de ruído, sendo também mais estáveis, pelo que estas estações parecem ser representativas das condições de variação diária de ruído na rede. Conforme seria de esperar, na estação MESC (figura 7.12) não se verificam grandes variações entre o período noturno e o diurno, dado esta ser uma das estações menos ruidosas da rede, sendo pouco suscetível a ruído cultural. Já na estação PRCH (figura 7.13), existem diferenças assinaláveis entre o período noturno e o diurno. No primeiro, os níveis de ruído são visivelmente mais baixos para períodos inferiores a 1 s, nas três componentes (anexo II). Já para períodos superiores a 1 s, os níveis de

ruído mantêm-se estáveis, sugerindo que o ruído registado possui origem em atividades antropogénicas.

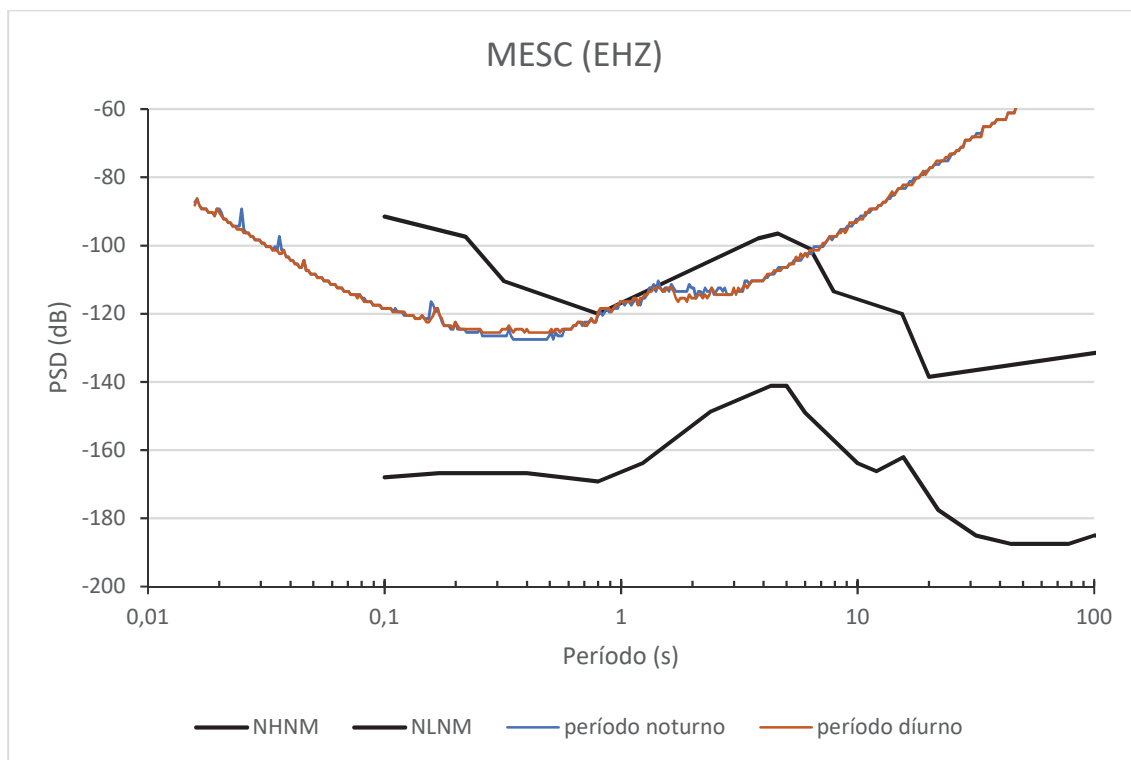


Figura 7.126 - Valores de moda da estimativa de PSD comparando o período noturno (das 22h às 8h) com o período diurno (das 9h às 19h), na componente vertical da estação MESC, utilizando os dados do mês de agosto de 2016.

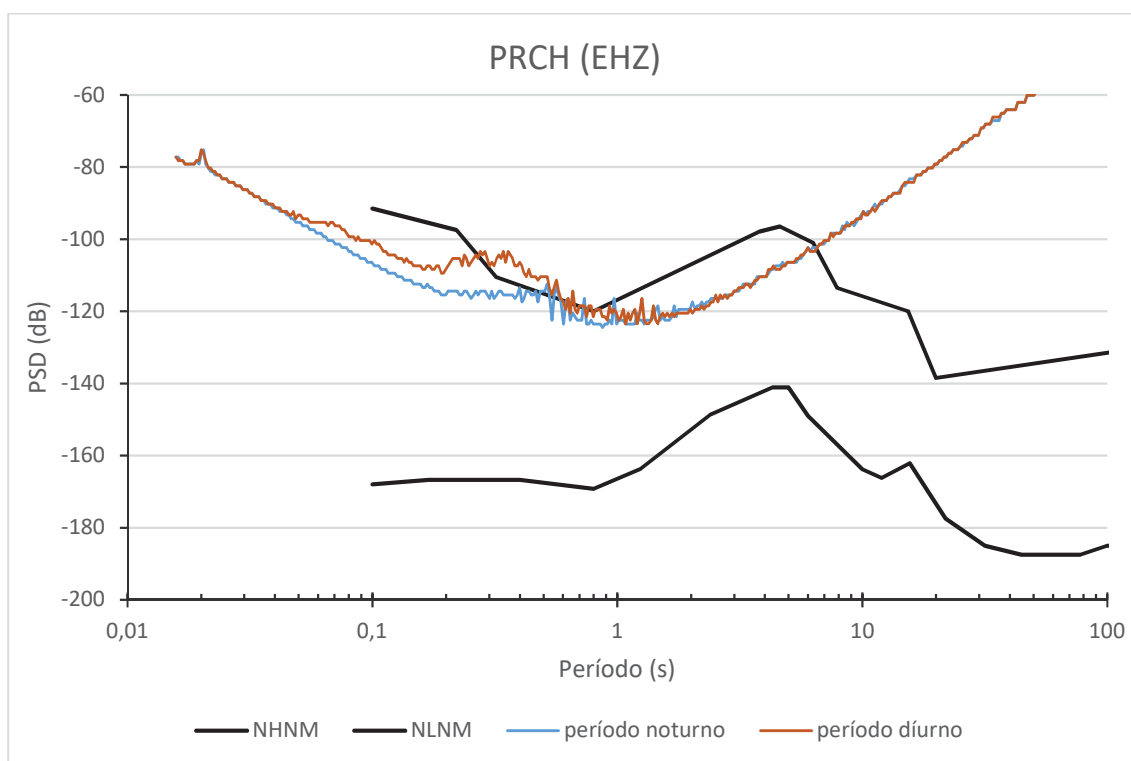


Figura 7.13 - Valores de moda da estimativa de PSD comparando o período noturno (das 22h às 8h) com o período diurno (das 9h às 19h), na componente vertical da estação PRCH, utilizando os dados do mês de agosto de 2016.

7.1.2. Análise da variação sazonal

A escolha da análise de dois períodos temporais distintos, agosto e janeiro, serve o propósito de realizar uma comparação sazonal, permitindo assim a comparação de dados recolhidos em condições climáticas distintas, de forma a avaliar a sua influência nos níveis de ruído. Para tal selecionou-se as componentes verticais das estações FRA1, como referência para as estações da rede do CIVISA, e CMLA, de forma a verificar as variações para períodos superiores a 10 s (figura 7.14). De facto, e conforme esperado, os níveis de ruído são mais elevados durante o mês de janeiro, podendo apresentar diferenças até 10 dB, sendo este aumento explicado pelas condições meteorológicas mais rigorosas durante o período de inverno, quer em terra quer no mar (figura 7.14).

No geral, verifica-se que entre 1 e 10 s, os níveis de ruído durante o mês de agosto (figura 7.11) tendem a manter-se 10 dB inferiores ao NHNM, aumentando durante o mês de janeiro, de tal forma que este tende a seguir os níveis do NHNM. Já entre 0,1 e 1 s, os valores de ruído não possuem grandes alterações

entre os dois meses, sendo os valores de moda próximos entre si. No entanto, verifica-se que quando o período aumenta para 1 s, os níveis começam igualmente a aumentar, aumentando também a dispersão de ruído para esses períodos. Como tal, analisando os dados referentes a janeiro de 2017, verificam-se condições semelhantes, com níveis de ruído muito próximos do NHHM, sendo este modelo ultrapassado entre 1 e 2 s, com os níveis de ruído superiores ao mês de agosto (figura 7.14).

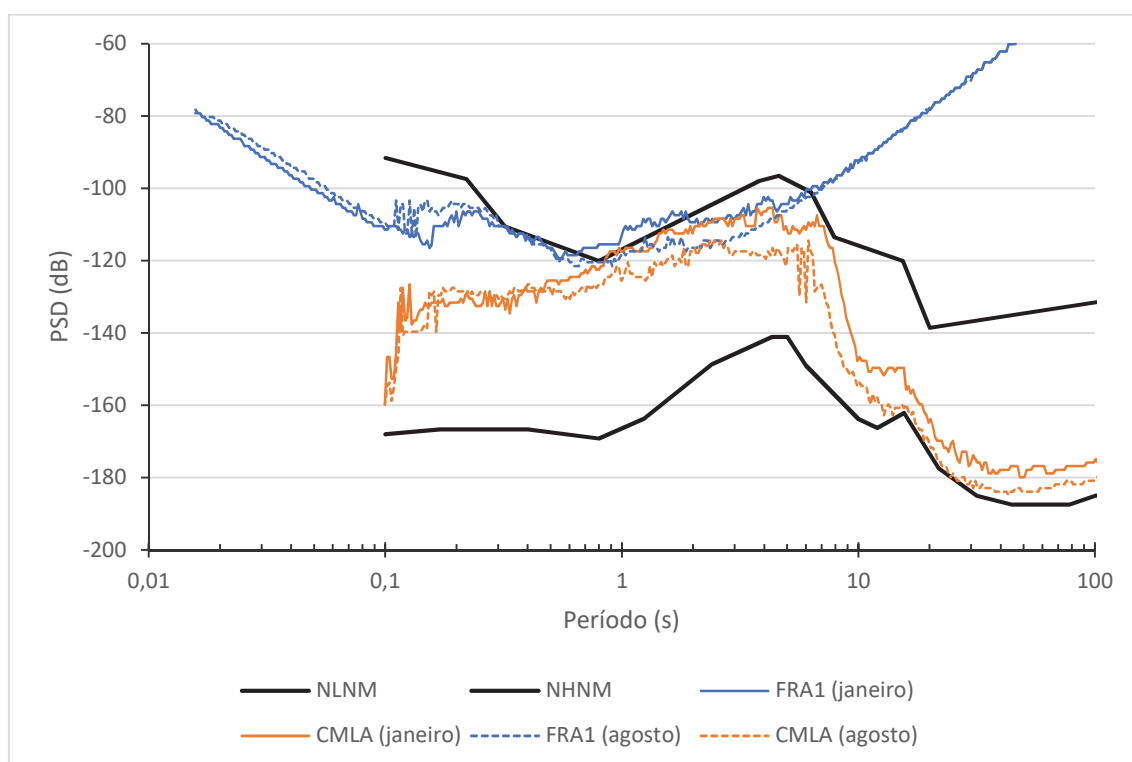


Figura 7.14 - Valores de moda das componentes verticais das estações FRA1 e CMLA para o mês de janeiro de 2017.

Na estação usada como referência, CMLA, verificam-se condições semelhantes às das restantes estações da ilha, em que os valores tendem a ser superiores aos do mês de agosto (figura 7.11) para períodos superiores a 1 s, apresentando valores acima do NHHM, sobretudo nas componentes horizontais (anexos II e III). É igualmente visível no mês de janeiro, dois picos de ruído com expressão considerável associados ao ruído oceânico entre 4 e 6 s e entre 10 e 11 s. Já para períodos inferiores a 1 s, os níveis de ruído tendem a manter-se

semelhantes, aumentando, no entanto, a dispersão do mesmo (anexo III), estando em concordância com as restantes estações.

Conclui-se assim, que a qualidade dos dados recolhidos na ilha de S. Miguel encontra-se fortemente condicionada pela forte expressão do ruído oceânico e que, quando associado ao ruído produzido pela atividade antrópica e/ou por outros fenómenos naturais, pode sobrepor-se aos sinais sísmicos mais ténues. Enquanto que o ruído oceânico possui níveis semelhantes em toda a ilha, não sendo facilmente contornável, o ruído antropogénico sofre rápida atenuação com o aumento da distância à sua fonte, sendo por isso possível a limitação da expressão deste através da seleção cuidada dos locais de instalação dos sensores sísmicos.

7.2. Resultados e análise - Estações temporárias

Nesta secção são apresentados os gráficos de PDF resultantes dos dados obtidos a partir das estações instaladas temporariamente, sendo a análise dos mesmos realizada de seguida. Para cada ponto de amostragem foram criados gráficos de PDF para o período de 24 horas, bem como para o período noturno e diurno. A tabela 7.2 indica o período temporal de dados utilizado para a criação dos gráficos de PDF para cada estação.

Tabela 7.2 - Períodos de dados utilizados nos gráficos PDF.

Local de amostragem	Período de dados utilizado
SET2	22 de junho a 13 de julho de 2017
MESC	15 de agosto a 3 de setembro de 2017
PFET	24 de agosto a 11 de setembro de 2017
PPGR	11 de dezembro de 2008 a 1 de fevereiro de 2009

Os primeiros gráficos apresentados (figuras 7.15 a 7.17) são referentes à estação instalada na cave sísmica pertencente à rede sísmica permanente do CIVISA, SET2, localizada na zona das Cumeeiras, Sete Cidades (figura 7.1).

Aqui foram utilizados os dados recolhidos entre as 00 horas do dia 22 de junho e as 06 horas do dia 13 de julho. Tal, corresponde a um período de dados superior a duas semanas de registo contínuo, de forma a tentar suavizar os gráficos para períodos superiores a 10 s. Apesar deste longo período de dados, verificou-se uma grande dispersão do ruído para períodos superiores a 10 s, levantando dúvidas sobre a adequabilidade dos dados obtidos para este estudo. Desta forma, optou-se por realizar uma nova recolha de dados mais extensa, de forma a verificar se surgia alguma tendência nos valores de ruído, sendo que tal não ocorreu.

Os gráficos obtidos para as estações de MESC (figuras 7.18 a 7.20), de PFET (figuras 7.21 a 7.23) e PPGR (figuras 7.26 a 7.28) apresentam o mesmo comportamento verificado para a estação SET2. No entanto, tal ocorre apenas para períodos superiores a 10 s nas componentes horizontais, e de forma menos evidente, sendo possível identificar a tendência geral do ruído.

De forma a melhor compreender a origem do ruído, foram elaborados gráficos utilizando os mesmos dados, mas considerando apenas o período noturno (22h às 8h) (figuras 7.16, 7.19, 7.22 e 7.27) e diurno (9h às 19h) (figuras 7.17, 7.20, 7.23, 7.28).

Apesar de não existir uma tendência clara dos níveis de ruído para determinados períodos, os dados obtidos permitem verificar os níveis gerais de ruído no local, possibilitando o cumprimento dos objetivos deste estudo.

- SET2

A primeira estação da qual se obteve dados foi a instalada em SET2 (figuras 5.3 e 7.15 a 7.17). Inicialmente encontraram-se algumas dificuldades em obter resultados credíveis, facto que levou a que fosse efetuada uma nova recolha de dados, uma vez que se admitia que o problema pudesse ser do sensor. Desta forma, antes de ser iniciado um novo período de recolha de dados, o sensor foi calibrado e as massas deste centradas, para despistar problemas da própria estação. Após os dados obtidos em MESC apresentarem características idênticas, num local que com base na caracterização realizada anteriormente, seria de esperar que o local apresentasse níveis de ruído aceitáveis, e dado que

fora utilizada outra estação, colocou-se de parte a possibilidade do problema ser do equipamento de monitorização. Como tal, decidiu-se refazer os ficheiros de resposta das estações utilizadas. A partir dos dados fornecidos pelo fabricante das estações sísmicas, e recorrendo ao código RESP inserido no pacote de *software* SEISAN (Havskov e Ottemöller, 1999), é possível criar ficheiros de resposta de duas formas distintas. Inicialmente, utilizou-se a tabela de “*Poles and Zeros*”. Na utilização deste método surgiram algumas dificuldades na aplicação dos valores fornecidos pelo fabricante, que por sua vez gerava dados implausíveis, com níveis de ruído muito elevados a baixas frequências e muito baixos a altas frequências. Como tal, foi utilizado o segundo método, que consiste na introdução de parâmetros do digitalizador e do sensor sísmico, que são igualmente fornecidos pelo fabricante, como o ganho do digitalizador e o ganho do sismómetro. Ambos os métodos, quando corretamente aplicados, são válidos para o estudo de ruído da estação, sendo os resultados finais idênticos e com diferenças mínimas, que se revelam irrelevantes neste tipo de estudo. A utilização deste segundo método revelou-se mais simples e gerou resultados esperados e em linha com o observado anteriormente nas estações da rede permanente, pelo que foi o método utilizado para gerar os ficheiros de resposta para as estações utilizadas.

No que concerne à localização SET2, em termos gerais, a estação apresenta níveis de ruído elevados. Para períodos acima de 10 s os níveis de ruído são, também, bastante dispersos. Tendo como exemplo a componente vertical da estação, aos 11 s o valor de moda do nível de ruído sofre um grande aumento, passando de próximo do NLNM para próximo do NHNM. Apesar disso, para a componente vertical, os níveis de ruído para este período situam-se abaixo do NHNM, sendo que caso fosse utilizado um período de dados especialmente longo poderia emergir uma tendência geral dos níveis de ruído. Tanto quanto foi possível identificar, o local em questão encontra-se sobre um espesso depósito de pedra-pomes, pelo que se coloca a possibilidade desta condição litológica influenciar os elevados níveis de ruído para períodos acima de 10 s, bem como a grande dispersão dos valores deste. Dada a forte dispersão de ruído neste período e a inexistência de linhas de moda claras, não é possível realizar

inferências a partir destes dados, sendo que não seria de esperar variações significativas.

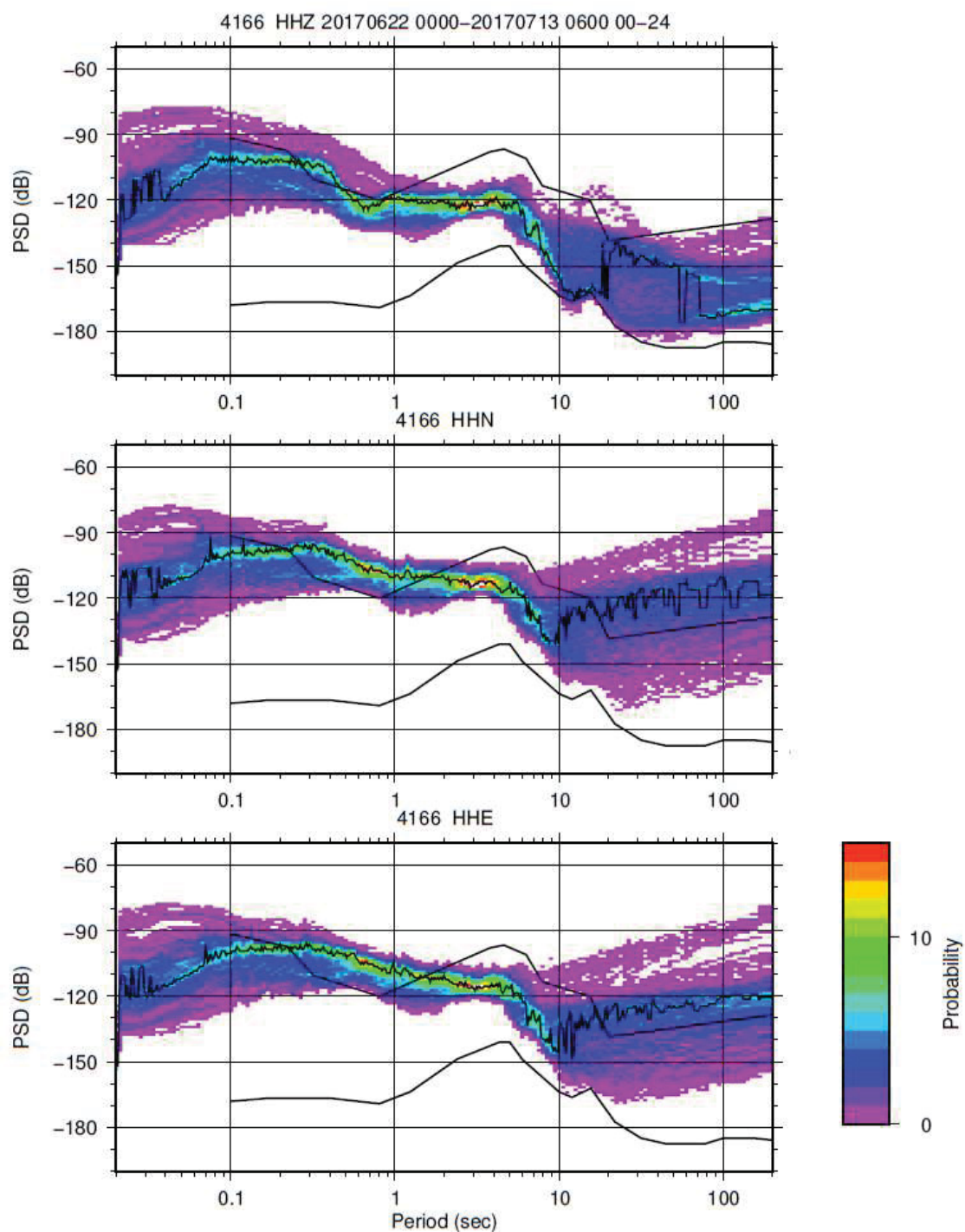


Figura 7.15 - Gráfico PDF da estação instalada em SET2 para o período de dados compreendido entre 22 de junho e 13 de julho de 2017.

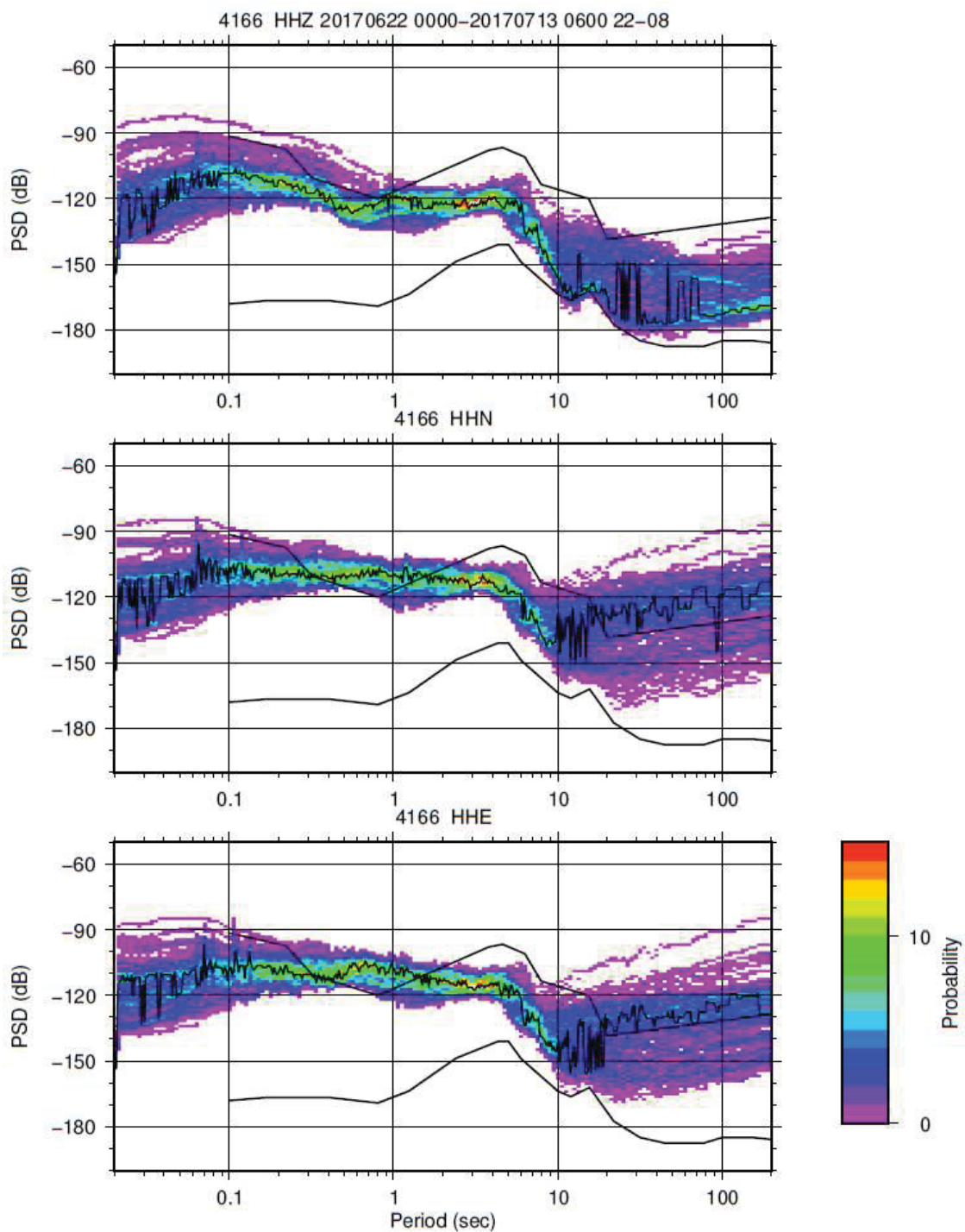


Figura 7.16 - Gráfico PDF da estação instalada em SET2, para o período noturno, com os dados compreendidos entre 22 de junho e 13 de julho de 2017.

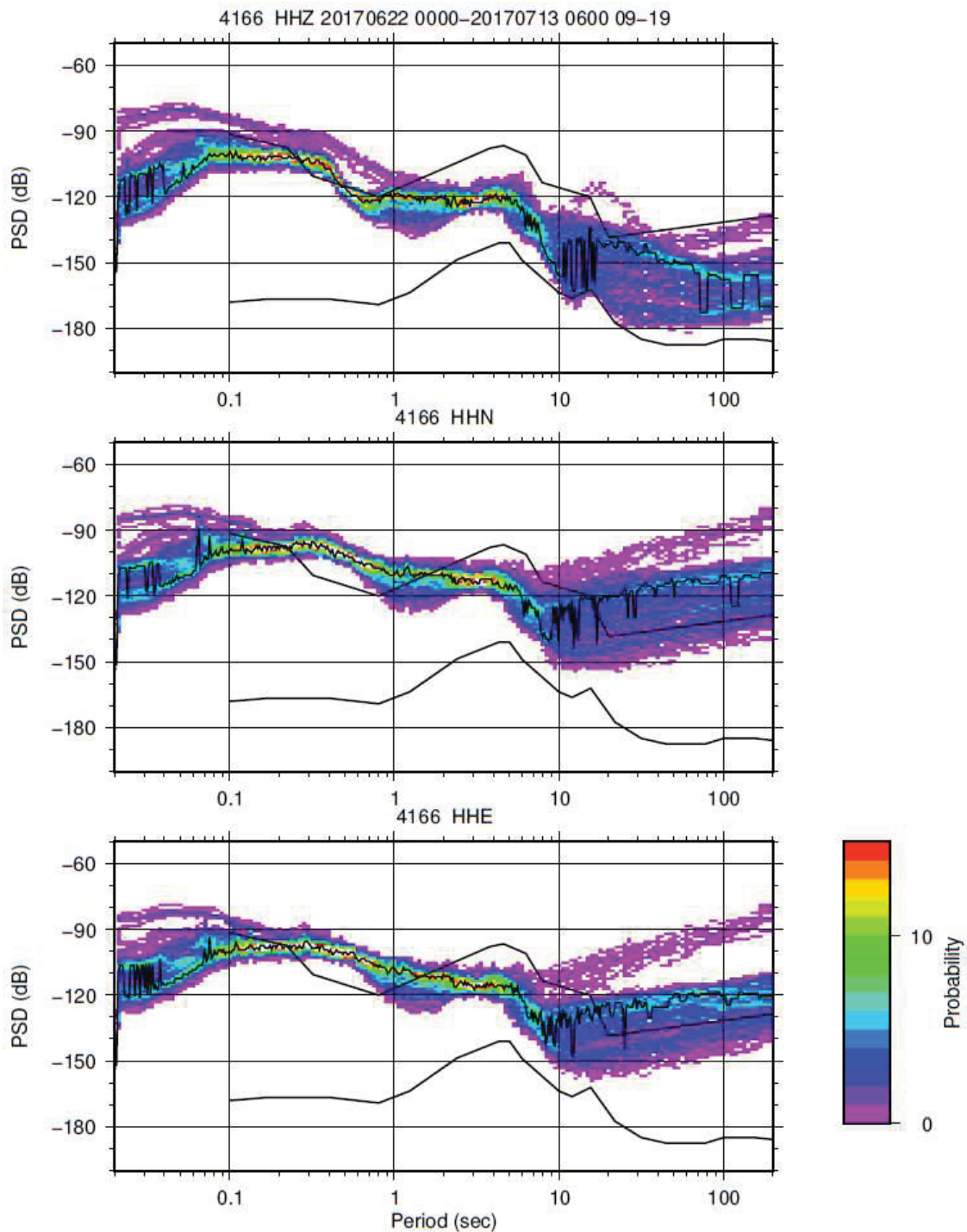


Figura 7.17 - Gráfico PDF da estação instalada em SET2, para o período diurno, com os dados compreendidos entre 22 de junho e 13 de julho de 2017.

No que concerne ao período entre 1 a 10 s, os níveis de ruído situam-se dentro do esperado. Na região, conforme já discutido anteriormente, estes períodos são dominados pelo ruído oceânico. Como tal, os níveis de ruído neste período apenas possuem pequenas variações na ilha, estando dependentes da distância do local à costa e das condições que prevalecem no oceano. Os níveis de ruído são semelhantes com os registados na restante rede sísmica do CIVISA, estando abaixo do NHNM, mas aproximando-se deste modelo à medida que o período diminui para 1 s. Da mesma forma, as componentes horizontais apresentam níveis até 10 dB mais elevadas, ultrapassando o NHNM para períodos inferiores a cerca de 1-2 s. Em termos de variação diária não foram verificadas diferenças significativas neste período entre o dia e a noite, sugerindo que, como seria de esperar, os níveis de ruído neste período não são afetados por variações diárias.

Para períodos inferiores a 1 s, os níveis de ruído começam a ser influenciados por ruídos associados a atividades antropogénicas. Aqui verifica-se que os níveis de ruído aumentam rapidamente. Apesar disto, na componente vertical, os valores de moda tendem a seguir o NHNM, sendo baixa a probabilidade de ultrapassar este modelo, com exceção para as componentes horizontais entre 1-2 s até aproximadamente 0,2 s. Abaixo de 0,2 s, os níveis de ruído são inferiores ao NHNM. No entanto, mantêm-se próximo deste, não sendo de excluir a possibilidade deste modelo ser ultrapassado numa nova amostragem de dados.

Ainda para o período inferior a 1 s é possível reconhecer duas tendências de ruído, identificáveis no gráfico pelas suas probabilidades de ocorrência próximas de 10%. No gráfico das 24 horas (figura 7.15), a primeira tendência é facilmente identificada pela linha correspondente aos valores de moda. Estas duas tendências parecem corresponder às variações de ruído registado entre o dia e a noite, podendo tal ser confirmado pelos gráficos diurnos e noturnos. Nestes, verifica-se uma diferença de 10 a 20 dB, sendo que a linha de tendência com os níveis de ruído inferiores corresponde à linha de moda no gráfico noturno, sugerindo assim que os níveis de ruído mais baixos são atingidos durante a noite e possuem uma probabilidade de ocorrência inferior aos registados durante o período diurno.

No campo foi possível identificar algumas das possíveis fontes de ruído; verificou-se que o abrigo sísmico encontra-se próximo de explorações de gado, sendo visíveis sinais da passagem de gado junto ao abrigo. Para além disso, a proximidade da estação com o caminho das Cumeeiras pode contribuir para o ruído registado, nomeadamente devido à passagem de viaturas bem como de pessoas próximo da estação, uma vez que este caminho faz parte de um percurso pedestre, sendo por isso um local de grande afluência de turistas durante o período diurno.

- MESC

Os níveis de ruído na estação MESC foram os mais baixos registados neste estudo (figuras 5.3 e 7.18 a 7.20). De uma forma geral, os dados deram origem a gráficos com linhas de moda mais definidas e com níveis de ruído mais estáveis.

Para períodos superiores a 10 s verificam-se níveis de ruído, na componente vertical, próximos dos registados na estação CMLA. Todavia, nas componentes horizontais, os níveis de ruído aumentam significativamente acima de 10 s, aproximando-se do NHNM. Contudo, grande parte do ruído encontra-se abaixo deste modelo. Em termos de variação diária não se verifica alterações na linha de moda nestes períodos, apesar de se verificar maior dispersão do ruído no período diurno.

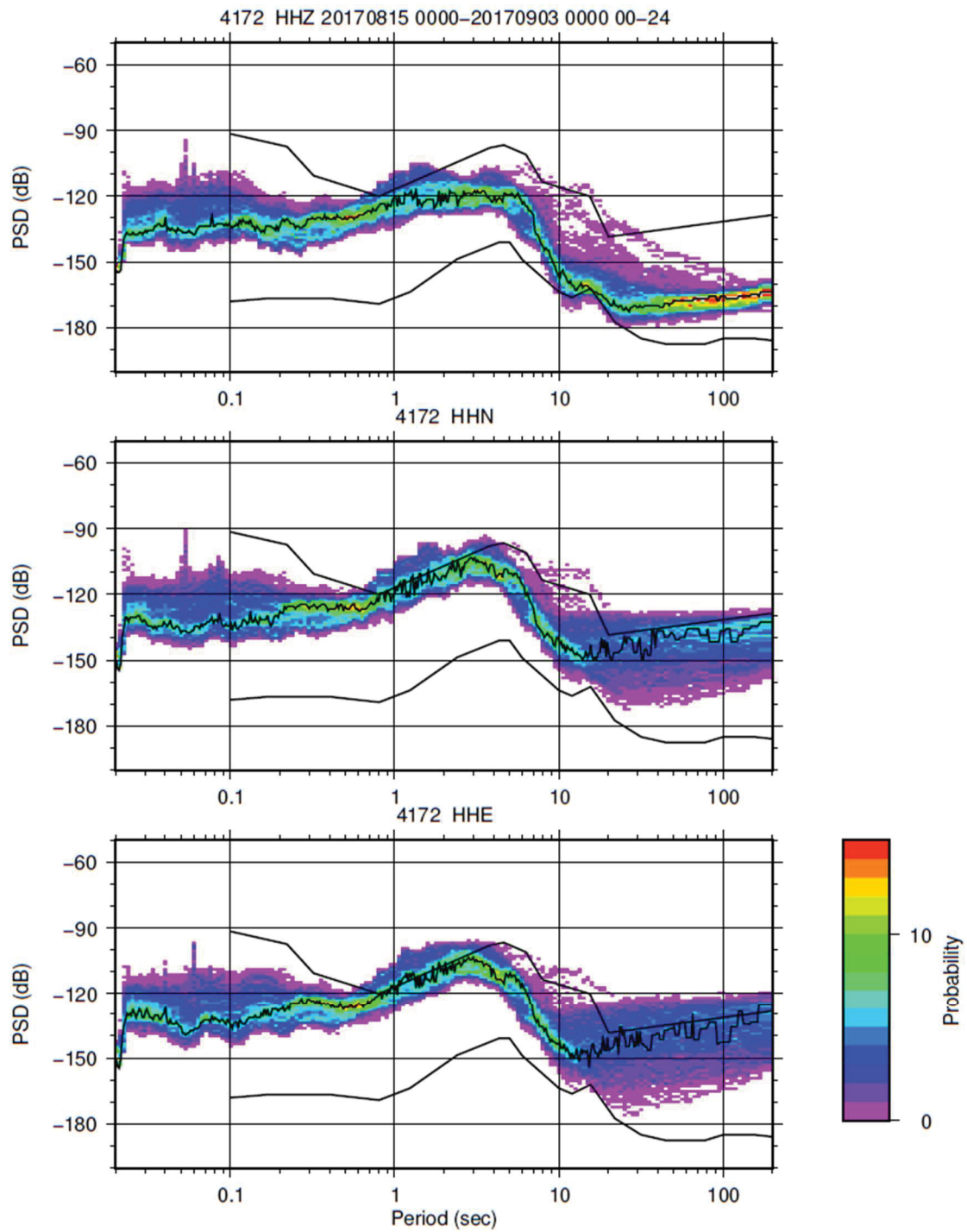


Figura 7.18 - Gráfico PDF da estação instalada em MESC para o período de dados compreendido entre 15 de agosto e 3 de setembro de 2017.

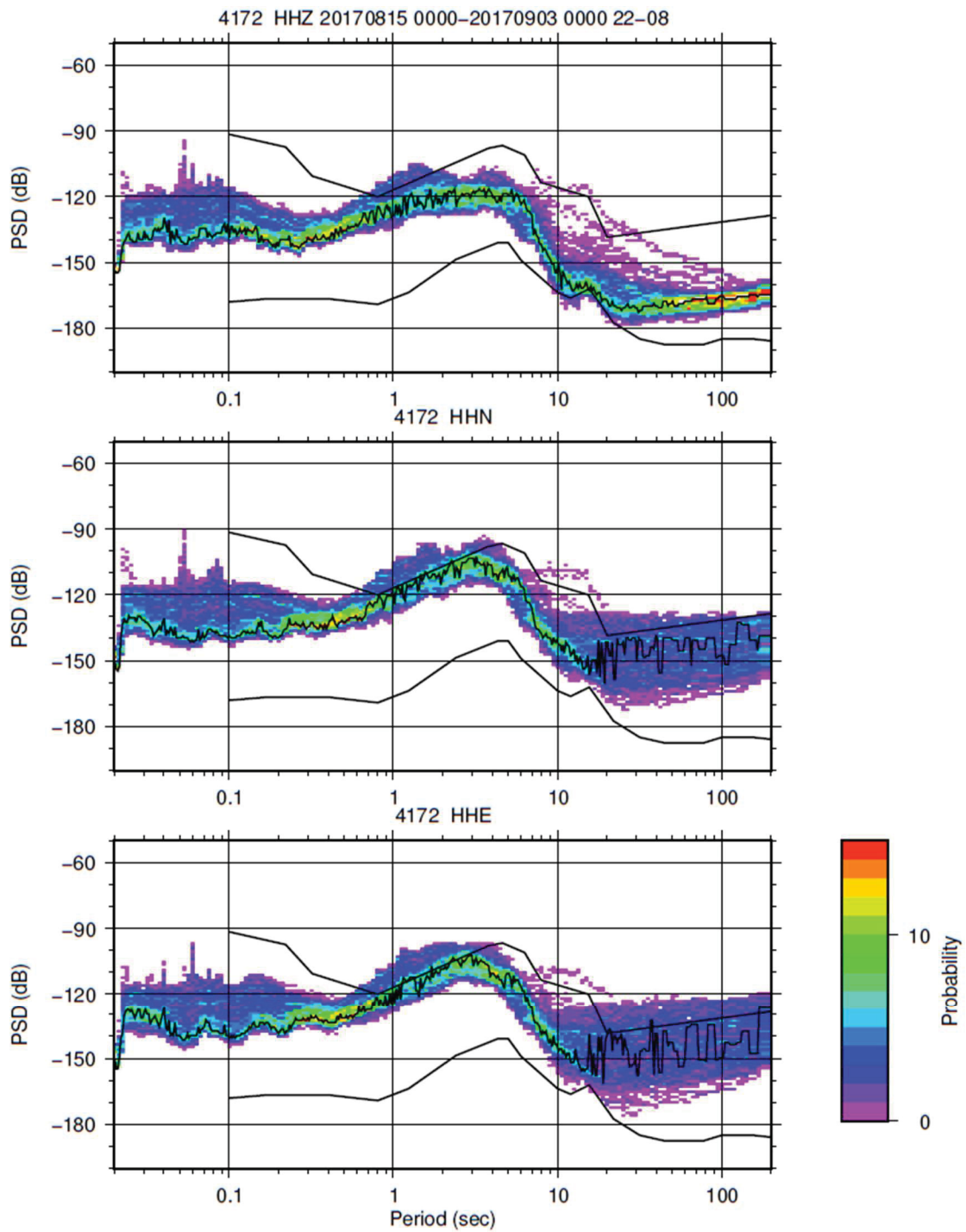


Figura 7.19 - Gráfico PDF da estação instalada em MESC, para o período noturno, com os dados compreendidos entre 15 de agosto e 3 de setembro de 2017.

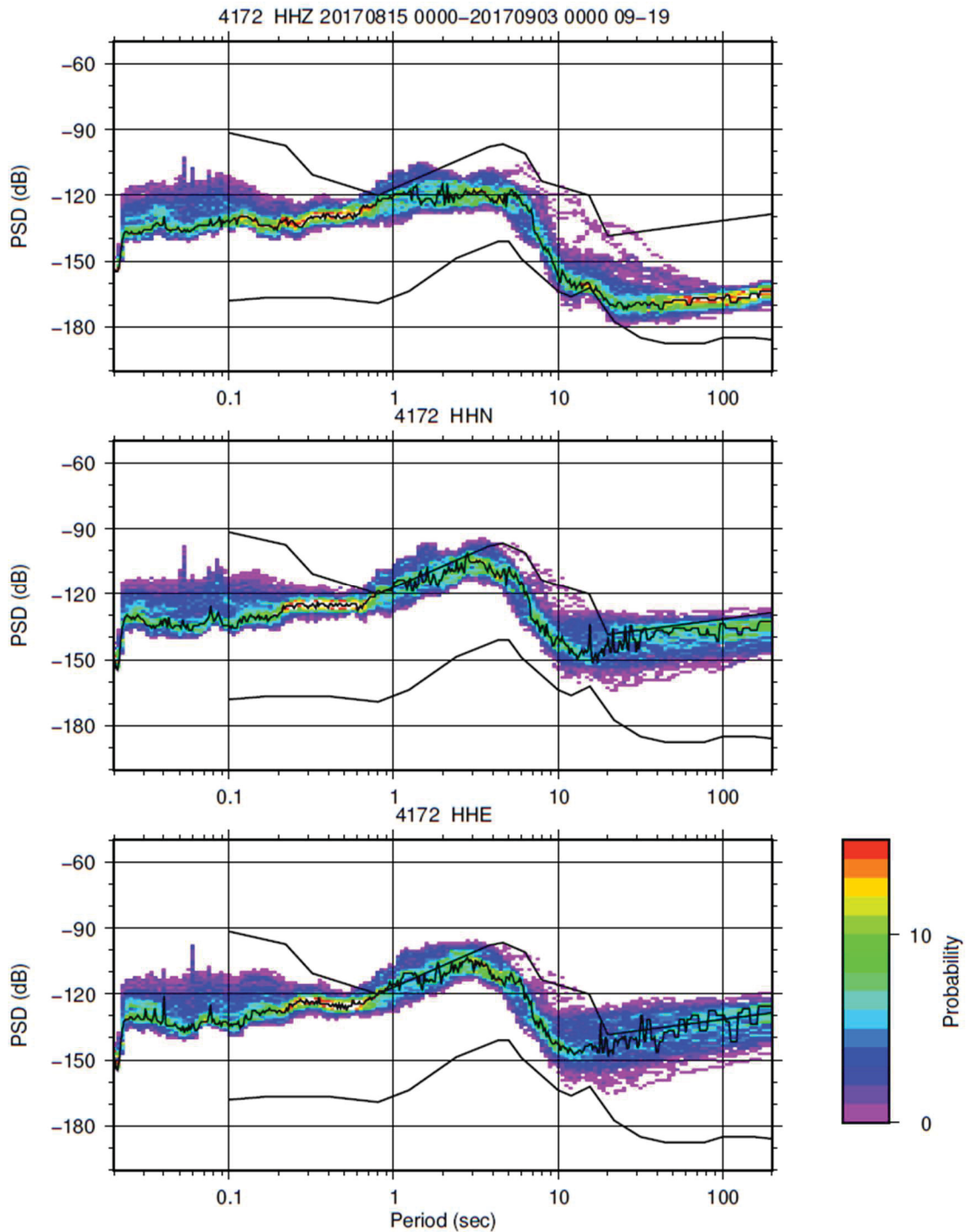


Figura 7.20 - Gráfico PDF da estação instalada em MESC, para o período diurno, com os dados compreendidos entre 15 de agosto e 3 de setembro de 2017.

O ruído oceânico, como já foi possível averiguar, possui grande influência nos níveis gerais de ruído registados na ilha. Desta forma, os níveis de ruído começam a elevar-se à medida que o período diminui a partir dos 10 s nas

componentes horizontais. Ainda associado a este tipo de ruído, é possível identificar no gráfico (figura 7.18) o pico de ruído associado ao ruído oceânico secundário, identificado por volta dos 3 a 4 s. Este pico de ruído oceânico é mais facilmente identificado na componente vertical. Uma vez mais, não foi possível identificar variações de ruído entre dia e noite. Neste período, entre 1 e 10 s, os níveis de ruído foram semelhantes aos registados em SET2.

Abaixo de 1 s, os níveis de ruído voltam a diminuir, sendo sobretudo influenciados por fontes de ruído cultural. Desta forma, dada a localização da estação, os níveis de ruído neste período foram os mais baixos registados neste estudo. Nesta gama de período inferior a 1 s, verificam-se níveis de ruído bastante estáveis, especialmente entre 0,1 e 1 s. No entanto, e uma vez que o abrigo sísmico encontra-se rodeado de árvores, existia a possibilidade de ser registado ruído associado às suas vibrações, nomeadamente em episódios de ventos fortes. Tal situação não se verificou, em parte dada a época do ano em que foram registados os dados (menos favorável a condições de vento forte), e em parte dada a profundidade do fosso da estação que atenua grande parte destes ruídos de frequências mais elevadas (períodos mais baixos). Em termos de variação diária verifica-se alguma variação abaixo de 1 s. Porém, esta apenas tem alguma expressão entre 0,1 e 1 s, sendo que aos 0,3 s verifica-se uma diferença de cerca de 10 dB entre o período diurno e o noturno. Ainda para períodos inferiores a 1 s, é possível identificar alguns picos de ruído abaixo de 0,1 s. Através da visualização dos dados foi possível identificar estes picos como ruído eletrónico, uma vez que este exprime-se em frequências muito restritas, sobretudo aos 0,04, 0,05 e 0,0588 s, sendo que este mesmo ruído também foi identificado na estação de curto período que já se encontrava no abrigo, pertencente à Rede de Monitorização Sísmica Permanente do CIVISA. Uma vez que este ruído eletrónico foi identificado nas duas estações, a fonte deste terá de ser um sistema eletrónico partilhado pelas duas estações. Dado que o único sistema partilhado pelas duas estações é o sistema de fornecimento de energia, crê-se que a fonte deste ruído será o conversor de energia que recebe 24 V do painel solar e converte para 12 V para alimentar as baterias.

- PFET

Na estação PFET (figuras 5.3 e 7.21 a 7.23) também foram registados níveis de ruído com as respetivas linhas de moda estáveis.

Para períodos superiores a 10 s, os níveis de ruído da componente vertical são semelhantes aos encontrados em MESC, ficando abaixo do NHNM. Todavia, existem algumas ocasiões em que o NHNM é ultrapassado, mas com probabilidade de ocorrência muito baixa. Já para as componentes horizontais, os níveis de ruído são superiores aos registados em MESC, possuindo maior probabilidade de estar acima do NHNM.

De forma semelhante ao observado nas estações MESC e SET2, abaixo de 10 s os níveis de ruído tendem a aumentar rapidamente, aproximando-se do NHNM para períodos próximos de 1 s, chegando a ultrapassar este modelo para as componentes horizontais. Uma vez mais, dado que a fonte deste ruído está associada a processos de origem oceânica, não foi possível identificar variações de ruído entre o período noturno e o diurno.

Abaixo de 1 s os níveis de ruído tendem a ser mais elevados, ficando entre os observados na estação de SET2 e de MESC. Assim, os níveis tendem a seguir o modelo NHNM, diminuindo um pouco abaixo de 0,3 s. No entanto, a linha dos valores de moda mantém-se sempre abaixo do NHNM para a componente vertical. Já para as componentes horizontais, os níveis de ruído tendem a ser um pouco mais elevados. Neste caso as linhas de moda ultrapassam o NHNM entre os 2 e 0,2 s. Não obstante, neste local verificou-se uma variação significativa de ruído entre o período noturno e o diurno, sendo registada uma diferença próxima de 20 dB. Para o período noturno, nas componentes horizontais, a linha de moda apenas ultrapassa o NHNM entre 0,7 e 2 s. Considerando que estes níveis estão associados a ruído cultural, e tendo em conta a localização da estação, crê-se que as fontes serão as explorações agrícolas e pecuárias que se desenvolvem a poucos metros da estação, verificando-se a presença de gado, colheita de culturas e a passagem de viaturas agrícolas próximo da estação

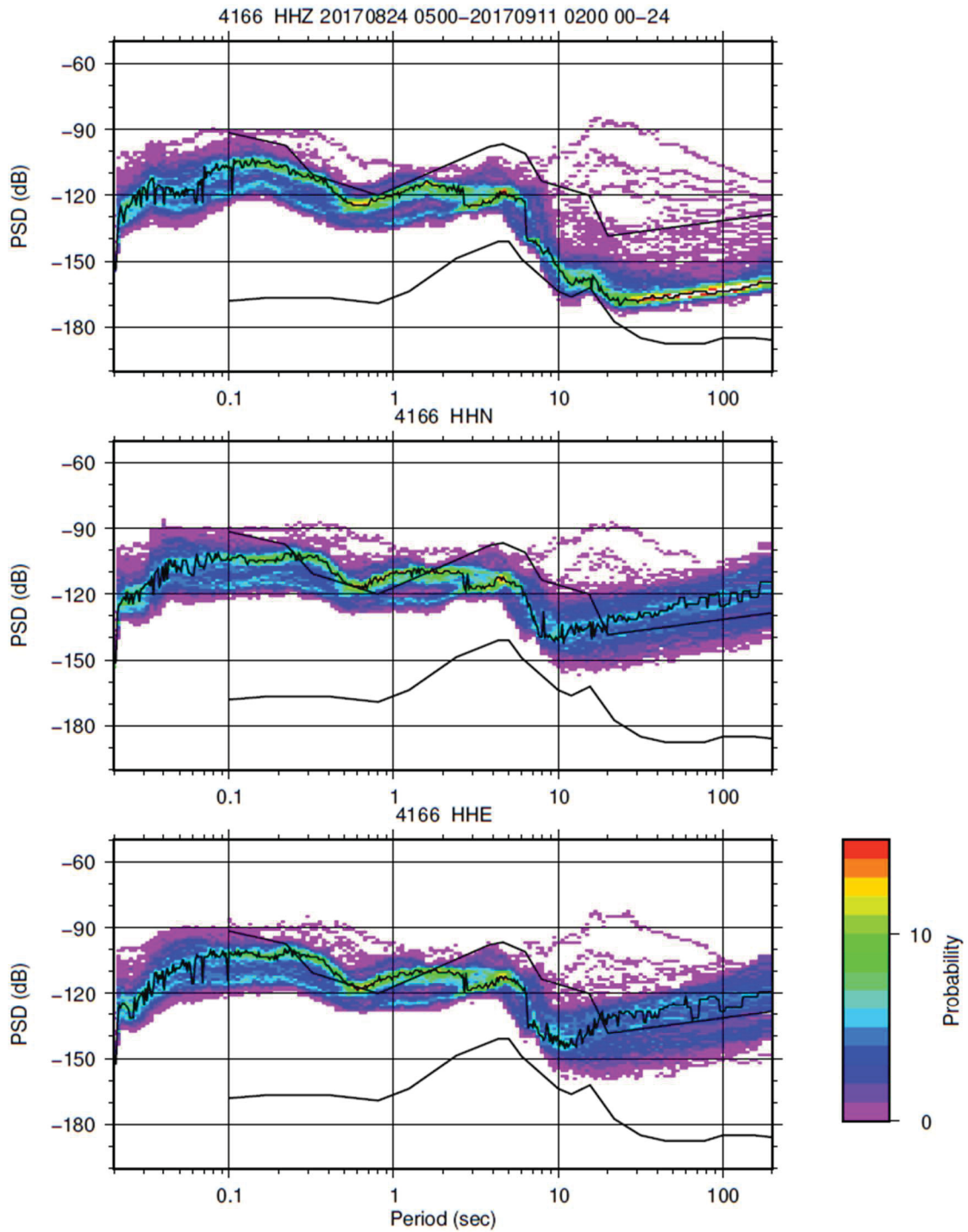


Figura 7.21 - Gráfico PDF da estação instalada em PFET para o período de dados compreendido entre 24 de agosto e 11 de setembro de 2017.

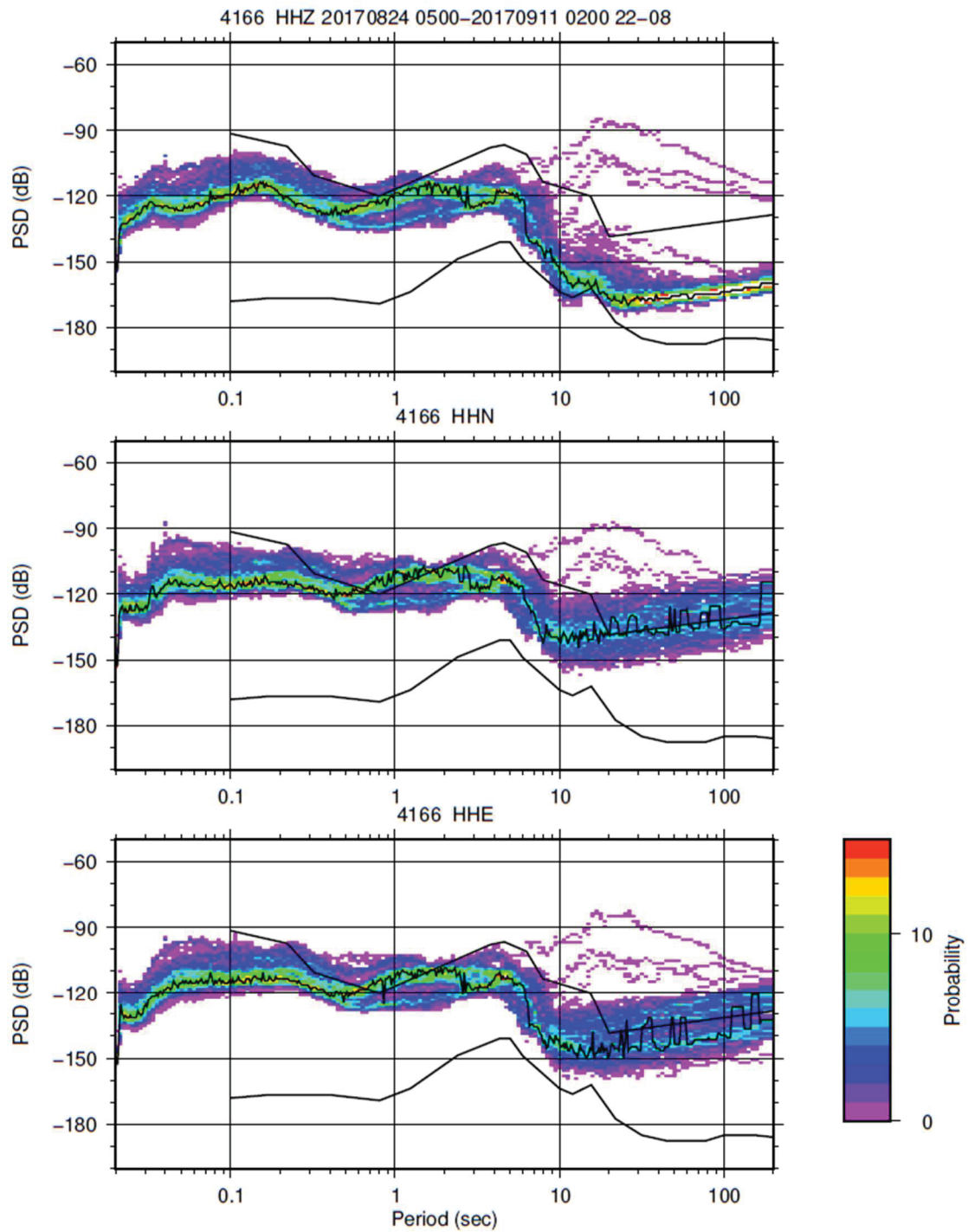


Figura 7.22 - Gráfico PDF da estação instalada em PFET, para o período noturno, com os dados compreendidos entre 24 de agosto e 11 de setembro de 2017.

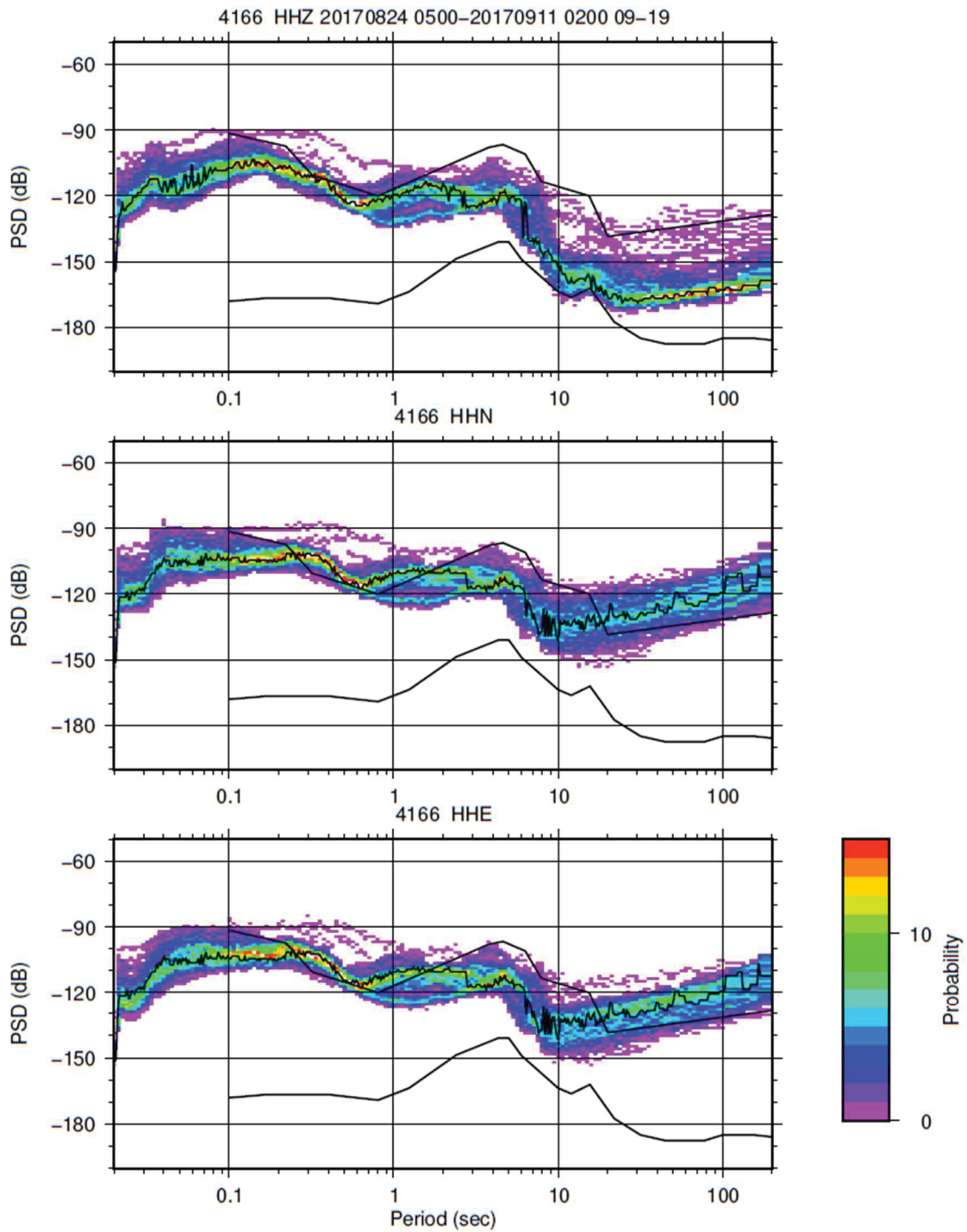


Figura 7.23 - Gráfico PDF da estação instalada em PFET, para o período diurno, com os dados compreendidos entre 24 de agosto e 11 de setembro de 2017.

- PPGR

No âmbito deste trabalho, foram ainda utilizados dados referentes a uma instalação temporária anteriormente realizada pelo CIVISA (tabela 7.3). Na qual foi usado um sensor *Streckeisen STS-2* e um digitalizador *Kinematics Quanterra Q330*. A estação foi instalada na zona das Furnas, no Pico do Gaspar (figura 7.24 e 7.25), numa cave sísmica desativada pertencente ao CIVISA, tendo o período de recolha de dados decorrido entre dezembro de 2008 e julho de 2009. A cave sísmica utilizada para o efeito possui um fosso no qual foi instalado o sensor sísmico e posteriormente colocada uma proteção em espuma de poliestireno em torno do sismómetro, sendo que a mesma ficou nivelada com o solo do abrigo sísmico (figura 7.26). A ausência de sistema de transmissão de dados traduziu-se em baixos consumos energéticos, ficando a estação em funcionamento com recurso a uma bateria e painel solar. Desta forma, foi necessário o deslocamento regular à estação sísmica de forma a proceder à recolha dos dados.

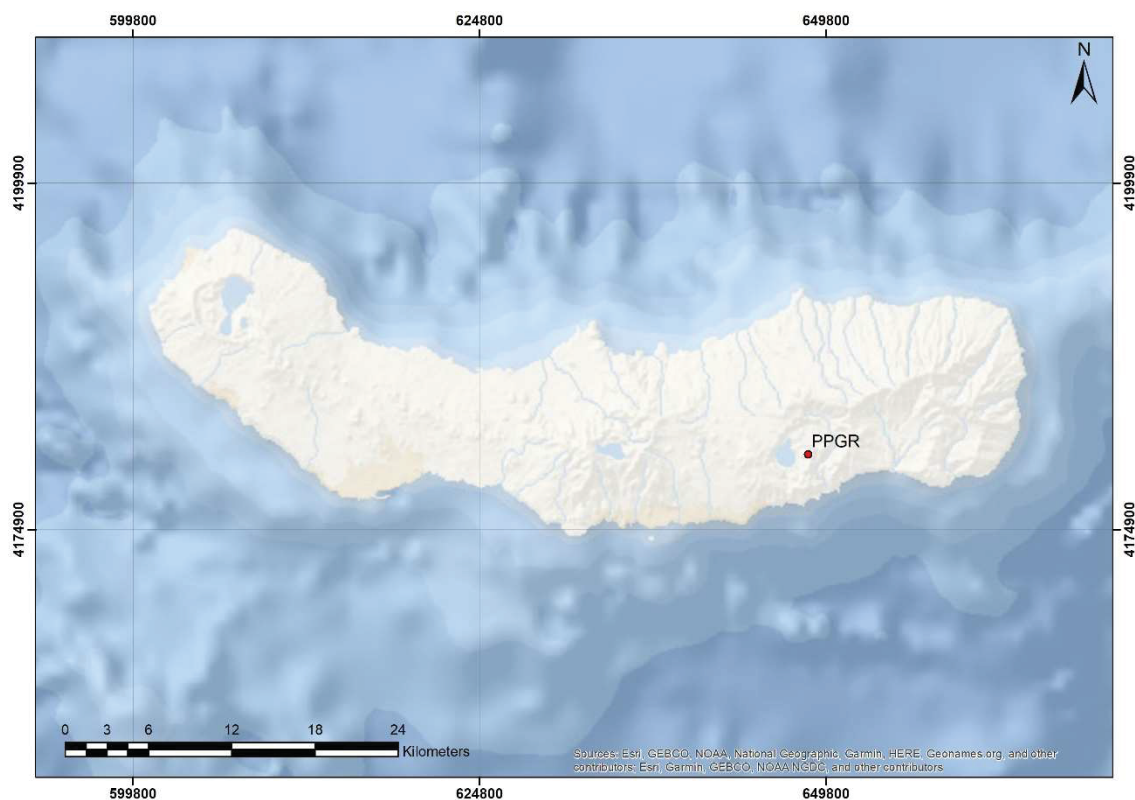


Figura 7.24 - Localização do ponto de amostragem localizado no Pico do Gaspar, Furnas. Mapa apresentado com coordenadas no sistema UTM, datum WGS84 zona 26S.

Tabela 7.3 - Dados da estação PPGR, situada no Pico do Gaspar, Furnas.

Nome	PPGR
Região	Pico do Gaspar- Furnas
M (UTM, WGS84, zona 26S)	648801
P (UTM, WGS84, zona 26S)	41804116



Figura 7.25 - Aspeto geral da cave sísmica da estação PPGR.



Figura 7.26 - Detalhe do fosso bem como da proteção térmica adaptada ao fosso e ao sensor.

Os níveis de ruído registados neste local (figuras 7.27 a 7.29) são semelhantes aos registados para as outras estações utilizadas neste trabalho. Para períodos superiores a 10 s, os níveis de ruído são bastante dispersos nas três componentes da estação. No entanto, verifica-se que nas componentes horizontais os níveis de ruído são marcadamente superiores ao da componente vertical, sendo que nas primeiras os valores de moda ultrapassam o NHHM, o que não ocorre na componente vertical.

Para períodos entre 1 e 10 s verificaram-se algumas diferenças em relação ao que foi registado nas restantes campanhas de campo, sendo que neste local foram registados níveis de ruído ligeiramente superiores, particularmente acima de 2 s. Conforme discutido anteriormente, as fontes de ruído nestes períodos estão relacionadas com processos oceânicos, pelo que é possível assumir que as condições que prevaleciam no oceano seriam mais adversas durante o período de recolha de dados desta estação, considerando ainda que este período de recolha de dados foi realizado durante o Inverno, enquanto que as campanhas de campo realizadas neste trabalho foram realizadas durante o

Verão. É ainda possível identificar o pico de ruído associado ao ruído oceânico secundário por volta dos 5 s, apresentando-se com baixa probabilidade de ocorrência.

Abaixo de 1 s os níveis de ruído são semelhantes aos registados nas campanhas de campo, tendendo a manterem-se abaixo do NHNM. Desta forma, o local apresenta níveis de ruído inferiores aos registados em PFET e SET2 para estes períodos. Só foi possível identificar variações entre os níveis de ruído diurno e noturno para períodos inferiores a 1 s, tendo-se verificado uma diminuição até 10 dB no período noturno em relação ao período diurno.

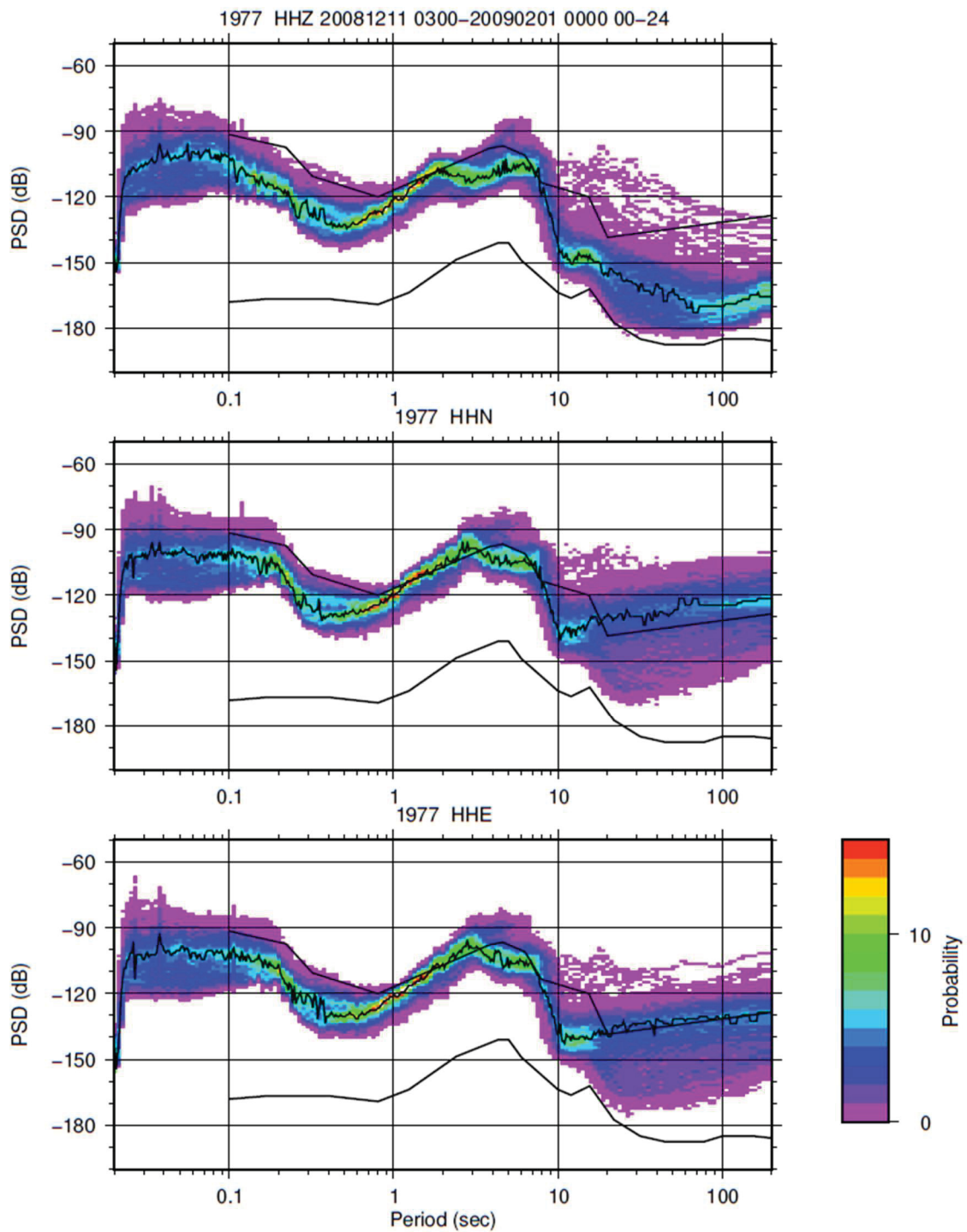


Figura 7.27 - Gráfico PDF da estação instalada em PPGR, para o período de dados compreendidos entre 11 de dezembro de 2008 e 1 de fevereiro de 2009.

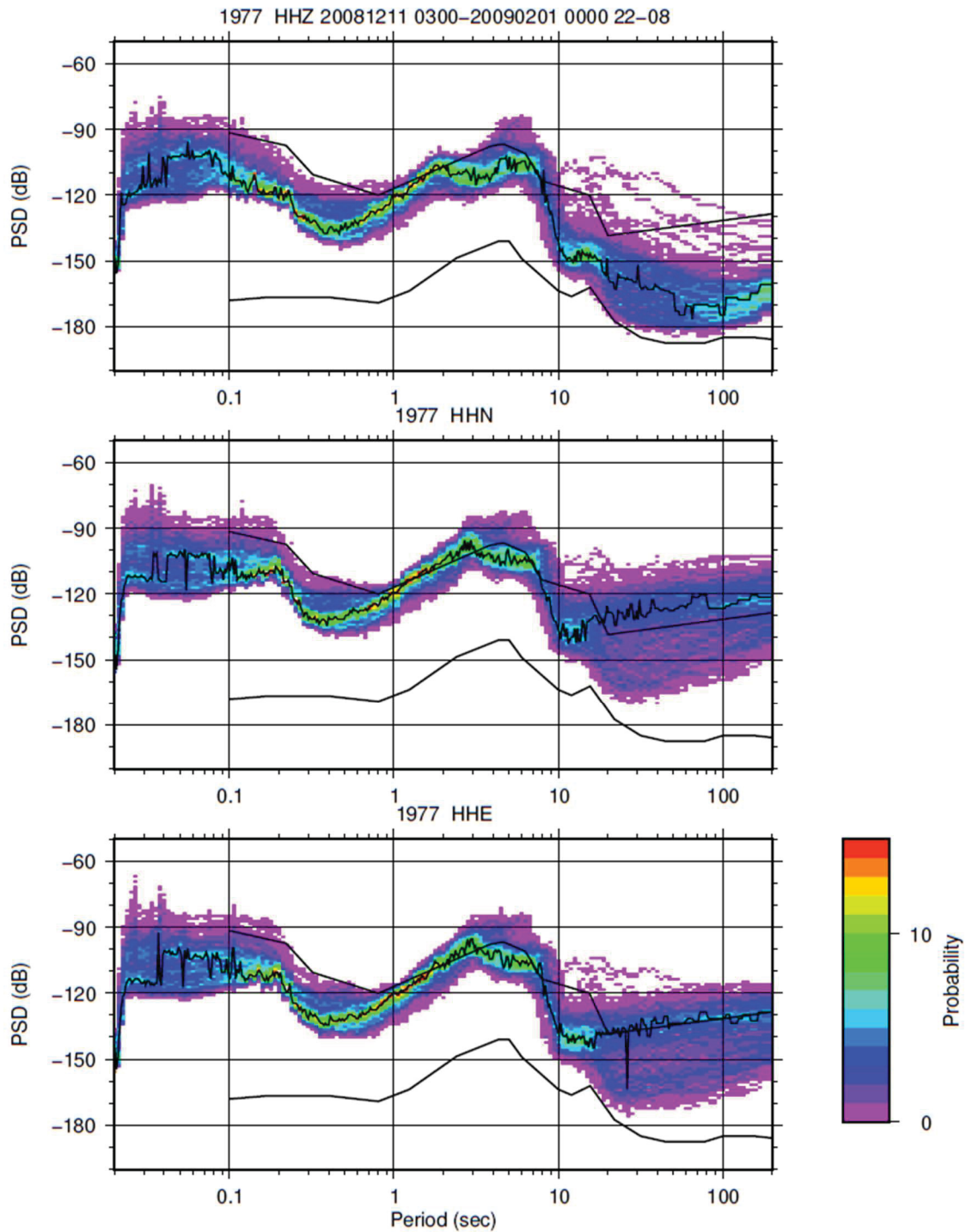


Figura 7.28 - Gráfico PDF da estação instalada em PPGR, para o período noturno, com os dados compreendidos entre 11 de dezembro de 2008 e 1 de fevereiro de 2009

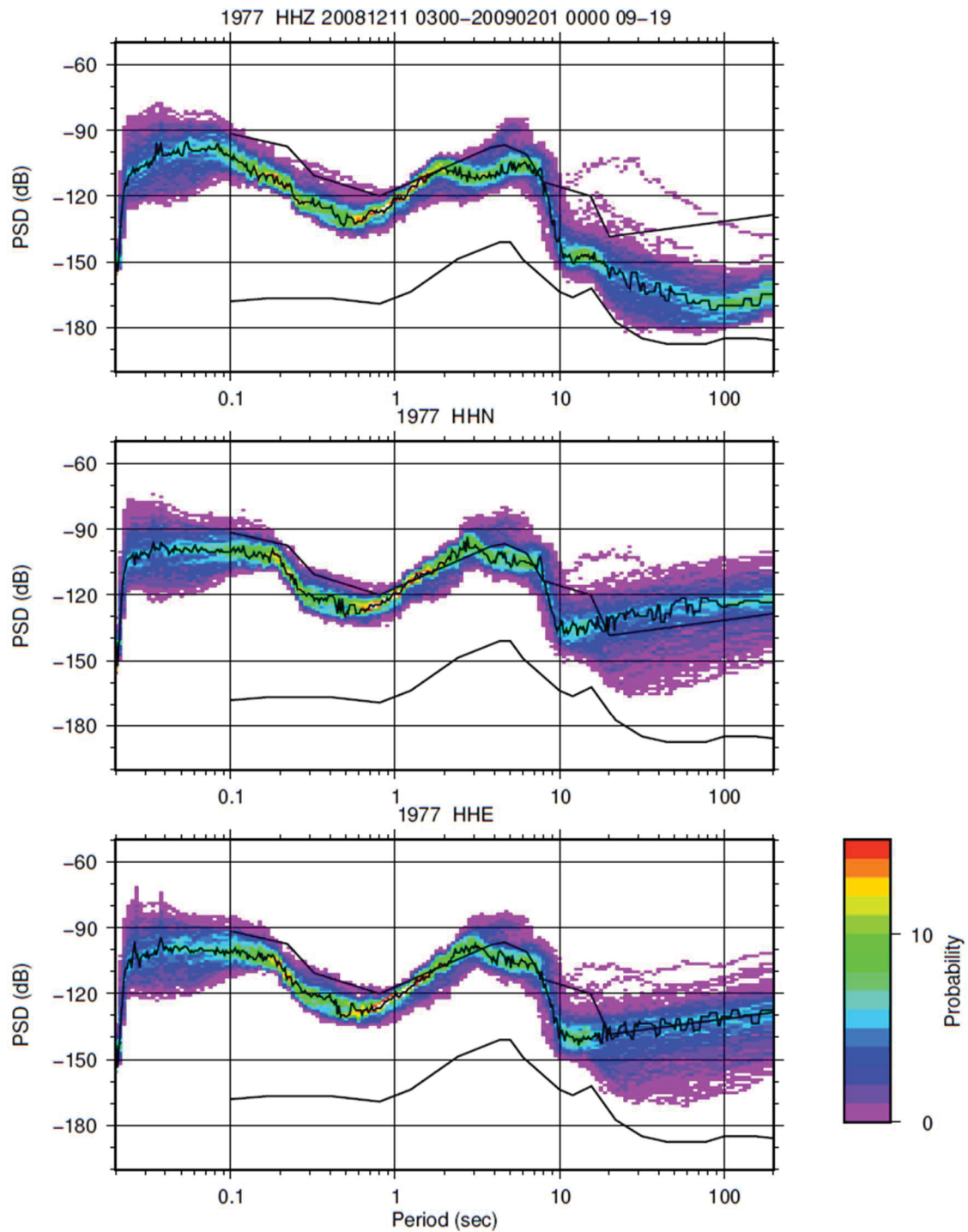


Figura 7.29 - Gráfico PDF da estação instalada em PPGR, para o período diurno, com os dados compreendidos entre 11 de dezembro de 2008 e 1 de fevereiro de 2009

7.3. Análise das condicionantes de ruído

De forma a comprovar a influência da profundidade a que o sensor é instalado, foram gerados gráficos de PDF para os dois sensores de banda larga presentes em CMLA. O primeiro trata-se de um sensor *Geotech KS-54000*, instalado a 97 m de profundidade, identificado como “00”. Dadas as características deste sensor, o CIVISA integra os dados provenientes deste sensor na sua análise de rotina, sendo as formas de onda deste armazenadas numa base de dados contínua. Para além de outros tipos de sensores, tais como sensores barométricos e de infrassons, existe outro sensor sísmico de banda larga, instalado a 7 metros de profundidade, com a designação “10”. Esta estação até o dia 24 de junho de 2017, era composta por um sensor *Guralp CMG-3T*, sendo substituído por um sensor *Streckeisen STS-5* devido a problemas técnicos.

A presença de dois sensores no mesmo local, em ambientes semelhantes, onde apenas varia a profundidade a que estão instaladas, permite comprovar a influência da profundidade nos níveis de ruído registados. No entanto, e conforme já referido, o CIVISA apenas armazena os dados provenientes do sensor *Geotech*, pelo que não foi possível obter os dados do sensor *Streckeisen*. Contudo, o programa de disponibilização de dados da IRIS facultava uma ferramenta *web* para quantificar a qualidade dos dados obtidos pela rede IRIS. Com esta ferramenta foi possível gerar gráficos PDF para as duas estações de CMLA.

Desta forma, foram realizados gráficos utilizando os dados de 26 de setembro a 4 de outubro de 2017 para a componente vertical (figura 7.30 e 7.31) e para a componente horizontal BH2 (figura 7.32 e 7.33). A componente horizontal BH1 apresenta dados incorretos para a estação a 97 m de profundidade, pelo que não foi utilizada neste estudo. Em termos de ruído é possível verificar que a diferença de profundidades possui impacto nos níveis de ruído para períodos inferiores a cerca de 1 s e para períodos superiores a cerca de 10 s, em ambas as componentes.

Para as componentes verticais só foi possível identificar diferenças entre as estações para períodos inferiores a cerca de 1 s, sendo que os níveis de ruído são inferiores na estação mais profunda, estando os valores de moda abaixo do

NHNM. Tal deve-se ao facto de nesta gama, os ruídos terem fontes próximas e de se dissiparem rapidamente com a distância à fonte. Como tal, são fortemente atenuados pela profundidade a que o sensor se encontra.

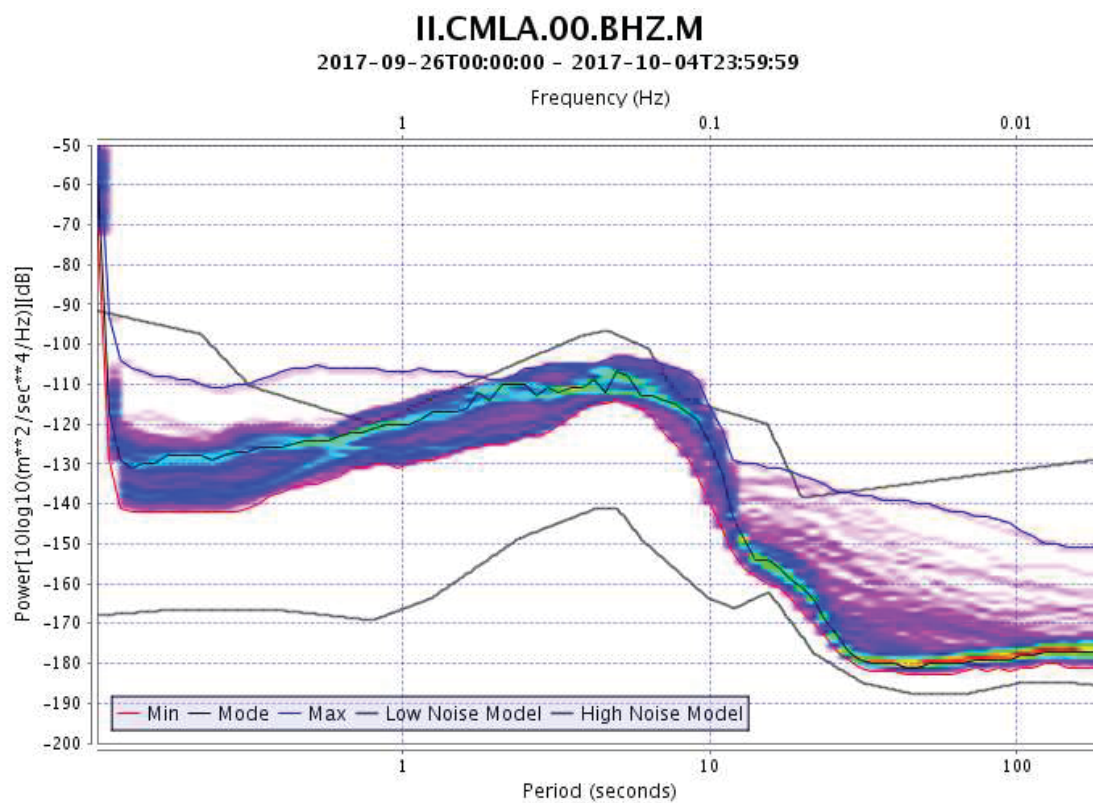


Figura 7.30 - Gráfico PDF da componente vertical da estação CMLA 00.

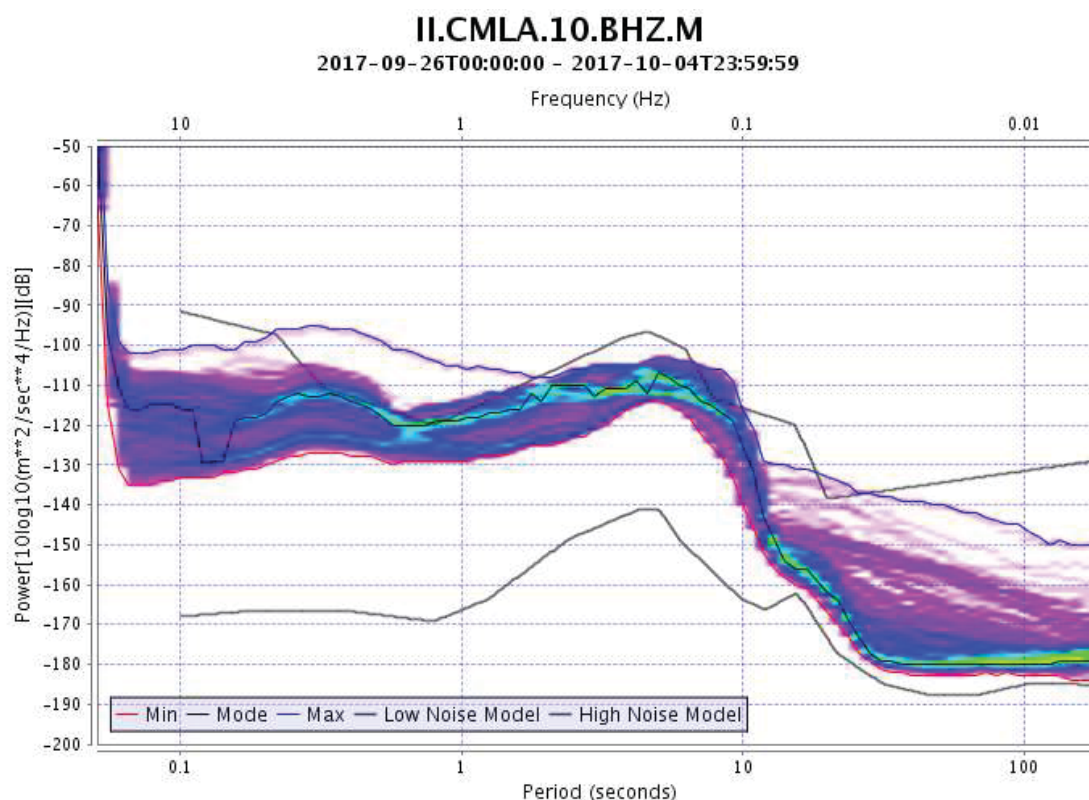


Figura 7.31 - Gráfico PDF da componente vertical da estação CMLA 10.

Para as componentes horizontais analisadas é possível identificar diferenças, não só para períodos curtos, mas também para períodos longos. Abaixo de 1 s verifica-se a mesma situação identificada nas componentes verticais, com os níveis de ruído em profundidade a serem inferiores comparativamente aos obtidos mais próximo da superfície. Acima de 10 s verificam-se as maiores diferenças, com o sensor mais profundo a registar níveis de ruído mais baixos, sem nunca ultrapassar o NHHM, e com pouca dispersão. Já no sensor localizado a 7 m de profundidade, verifica-se uma situação semelhante ao que foi encontrado nos diferentes locais em que foi realizado este estudo, nos quais se verifica um aumento de ruído nas componentes verticais e com maiores variações nos valores de ruído registado nestas mesmas componentes, não apresentando uma tendência clara nos valores de moda. Tal situação parece confirmar o facto de a profundidade possuir uma grande influência nos níveis de ruído registados, a frequências baixas ou elevadas.

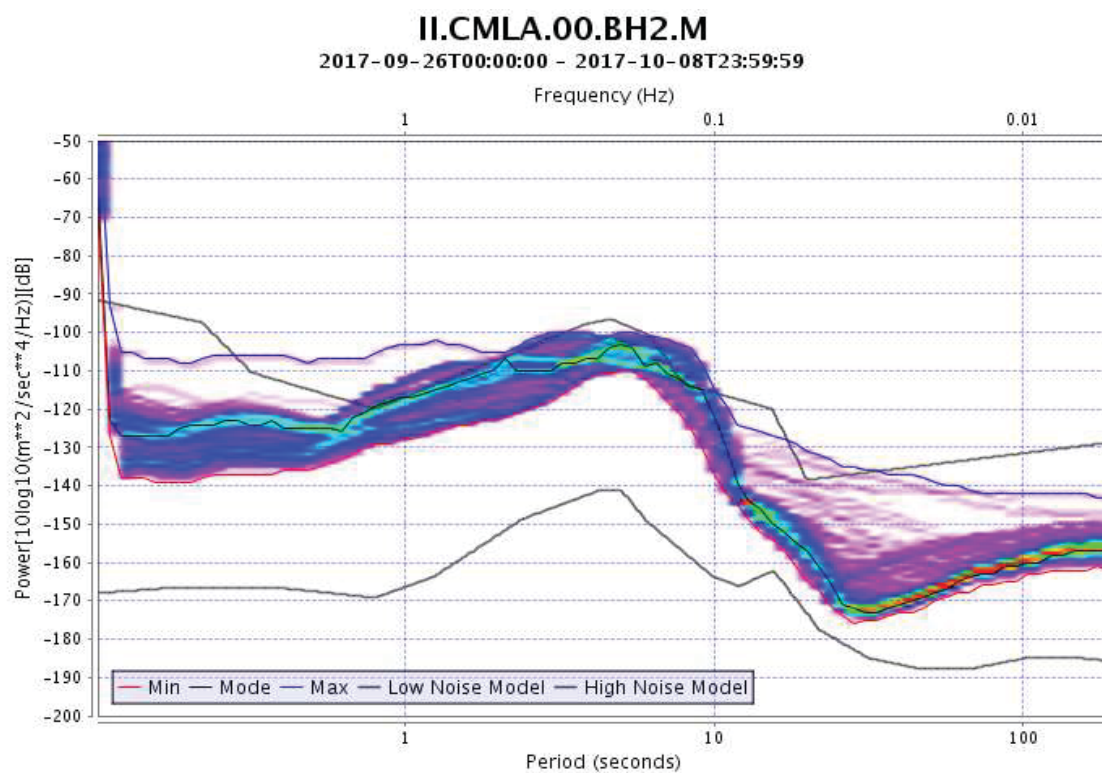


Figura 7.32 - Gráfico PDF da componente horizontal (BH2) da estação CMLA 00.

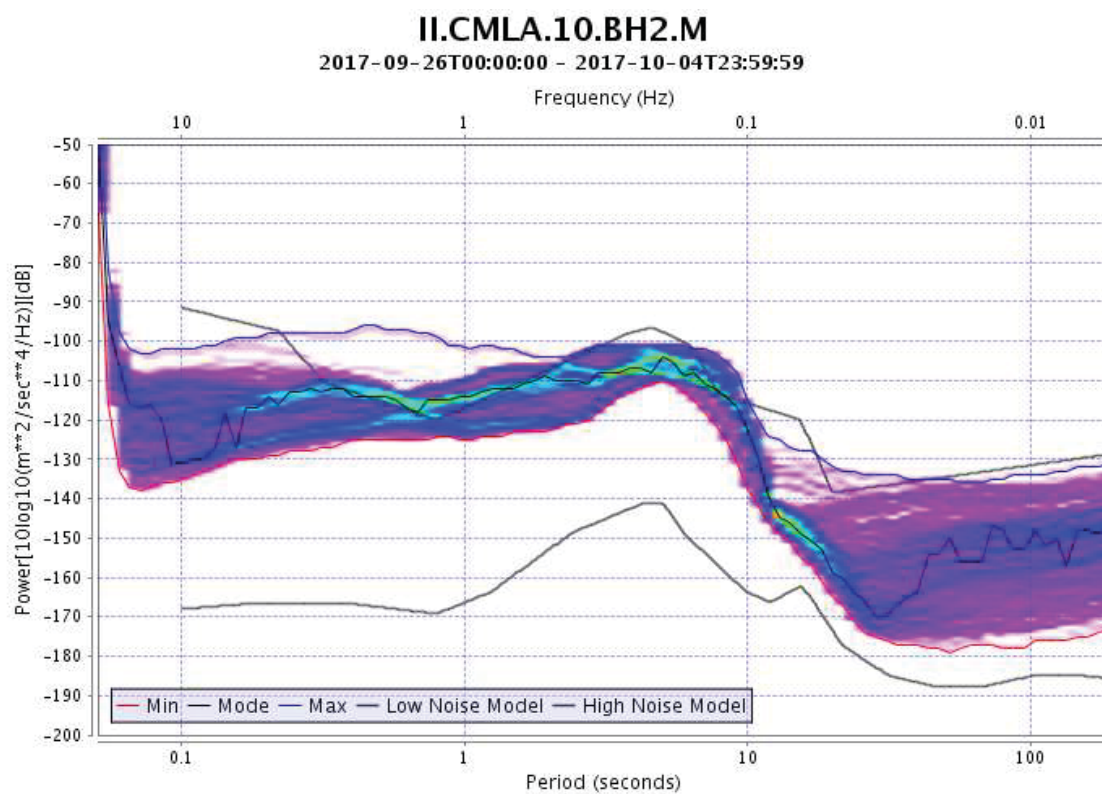


Figura 7.33 - Gráfico PDF da componente horizontal (BH2) da estação CMLA 10.

Ao longo deste trabalho, para períodos superiores a 10 s, foram registados níveis de ruído elevados, o que gerou algumas dúvidas quanto à sua origem e que poderia ser feito para minimizá-lo. No entanto, esta particularidade de CMLA permitiu verificar a influência da profundidade a que o sensor é instalado nos níveis de ruído registados. Apesar disto, este não foi o único fator a influenciar os níveis de ruído para períodos superiores a 10 s, uma vez que logo a seguir a CMLA, em termos de profundidade dos fossos, MESC e SET2 apresentam os fossos mais profundos e, ainda assim, são caracterizados por níveis de ruído elevados para períodos superiores a 10 s

O abrigo sísmico de PFET não possui fosso. No entanto, os níveis de ruído acima de 10 s registados neste abrigo são comparáveis com MESC. Por sua vez, a estação SET2, que apresenta um fosso pouco profundo, registou os níveis de ruído mais elevados para períodos superiores a 10 s. Tendo em consideração apenas a profundidade de instalação dos sensores seria de esperar que em PFET fossem registados níveis de ruído mais elevados acima dos 10 s, facto que não ocorreu.

Com exceção da profundidade dos fossos, a única diferença identificada entre as estações diz respeito à litologia dos locais em que estas estão instaladas. Verificou-se que apenas a estação PFET está associada a uma litologia coesa, pelo que foi possível inferir sobre a importância da seleção de um local com condições litológicas favoráveis. A ação de camadas litológicas com níveis de coesão baixos afeta, sobretudo, as componentes horizontais dos sismómetros. A deformação deste tipo de camadas em resposta a cargas, como a passagem de uma viatura ou por flutuações da pressão atmosférica que causem deformações de camadas superficiais com período longo, é mais acentuada em litologias com baixa coesão dada a menor rigidez da camada (Forbinger, 2012).

Este último ponto permite também estabelecer uma comparação com as diferenças na instalação de sensores de curto período. No caso destes, por não possuírem capacidade de resposta a longos períodos (possuem capacidade de resposta até cerca de 1 s), não conseguem registar sinais associados a variações de temperatura ou de pressão atmosférica, pelo que os cuidados na instalação destes passa por garantir a ausência de fontes de vibração nas proximidades do local de instalação, aspeto este que também tem de ser

considerado na utilização de sensores de banda larga. No entanto, os sensores de curto período não requerem cuidados ao nível de oscilações térmicas ou de pressão atmosférica.

Ao longo deste trabalho referiu-se várias vezes a influência do ruído oceânico, que domina os períodos entre 0,1 e 10 s, e ainda os seus picos de ruído, no qual não se verificou grandes diferenças entre estações nem em períodos temporais diferentes. Apesar de se tratar de ruído, é possível a utilização deste para outros estudos, como a associação do aumento deste ruído a grandes tempestades (Ardhuin *et al.*, 2011). De facto, Davy *et al.* (2014) foram capazes de rastrear o deslocamento de um ciclone pela rede RHUMRUM, recorrendo apenas ao ruído oceânico secundário. Desta forma, o registo deste ruído poderá ser útil em trabalhos futuros.

Vale a pena salientar que para este trabalho os sensores foram instalados de forma temporária. Apesar dos cuidados empregues demonstrarem resultados adequados para instalações temporárias de cerca de 3 anos, noutros estudos (e.g. Fuchs *et al.*, 2015) as instalações permanentes requerem uma preparação mais intensiva do local e da estação, de forma a ter um isolamento térmico ainda maior e maior proteção contra flutuações de pressão atmosférica, que numa estação temporária não são possíveis de aplicar dados os compromissos que são estabelecidos neste tipo de instalações, nomeadamente entre custo, tempo e qualidade de dados. Ainda assim, é possível numa fase posterior a aplicação de medidas que visem a diminuição dos níveis de ruído para períodos longos, podendo desta forma diminuir os níveis de ruído nas componentes horizontais para períodos superiores a 10 s. Forbinger (2012) descreve em detalhe medidas que visam esta diminuição, recorrendo ao uso de materiais que garantam a proteção contra variações térmicas, variações de pressão atmosférica e contra campos magnéticos, nomeadamente a utilização de mantas de fibras sintéticas e materiais refletores em adição à proteção em poliestireno, o uso de cobertura em aço inox que forneça uma proteção hermética e proteções magnéticas ativas.

Tendo por base os resultados obtidos neste estudo, e os objetivos do CIVISA no que toca à expansão e atualização da Rede de Monitorização Sísmica, considera-se que, em virtude dos níveis de ruído registados, o local onde está

instalada a estação MESC possui as condições necessárias, em termos de ruído sísmico, para albergar estações de banda larga de forma permanente.

Na região do Vulcão das Sete Cidades, apesar de não terem sido identificados locais com os níveis de ruído ideais, face aos objetivos iniciais do trabalho, foi necessário a seleção de um local para futura instalação do sensor de forma permanente. Assim, foi selecionado o local onde se encontra instalada a estação de PFET, uma vez que apresentava o melhor compromisso em termos de ruído sísmico registado na zona.

Os dados registados em PPGR revelam níveis de ruído semelhantes a PFET, pelo que a instalação permanente de um sensor de banda larga envolve os mesmos compromissos encontrados para PFET.

A instalação permanente em qualquer um dos locais mencionados poderá ser complementada com a aplicação mais extensiva de medidas de proteção contra variações térmicas e variações de pressão atmosférica, visando a diminuição dos níveis de ruído registados, particularmente, nas componentes horizontais para períodos longos.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Localizado no Oceano Atlântico Norte, na intersecção das placas Norte-Americana, Eurasiática e Africana, o arquipélago dos Açores é constituído por nove ilhas de origem vulcânica. Fruto deste enquadramento, o arquipélago possui um historial de grandes eventos sísmicos e vulcânicos que têm sido relatados desde o seu descobrimento.

O rápido desenvolvimento tecnológico durante o século XX permitiu implementar novas tecnologias nas mais diversas áreas. Estes desenvolvimentos aplicados na área da Sismologia deram origem a sensores mais robustos e sensíveis a uma maior gama de frequências. Os sensores de banda larga conseguem combinar a resposta dos sensores de curto e de longo período num único sensor.

O CIVISA opera a Rede de Monitorização Sísmica no arquipélago dos Açores, sendo a entidade responsável pela assessoria técnica ao Serviço Regional de Proteção Civil e Bombeiros dos Açores. Para tal, possui uma rede composta por 36 estações de curto período instaladas em sete das nove ilhas do arquipélago. De forma a atualizar e melhorar esta rede, o CIVISA pretende proceder à instalação de estações de banda larga na ilha de S. Miguel. Na procura das opções com o melhor custo-benefício, procurou-se verificar se determinados abrigos sísmicos já existentes teriam as condições necessárias para albergar estas novas estações, pelo que foram utilizadas técnicas que permitiram a avaliação dos locais com base nos registos de ruído de fundo das estações.

Assim, tendo em conta a atividade sísmica registada na ilha, bem como a disposição atual da rede e os sensores utilizados, decidiu-se pela instalação destes sensores na região do Vulcão das Sete Cidades, na parte oeste da ilha, bem como na parte central da ilha, na região do Vulcão do Fogo.

Na parte oeste da ilha existem dois abrigos sísmicos em funcionamento, SET2 e SET4, pertencentes à rede sísmica permanente do CIVISA. À partida foi excluído o abrigo SET4 por não possuir as condições mínimas necessárias em termos de energia e de proteção à estação. Como tal, procedeu-se à instalação de uma estação de banda larga em SET2, tendo sido utilizados 22 dias de dados para a análise de ruído.

Nesta estação verificaram-se níveis de ruído no geral elevados. Para frequências mais elevadas, os níveis de ruído elevados foram associados a tráfego rodoviário e a pessoas na proximidade, bem como a atividades desenvolvidas em pastagens em torno da estação. Já para frequências mais baixas, verificaram-se grandes amplitudes de ruído, sendo estes níveis bastante elevados nas componentes horizontais, fruto das condições litológicas do local, bem com da baixa profundidade do fosso existente na estação, que poderia servir como atenuante de ruído. Para além disso, foi possível comprovar os níveis de ruído elevados associados a ruído de origem oceânica. Com base nestes níveis de ruído elevados considerou-se que o local não reunia as condições necessárias para a instalação permanente de uma estação de banda larga.

Dada a necessidade de instalação de uma estação de três componentes na zona oeste da ilha, foi necessário selecionar outro local na região do Vulcão das Sete Cidades. As hipóteses incluíram as estações sísmicas de PSAN e PFET. Com base nos registos da estação de curto período de PSAN, previamente observados, foi possível verificar que a estação possuía bastante ruído durante o período diurno, pelo que, selecionou-se PFET para realizar o estudo de ruído, tendo sido utilizados 18 dias de registo de dados. Para esta estação verificou-se que os níveis de ruído eram inferiores a SET2, especialmente para longos períodos, fruto da litologia do local. Para períodos curtos, as diferenças não eram tão acentuadas, mas mantendo-se os níveis de ruído inferiores em PFET.

Na parte central da ilha selecionou-se a estação MESC dadas as condições desta estação que, com base na sua localização, seria de esperar, à partida, que os níveis de ruído fossem, em geral, baixos. Visto ter o fosso mais profundo da rede sísmica, pretendia-se igualmente verificar a influência deste fator no ruído registado. De facto, foi neste local, que com 18 dias de dados, verificaram-se os níveis de ruído mais baixos da rede CIVISA. Especialmente para baixos períodos, os níveis eram consideravelmente inferiores ao NHNM. Para longos períodos, apesar de a componente vertical registar níveis de ruído baixos, as componentes horizontais registaram níveis que rondavam os valores do NHNM.

Foi ainda possível a utilização de dados anteriormente recolhidos na região do Vulcão das Furnas, no local do Pico do Gaspar. Neste local foram registados níveis de ruído semelhantes aos registados em PFET, pelo que a instalação de

um sensor neste local implica que haja um compromisso entre os níveis de ruído registados e a necessidade de cobertura da rede sísmica permanente na zona em questão.

De forma a melhor compreender os efeitos da profundidade a que são instalados os sensores, utilizou-se a estação CMLA (pertencente à rede IRIS) que possui dois sensores de banda larga a diferentes profundidades; um a 97 m de profundidade e outro a 7 m. Nesta, verificou-se que os níveis de ruído no sensor instalado a 7 m eram semelhantes aos registados em MESC e PFET, com níveis de ruído para longos períodos próximos do NHHM nas componentes horizontais e dispersos, mas com níveis de ruído consideravelmente inferiores, na componente vertical. Já para o sensor instalado a maior profundidade, para longos períodos os níveis de ruído nas componentes horizontais aumentavam em relação à componente vertical, mas de forma menos acentuada e com níveis de ruído mais estáveis. Para além disso, verificou-se uma diminuição de ruído para curtos períodos.

Com base nos resultados, selecionaram-se os locais do Pico do Gaspar e das estações PFET e MESC, uma vez que apresentaram condições suficientes para a instalação de estações de banda larga de forma permanente. Embora os níveis de ruído para certos períodos não seja o ideal, em virtude dos constrangimentos e dos objetivos iniciais, serão os melhores possíveis, tendo-se ainda em consideração fatores incontornáveis como a distância da rede sísmica ao mar e a distribuição da atividade antropogénica. Para além disso, a instalação das estações durante este estudo foi realizada considerando uma instalação temporária, pelo que uma instalação permanente teria, certamente, maiores proteções contra fontes de ruído, melhorando os níveis de ruído a que foi sujeita.

Após a conclusão deste trabalho, o objetivo continua a ser a melhoria da rede sísmica do CIVISA, com a procura de novos locais para instalação de estações de banda larga na região das Furnas e do Nordeste, bem como a instalação das estações de forma permanente nos locais indicados. Para além disto, a melhoria da rede permanente do CIVISA poderá ser estendida ao arquipélago de forma a identificar e colmatar as zonas em que a cobertura da rede sísmica não seja a ideal.

Os dados obtidos neste estudo podem ser utilizados em estudos de outra natureza, tais como a definição de um modelo de ruído para a região dos Açores, ou o estudo da aproximação de tempestades e os efeitos nos níveis de ruído oceânico registados. A definição de um modelo de ruído para a região dos Açores significa que este teria em conta as particularidades da região que possa influenciar os níveis de ruído registados, tal como a localização do arquipélago, em pleno oceano, e as reduzidas distâncias das estações sísmicas à costa, servindo de orientação para os valores de ruído a obter na instalação de novas estações sísmicas.

Com o aumento do número de sensores de banda larga no arquipélago dos Açores será possível a realização de estudos de aproximação de tempestades com base no aumento dos níveis de ruído oceânico registados, podendo ser utilizado no acompanhamento, em tempo real, da progressão de tempestades no arquipélago, sendo necessário para tal, que estas estações possuam níveis de ruído reduzidos.

BILBLIOGRAFIA

- AGNEW, D. C. (2002). History of seismology. *In*: Lee, W. H. K., Kanamori, H., Jennings, P. C. e Kisslinger, C., *International handbook of earthquake and engineering seismology*, 81, 3-11.
- ALLEN, R. M., e KANAMORI, H. (2003). The potential for earthquake early warning in southern California. *Science*, 300(5620), 786-789.
- ARDHUIN, F., STUTZMANN, E., SCNIMMEL, M., e MANGENEY, A. (2011). Ocean wave sources of seismic noise. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C9).
- BAUBION, C. (2013). OECD Risk Management: Strategic Crisis Management. *OECD Working Papers on Public Governance*, 23.
- BENDAT, J. S. e PIERSOL, A. G. (2011). *Random data: analysis and measurement procedures*, 729.
- BEN-MENACHEM, A. (1995). A concise history of mainstream seismology: Origins, legacy, and perspectives. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(4), 1202-1225.
- BORMANN, P., e WIELANDT, E. (2013). Seismic signals and noise. *In*: Bormann, P. *New manual of seismological observatory practice 2 (NMSOP2)*, Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ.
- Broadband Vault Construction (n.d.) *in*: Passcal Instrument Center - Acedido a 29 de setembro de 2017:
www.passcal.nmt.edu/content/instrumentation/field-procedures/seismic-vaults/broadband-vault-construction
- CARMO, R. (2005). *Geologia estrutural da Região Povoação-Nordeste (Ilha de S. Miguel, Açores)*. Dissertação de Mestrado, Universidade dos Açores.
- CARMO, R. (2014). *Estudos de neotectónica na ilha de S. Miguel, uma contribuição para o estudo do risco sísmico no arquipélago dos Açores*. Tese de Doutoramento, Universidade dos Açores.
- CESSARO, R. K. (1994). Sources of primary and secondary microseisms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(1), 142-148.

- COLES L. (2013). A Broad Overview of Western Civilization-Lecture nº12-
Acedido a 7 de setembro de 2017:
www.grg.org/charter/Brain12Civilization.htm
- COOLEY, J. W., e TUKEY J. W. (1965). An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Mathematics of computation*, 19(90), 297-301.
- CORDEIRO, A. (1717). História Insulana das Ilhas a Portugal Sujeytas no Oceano Occidental 3ª edição (reimpressão da ed. de 1717). Região Autónoma dos Açores: Secretaria Regional da Educação e Cultura, 1981.
- DAVY, C., BARRUOL, G., FONTAINE, F. R., SIGLOCH, K., e STUTZMANN, E. (2014). Tracking major storms from microseismic and hydroacoustic observations on the seafloor. *Geophysical Research Letters*, 41(24), 8825-8831.
- FORBINGER, T. (2012). Recommendations for seismometer deployment and shielding. In: Bormann, P. *New manual of seismological observatory practice 2 (NMSOP2)*, Information sheet 5.4, Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ.
- FRUTUOSO, G. (1522-1591). Livro Quarto das Saudades da Terra. In: Frutuoso G., Saudades da Terra. 2ªed. Ponta Delgada: instituto cultural de Ponta Delgada, 2, 1981.
- FUCHS, F., KOLÍNSKÝ, P., GRÖSCHL, G., APOLONER, M. T., QORBANI, E., SCHNEIDER, F., e BOKELMANN, G. (2015). Site selection for a countrywide temporary network in Austria: noise analysis and preliminary performance. *Advances in Geosciences*, 41, 25.
- GASPAR, J.L., QUEIROZ, G., FERREIRA, T., MEDEIROS, A.R., GOULART, C. e MEDEIROS, J. (2015). Earthquakes and volcanic eruptions in the Azores region: geodynamic implications from major historical events and instrumental seismicity. In: Gaspar, J.L., Guest, J.E., Duncan, A.M., Barriga, F.J.A.S., Chester, D.K. (eds.) Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago), *Geological Society of London Memoir*, 44, 33-49.
- GASPARINI, P., e MANFREDI, G. (2014). Development of earthquake early warning systems in the European Union. In: *Early Warning for Geological Disasters*. Springer Berlin Heidelberg, 89-101.

- HAVSKOV, J., e ALGUACIL, G. (2004). *Instrumentation in Earthquake Seismology*. Springer. Netherlands.
- HAVSKOV, J., e OTTEMÖLLER, L. (1999). SEISAN earthquake analysis software. *Seismological Research Letters*, 70(5), 532-534.
- HAVSKOV, J., e OTTEMÖLLER, L. (2010). *Routine Data Processing in Earthquake Seismology: With Sample Data, Exercises and Software*. Springer.
- LOURENÇO, N. (2007). *Tectono-magmatic processes at the Azores triple junction*. Tese de Doutoramento, Universidade do Algarve.
- MACHADO, F. (1959). Submarine pits of the Azores plateau. *Bulletin Volcanologique*, 21(1), 109-116.
- MADEIRA, J. (1998). *Estudos de neotectónica nas ilhas do Faial, Pico e S. Jorge: uma contribuição para o conhecimento geodinâmico da junção tripla dos Açores*. Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa.
- MADEIRA, J.; BRUM da SILVEIRA, A.; HIPÓLITO, A. e CARMO, R. (2015). Active tectonics in the central and eastern Azores islands along the Eurasia–Nubia boundary: a review *In*: Gaspar, J.L., Guest, J.E., Duncan, A.M., Barriga, F.J.A.S., Chester, D.K. (eds.) *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago)*, Geological Society of London Memoir, 44, 15-32.
- MARQUES, R., ZÊZERE, J. L., GASPAR, J. L., e AMARAL, P. (2009). Reconstituição e modelação probabilística da escoada detrítica de Vila Franca do Campo desencadeada pelo sismo de 22 de Outubro de 1522 (S. Miguel, Açores). *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*, 4, 175-182.
- MCNAMARA, D. E., e BOAZ, R. I. (2011). *PQLX: A seismic data quality control system description, applications, and users manual*: U.S. Geological Survey Open-File Report 2010-1292.
- MCNAMARA, D. E., e BULAND, R. P. (2004). Ambient noise levels in the continental United States. *Bulletin of the seismological society of America*, 94(4), 1517-1527.
- MONTALVO, A. (2005). *Concepção, desenvolvimento experimental e teste de sistemas de instrumentação sísmica para a monitorização sismovulcânica*. Dissertação de Mestrado, Universidade dos Açores.

- MONTE ALVERNE, A. D. (1629-1726). *Crónicas da Província de S. João Evangelista das ilhas dos Açores*. 1ª ed. Ponta Delgada: Instituto Cultural de Ponta Delgada, 1961 v. II, 520p.
- ORTIZ, R., GARCÍA, A., e ASTIZ, M. (2001). *Instrumentación en volcanología*. Cabildo Insular de Lanzarote, Servicio de Publicaciones.
- PACHECO, J. M., FERREIRA, T., QUEIROZ, G., WALLENSTEIN, N., COUTINHO, R., CRUZ, J. V., PIMENTEL, A., SILVA, R., GASPAR, J. L., e GOULART, C. (2013). Notas sobre a geologia do arquipélago dos Açores. *Geologia de Portugal. Escolar Editora, Lisboa*, 595-690.
- PETERSON, J. R. (1993). *Observations and Modeling of Seismic Background Noise*: U.S. Geological Survey Open-File Report 93-322.
- POPPE, B. B. (1979). *Historical Survey of U.S. Seismograph Stations: Geological Survey Professional Paper 1096*. Washington, DC: United States Government Printing Office.
- SANTOS, C. E. M. D. (2016). *Estudo de ondas de volume a partir dos registos de ruído sísmico ambiente obtidos na rede de observação WILAS*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa.
- SEARLE, R. (1980). Tectonic pattern of the Azores spreading centre and triple junction. *Earth and Planetary Science Letters*, 51(2), 415-434.
- Seismograph* (2016). *Encyclopædia Britannica*. Acedido a 8 de março de 2017: www.britannica.com/science/seismograph.
- SILVEIRA, D. (2002). *Caracterização da sismicidade histórica da ilha de S. Miguel com base na reinterpretação de dados de macrossísmica: contribuição para a avaliação do risco sísmico*. Dissertação de Mestrado, Universidade dos Açores.
- TRNKOCZY, A., BORMANN, P., HANKA, W., HOLCOMB, L. G., NIGBOR, R. L., SHINOHARA, M., SHIOBARA, H., e SUYEHIRO, K. (2009). Site Selection, Preparation and Installation of Seismic Stations. - In: Bormann, P., *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP)*, Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 1-108.

ANEXOS

ANEXO I - Configuração dos parâmetros das estações

[Home](#) → [Configuration](#) → [Instruments](#) → [Digitiser 13041-4166](#)

Digitiser configuration

Loading configuration from digitiser.

Load complete.

13041-4166

Identity	
System identification	13041
Serial number	4166
Serial number 2	
Software version	v.106 build 57d

Connected devices	
Sensor type	CMG-3T / ESPC ▾
Timing source	NMEA protocol GPS ▾
GPS power cycling	Disabled ▾
Mass auto centering	Disabled ▾

Input gain settings	
Z input gain	x1 (unity) ▾
N input gain	x1 (unity) ▾
E input gain	x1 (unity) ▾
X input gain	x1 (unity) ▾
Z2 input gain	x1 (unity) ▾
N2 input gain	x1 (unity) ▾
E2 input gain	x1 (unity) ▾

Changes to the input gain may affect any level trigger settings. These should be checked after the digitiser has been rebooted.

Device info blocks	
Info block 1 is empty.	
Info block 2 is empty.	
<input type="button" value="Display device info blocks"/>	

Normal operations mode	
The fastest decimator tap must be set to 200sps before switching to strong motion operation.	
<input type="button" value="Enable strong motion operation"/>	<input type="button" value="Force strong motion operation"/>
<input type="button" value="Enable causal filtering"/>	

Compression mode	
Compression mode	Maximum, recommended for 250sps or more (8 bit 250 records, maximum 1000 samples) ▾

Decimator outputs										
Highpass filter <input type="text" value="Disabled"/>										
	Sample Rate		Output							
			Z	N	E	X	Z2	N2		E2
Tap 1	100sps	continuous	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Delete
Refresh <input type="button" value="Enable triggers"/> <input type="button" value="Add new output"/>										
Auxiliary (mux) channels										
Channels										
<input checked="" type="checkbox"/> M8 - Z mass position										
<input checked="" type="checkbox"/> M9 - N/S mass position										
<input checked="" type="checkbox"/> MA - E/W mass position										
<input type="checkbox"/> MB										
<input type="checkbox"/> MC										
<input type="checkbox"/> MD										
<input type="checkbox"/> ME										
<input type="checkbox"/> MF										
Auxiliary (mux) channels sample rate <input type="radio"/> 1sps <input type="radio"/> 2sps <input checked="" type="radio"/> 4sps										
<input type="checkbox"/> Low latency auxiliary (mux channels) output.										
Data flow										
Transmission mode										
<input checked="" type="radio"/> Enable direct transmission mode. Data is acquired in near real-time, without being saved on the DM24/CD24 module. There is a small serial transmission buffer. This is the recommended setting.										
These alternate transmission modes are no longer recommended.										
<input type="radio"/> Enable data filing mode. Data is stored in the DM24's/CD24's flash memory and not transmitted. The DM24/CD24 transmits a regular status heartbeat to inform listeners that stored data is available.										
<input type="radio"/> Enable adaptive data mode. Data is transmitted in near real-time whenever possible. Any unacknowledged blocks are buffered in the DM24's/CD24's flash storage and retransmitted, oldest first, when the line is not being used for real-time traffic.										
<input type="radio"/> Enable FIFO data mode. Data is buffered in the DM24's/CD24's flash storage and transmitted in strict FIFO order. If the link is lost for a period, real-time data will be delayed while the stored data is transmitted.										
<input type="radio"/> Enable dual data mode. Continuous data is transmitted (as if in "direct" mode) while triggered data is stored in the DM24's/CD24's flash (as if in "filing" mode).										
<input checked="" type="radio"/> Enable duplicate mode. Data is transmitted (as if in "direct" mode) and also stored in the DM24's/CD24's flash (as in "filing" mode) - although without the "heartbeat" operation.										
<input type="button" value="Display alternate digitiser transmission parameters"/>										
Ports										
Serial port	Baud rate									

[Home](#) → [Configuration](#) → [Services](#) → [gdi2miniseed](#) → [default](#)

Mini-SEED compressor

General Channels Advanced

General settings

gdi2miniseed converts samples acquired through the system into Mini-SEED records. These are written in to a ring buffer for recording to storage or transmission via SEEDlink.

User description	Mini-SEED compressor. Default instance User label for this Mini-SEED compressor instance
Enable	<input checked="" type="checkbox"/> Enable the compressor at system startup
Buffer size	64 MiB Ring buffer size in MiB
Block size	512 bytes Size of the Mini-SEED data block recorded
Compression	STEIM1 Compression method to use for integer samples

[Config home](#) [Help](#) [Expert](#) [Submit](#)

Generated at 2017-11-10T11:53:38Z by GCS 2.0.11. Portions of output copyright © 2017, Güralp Systems Limited.

[Home](#) → [Configuration](#) → [Services](#) → [gdi2miniseed](#) → [default](#)

Mini-SEED compressor

General Channels Advanced

Channels

Select which channels to compress. See help for more details.

Naming mode	Manual - only channels named below are compressed Select how channels are selected for compression and named	
System name	SEED channel name	
13041-4166E2	4166.HHE.13.02	+ -
13041-4166N2	4166.HHN.13.02	+ -
13041-4166Z2	4166.HHZ.13.02	+ -
		+ -
		+ -
		+ -

[Config home](#) [Help](#) [Expert](#) [Submit](#)

Generated at 2017-11-10T11:53:38Z by GCS 2.0.11. Portions of output copyright © 2017, Güralp Systems Limited.

[Home](#) → [Configuration](#) → [Storage and recording](#)

Storage and recording

Storage device **MiniSEED** GCF Non-seismic data NFS Advanced

MiniSEED

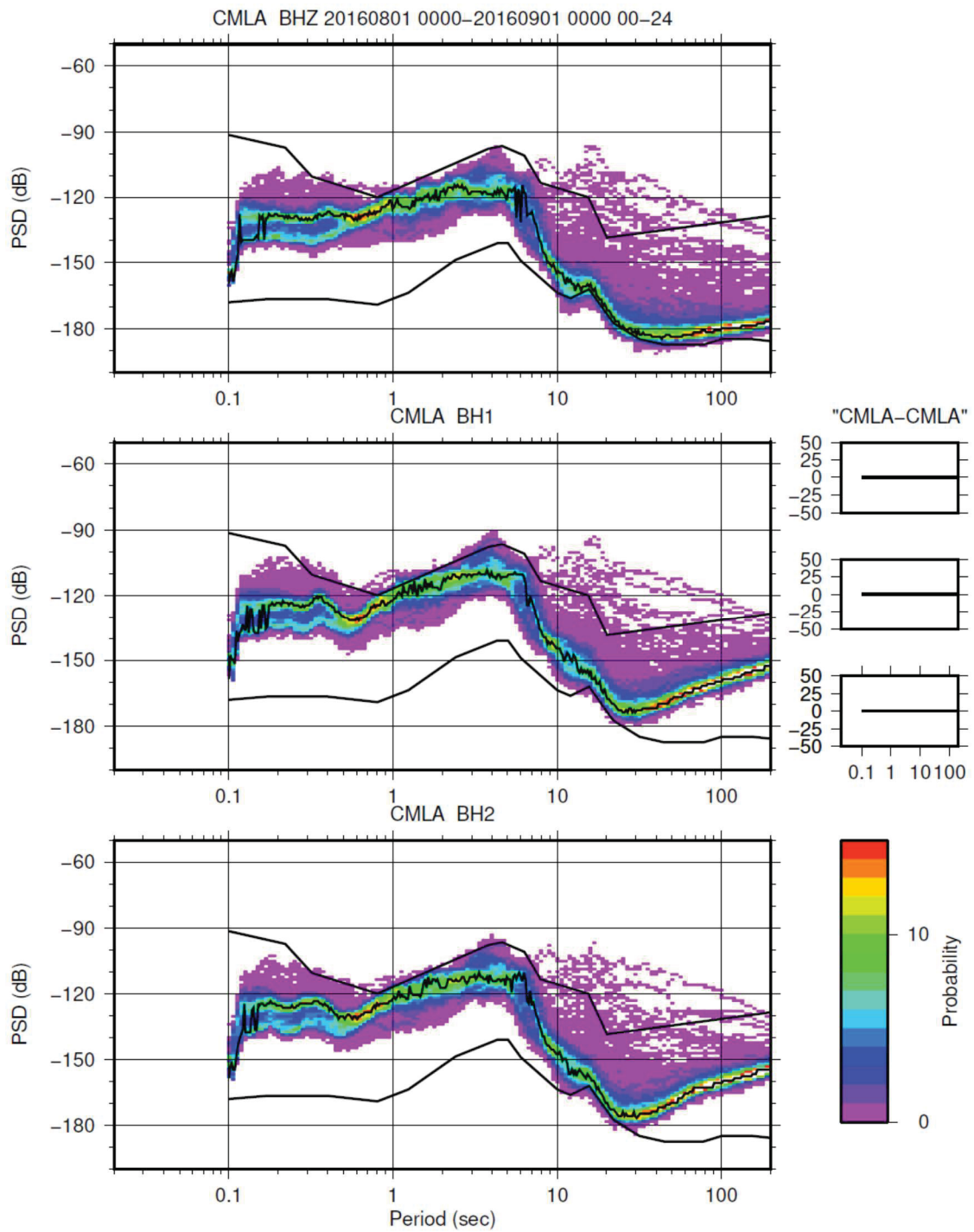
Enabled	<input checked="" type="checkbox"/> Check to enable recording of miniSEED records to storage.
File period	24 hours Time span held in each output file. Large files may be inefficient.
File name	%Y-%m-%d/%s.%c.%l-%H%M.mseed Template for building the filename. See help for details on the tokens.
Flush threshold	50% (recommended) A flush to disk starts when new data in ring buffer exceeds this threshold.
MiniSEED compressor	Mini-SEED compressor. Default instance Select which miniSEED compressor/ringbuffer to get data from.

[Config home](#) [Help](#) [Expert](#) [Submit](#)

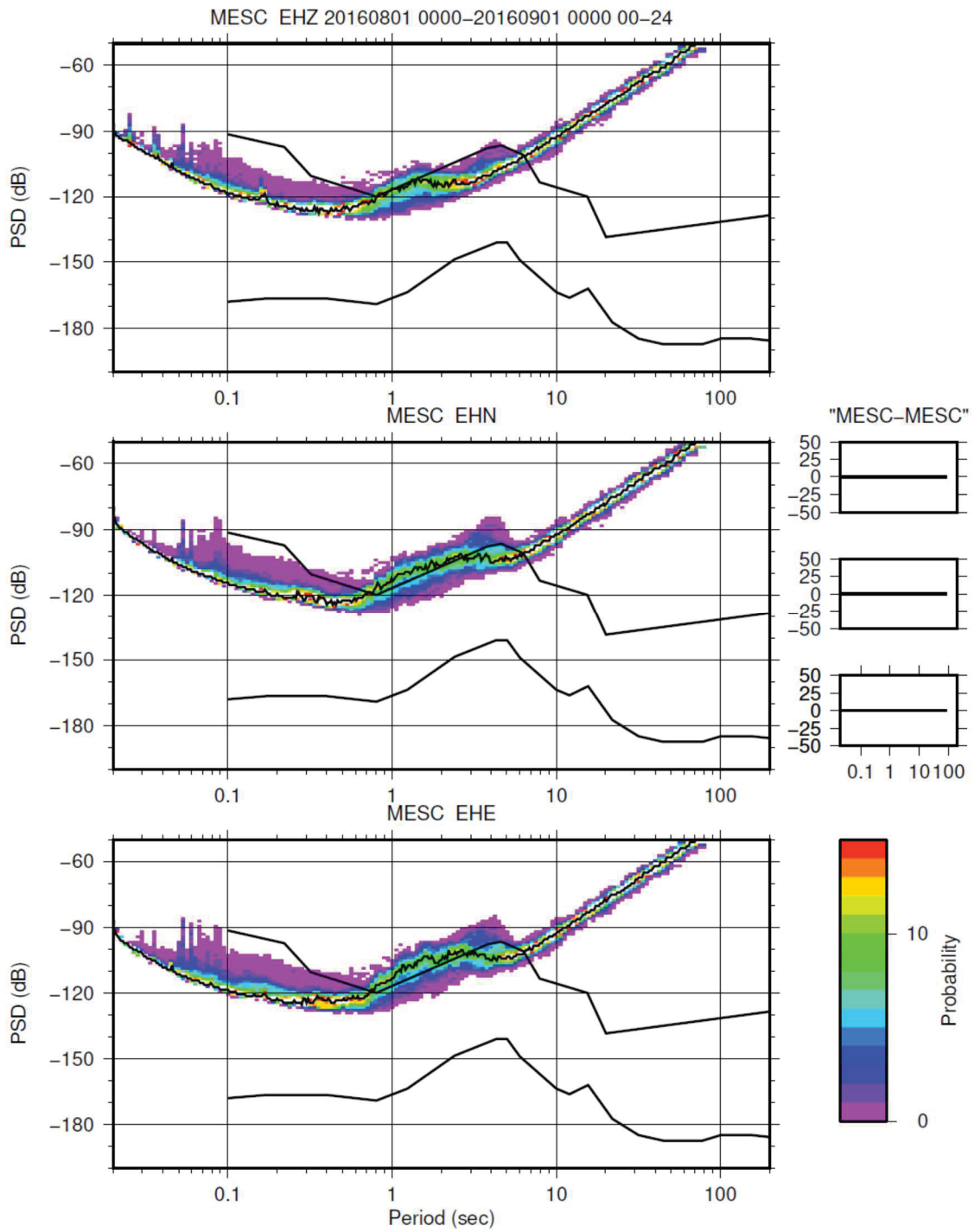
Generated at 2017-11-10T11:54:38Z by GCS 2.0.11. Portions of output copyright © 2017, Güralp Systems Limited.

ANEXO II – PDF das estações permanentes de agosto de 2016

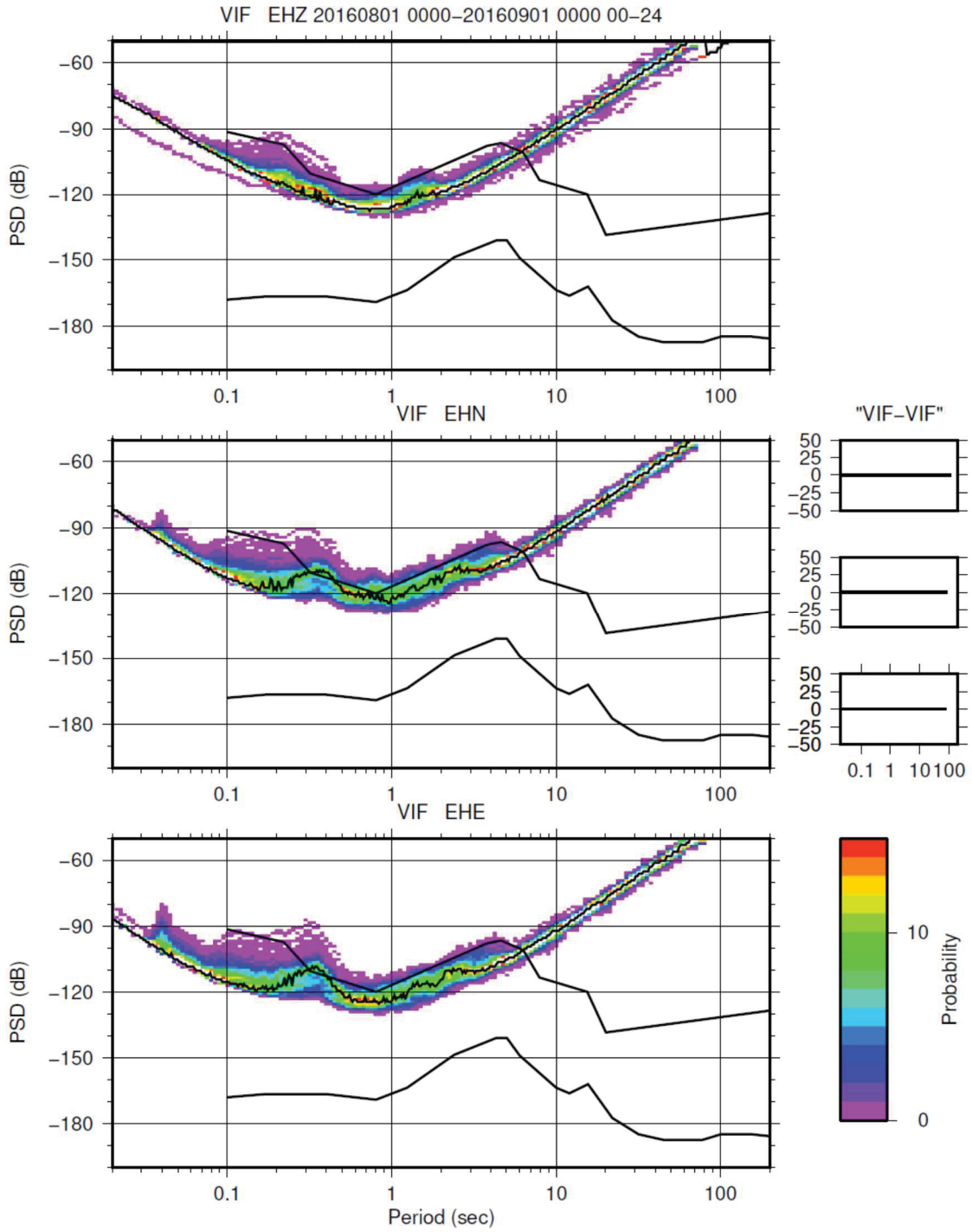
Estação CMLA



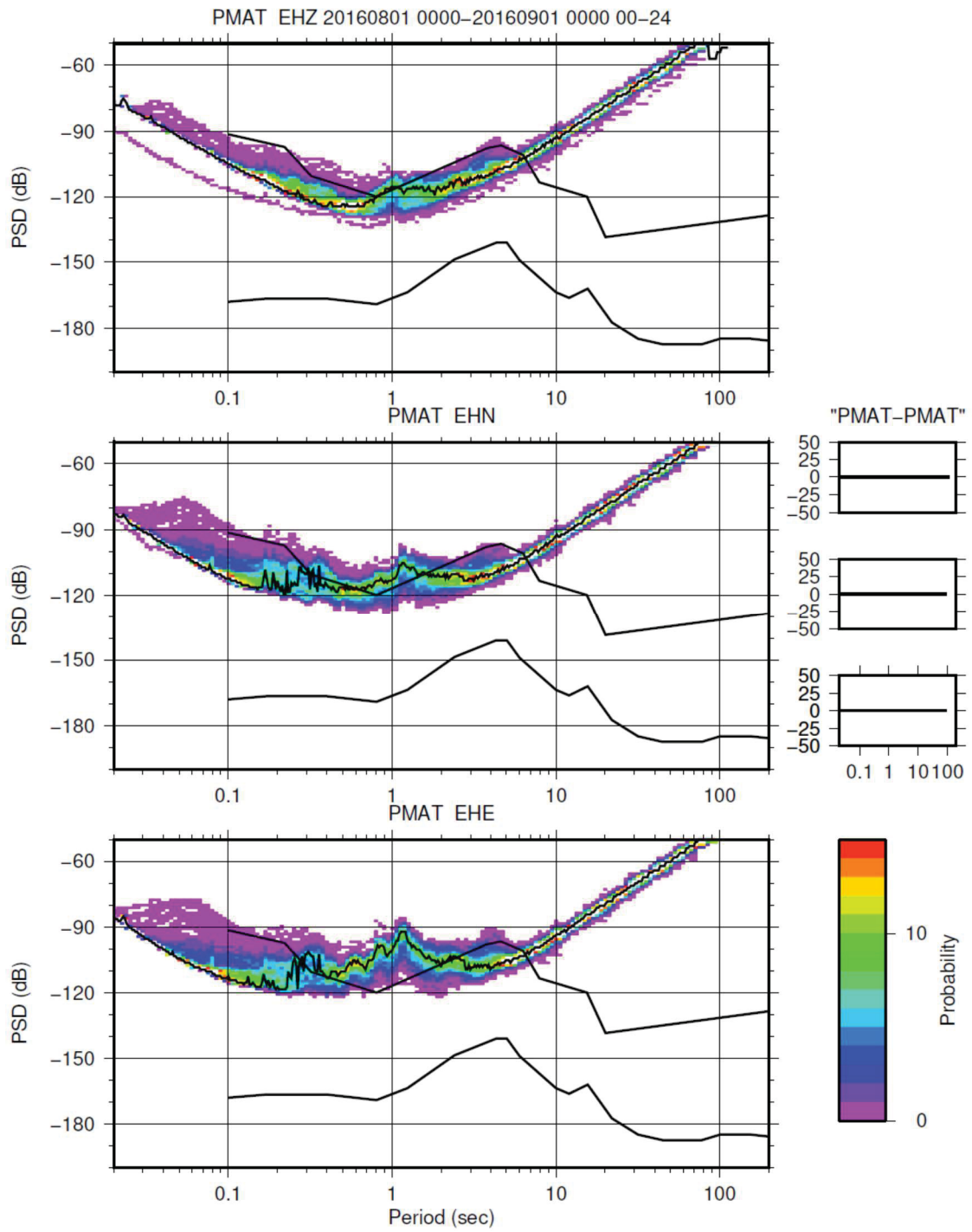
Estação MESC



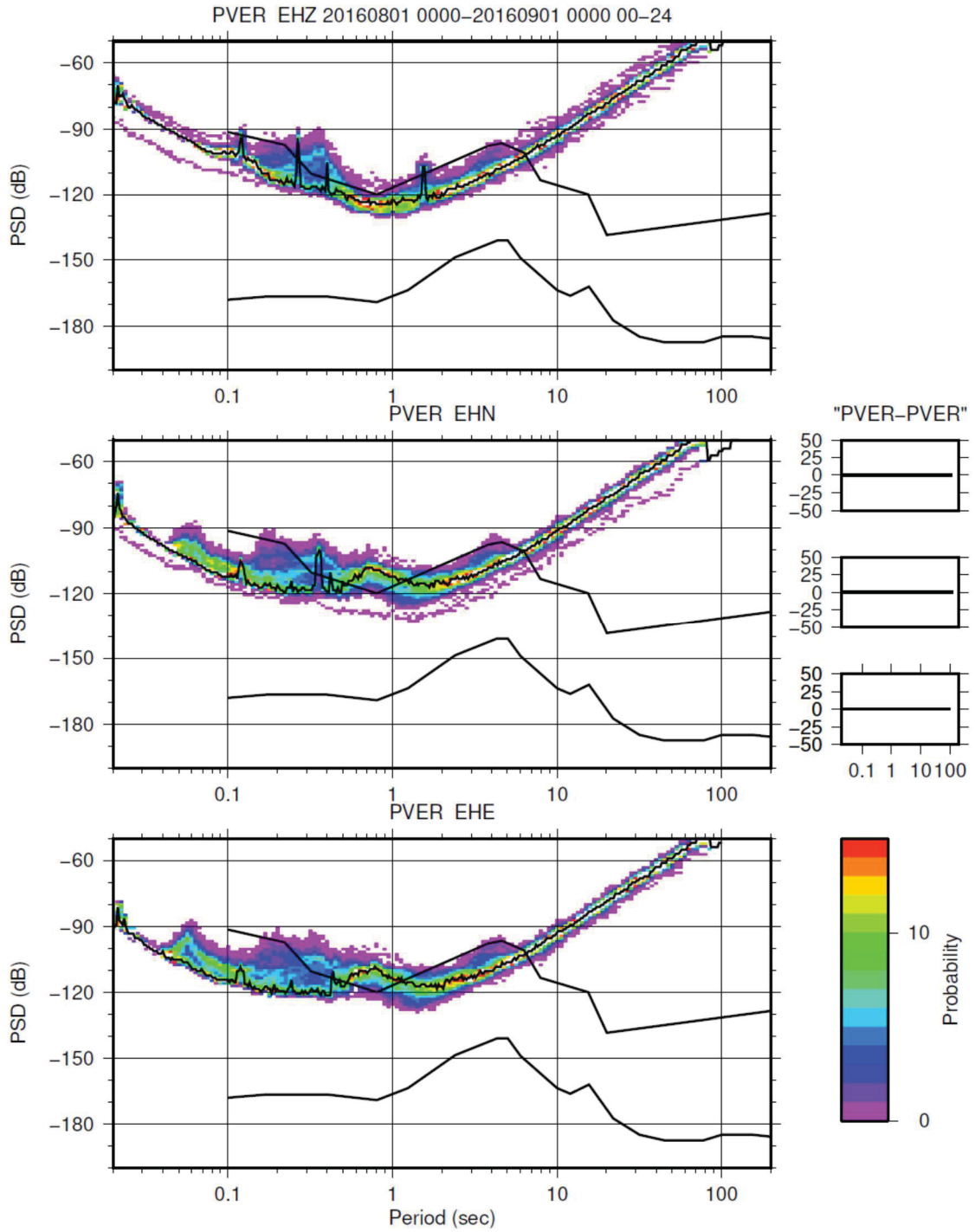
Estação VIF



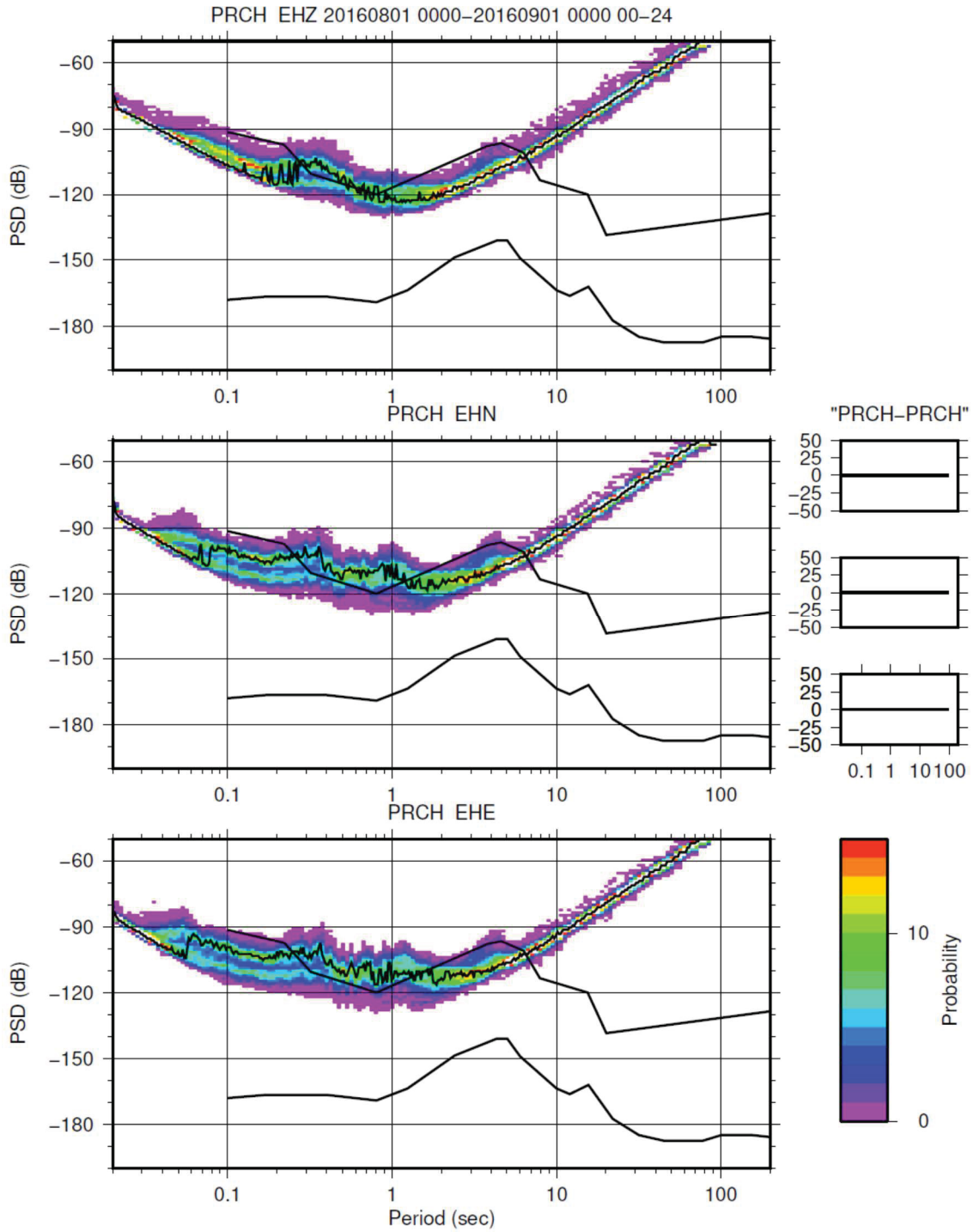
Estação PMAT



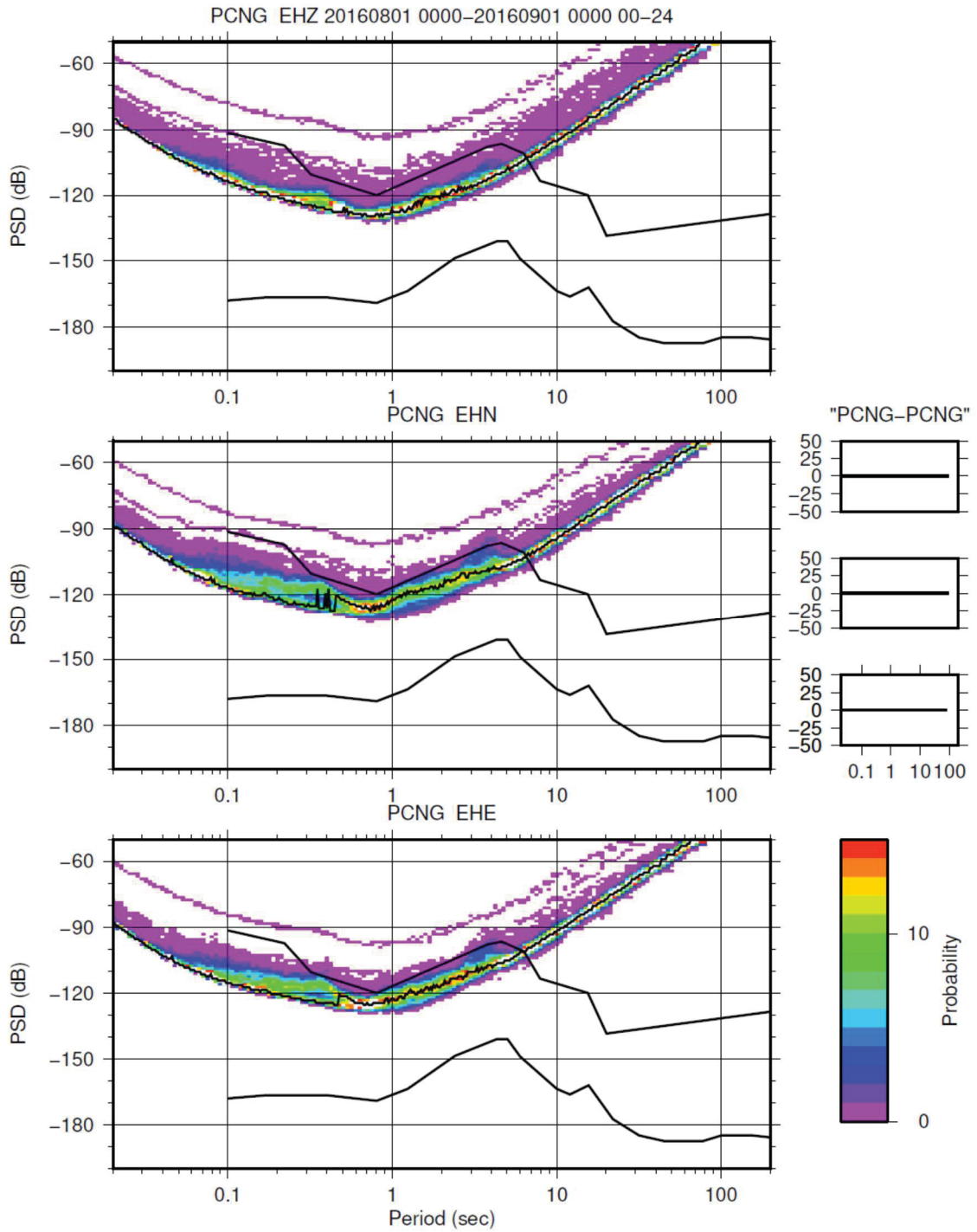
Estação PVER



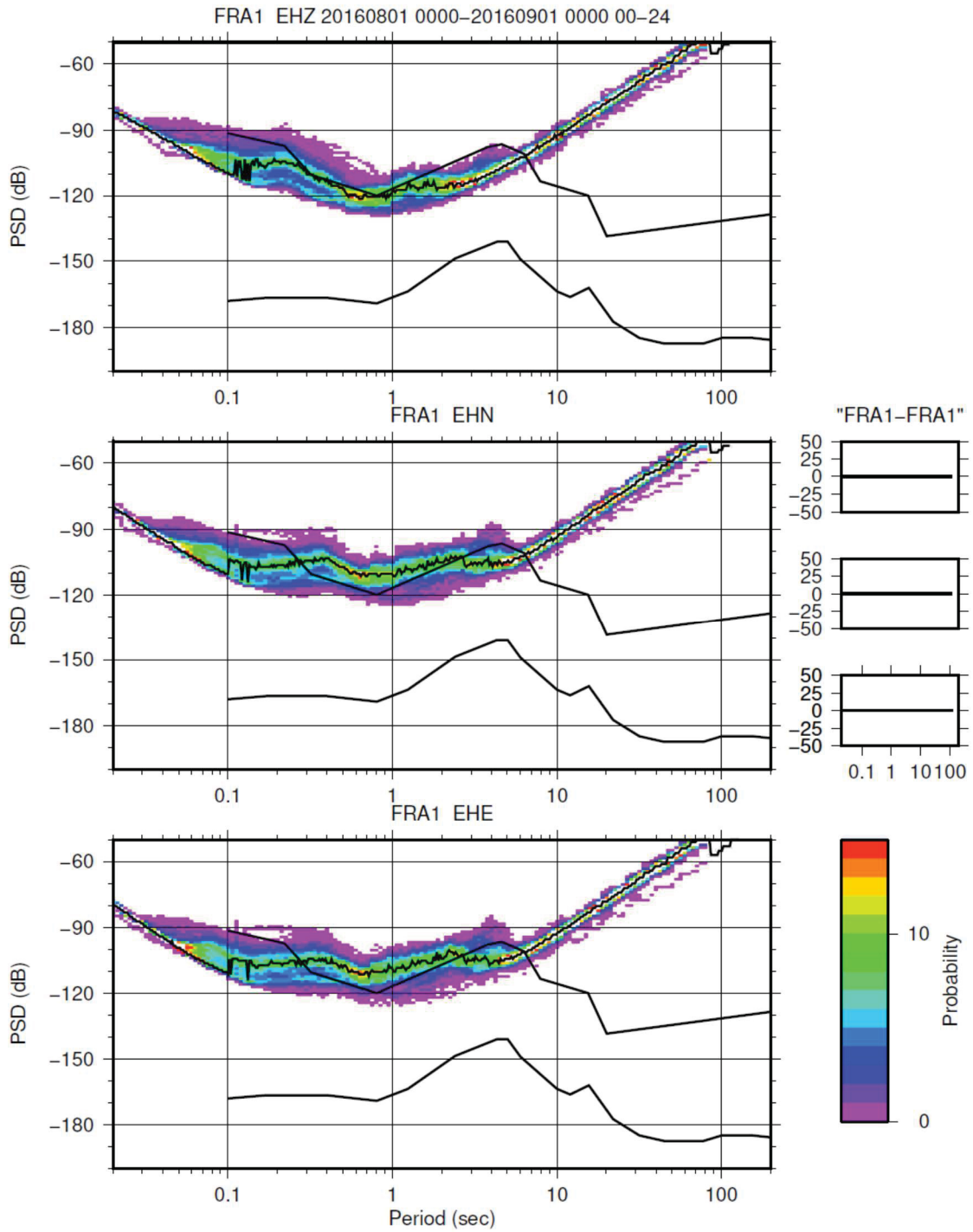
Estação PRCH



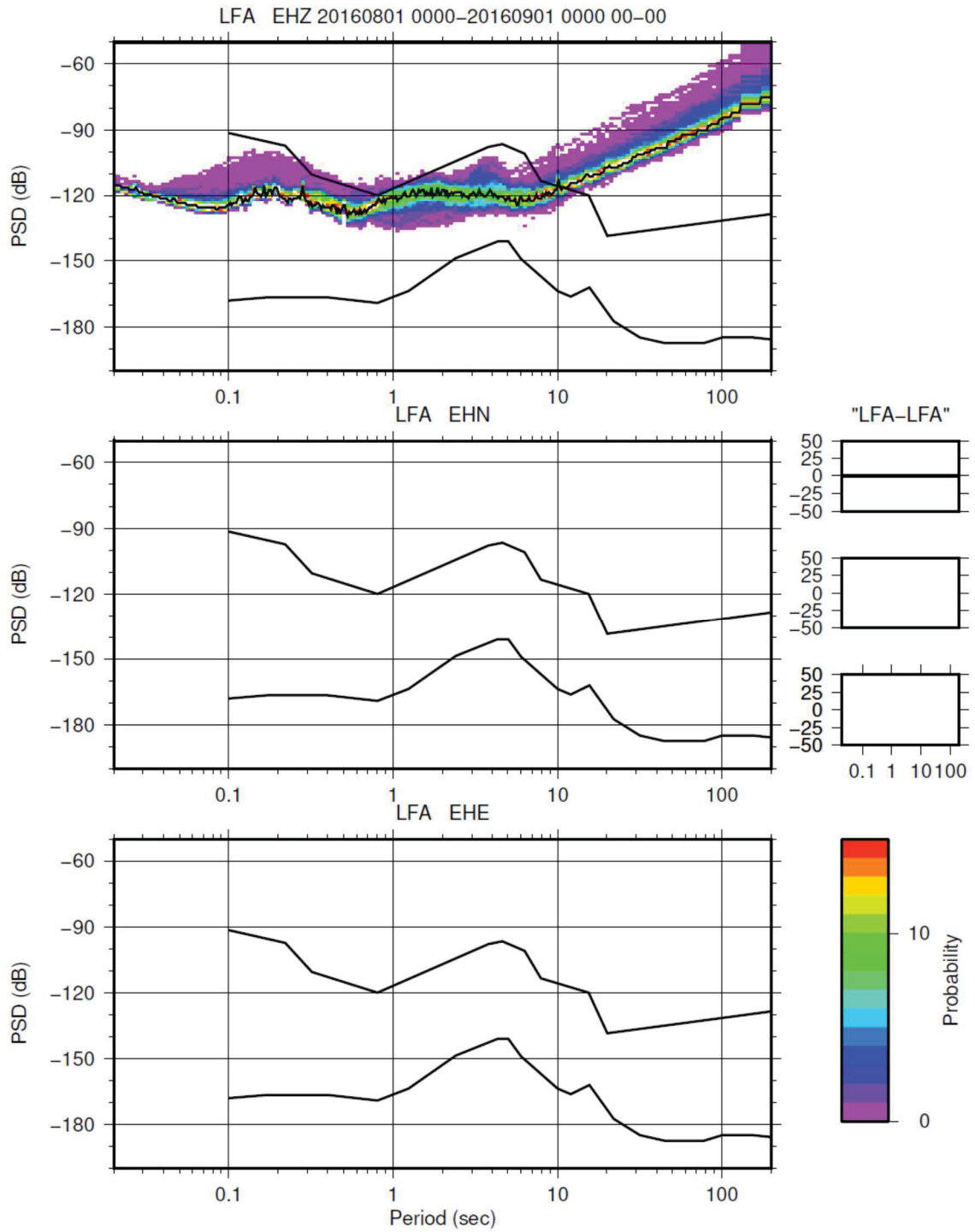
Estação PCNG



Estação FRA1

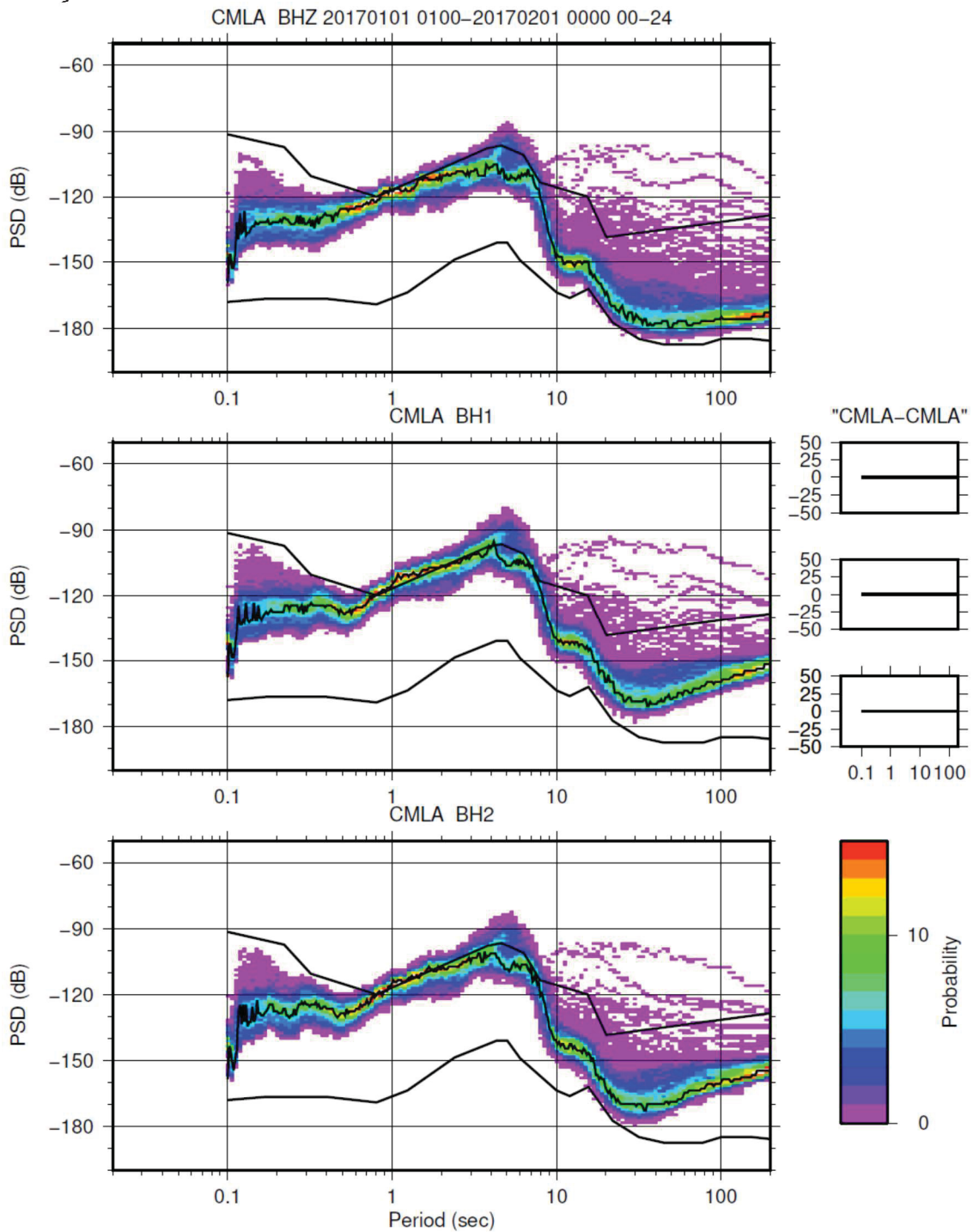


Estação LFA

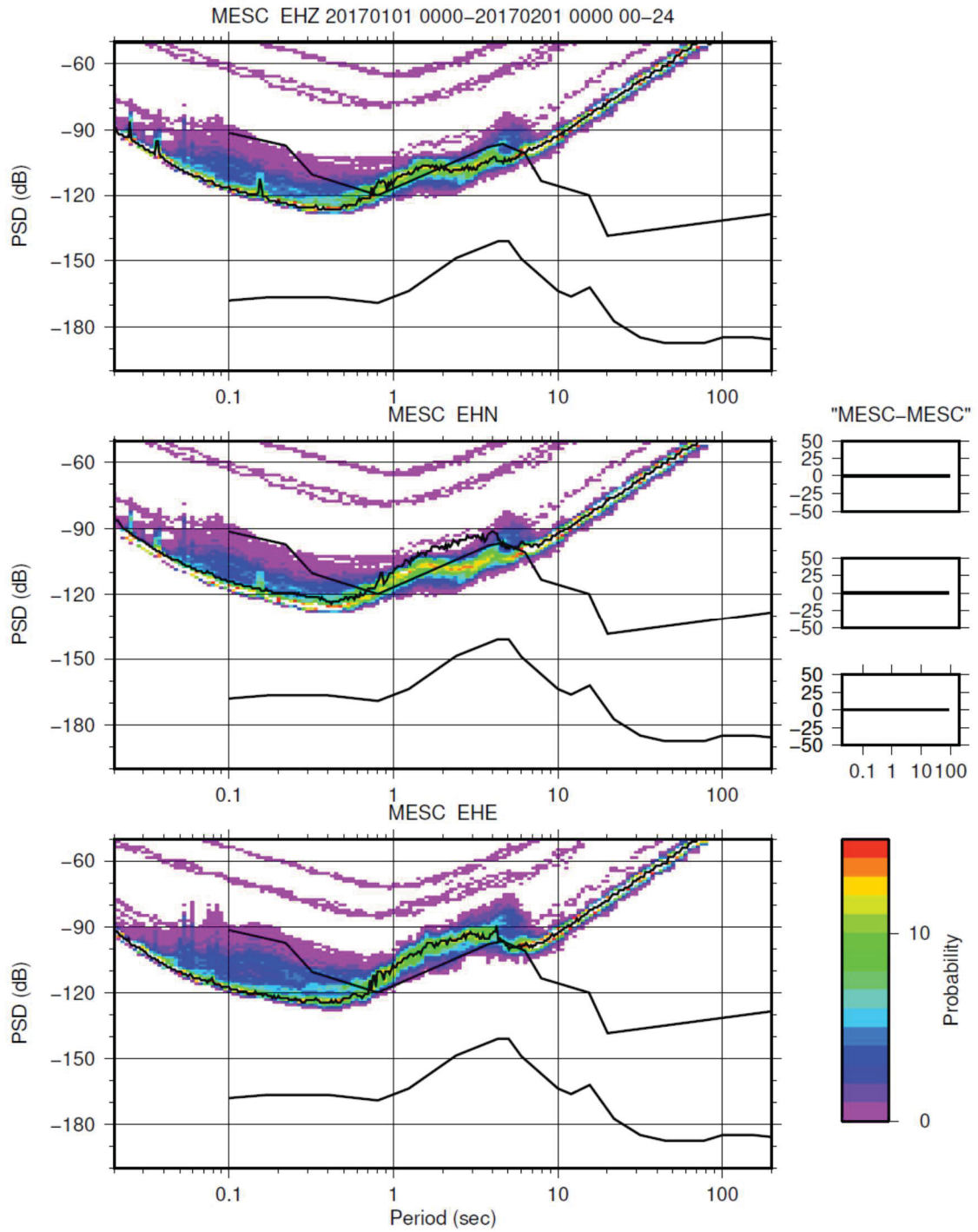


ANEXO III – PDF das estações permanentes de janeiro de 2017

Estação CMLA

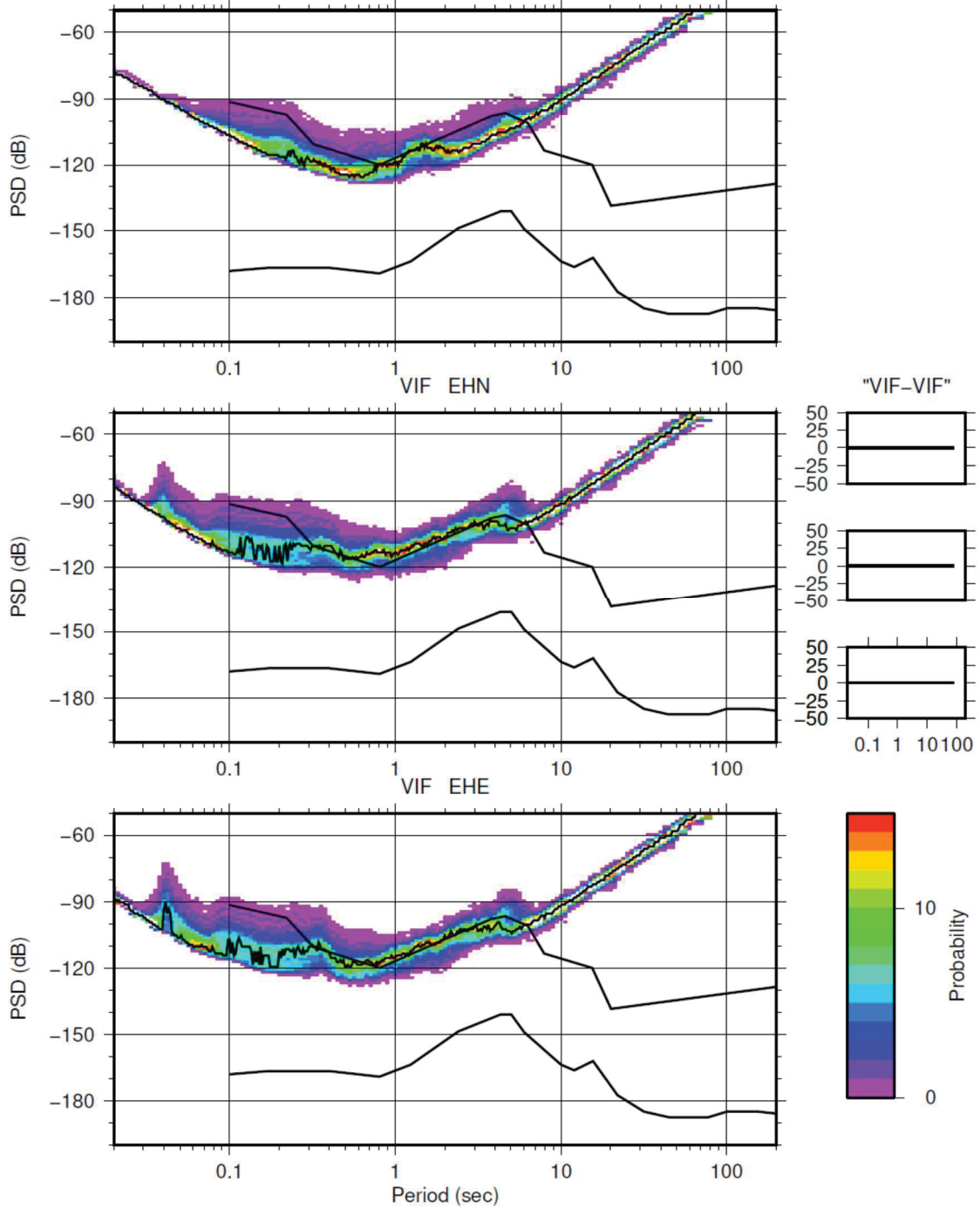


Estação MESC



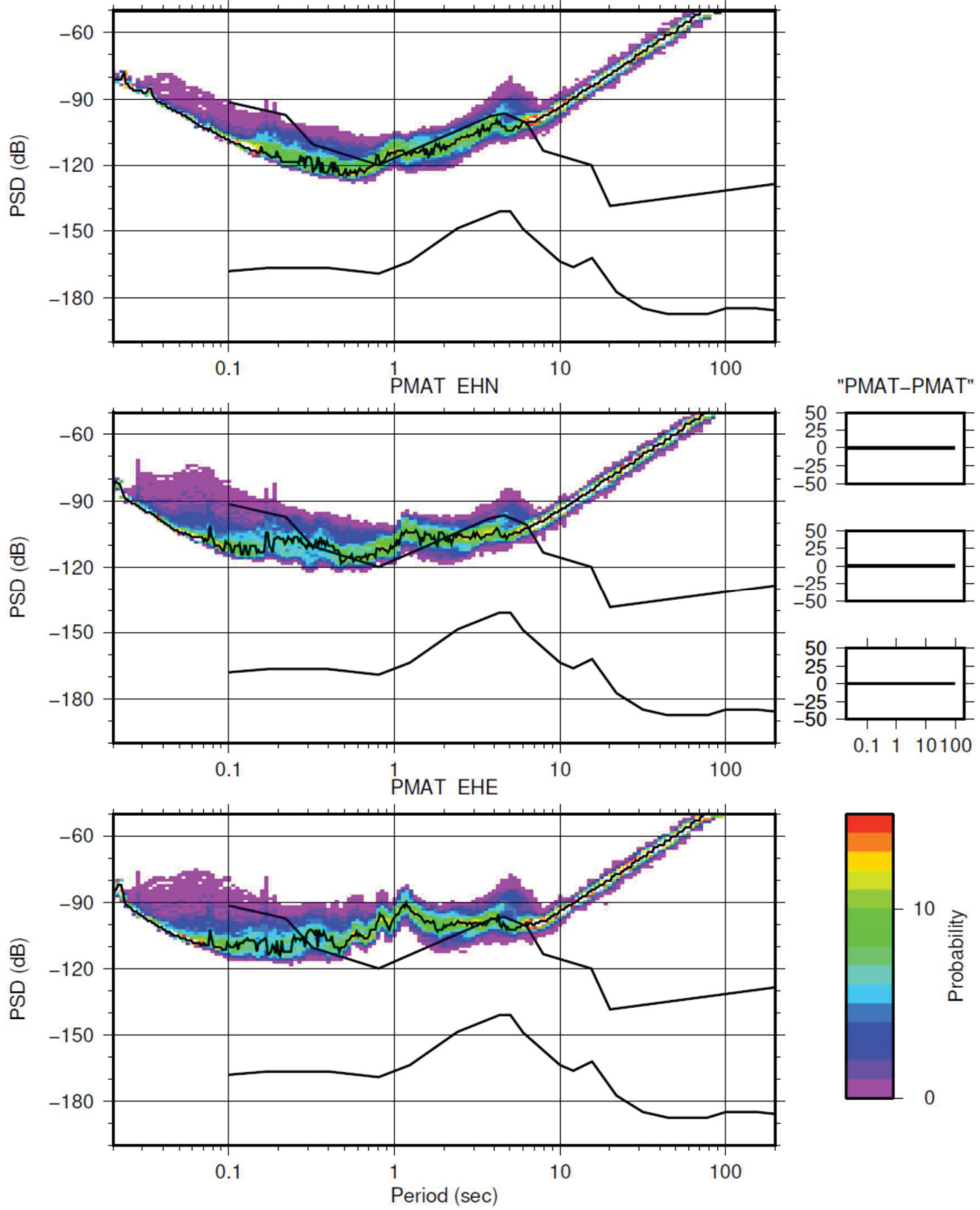
Estação VIF

VIF EHZ 20170101 0100-20170201 0000 00-24



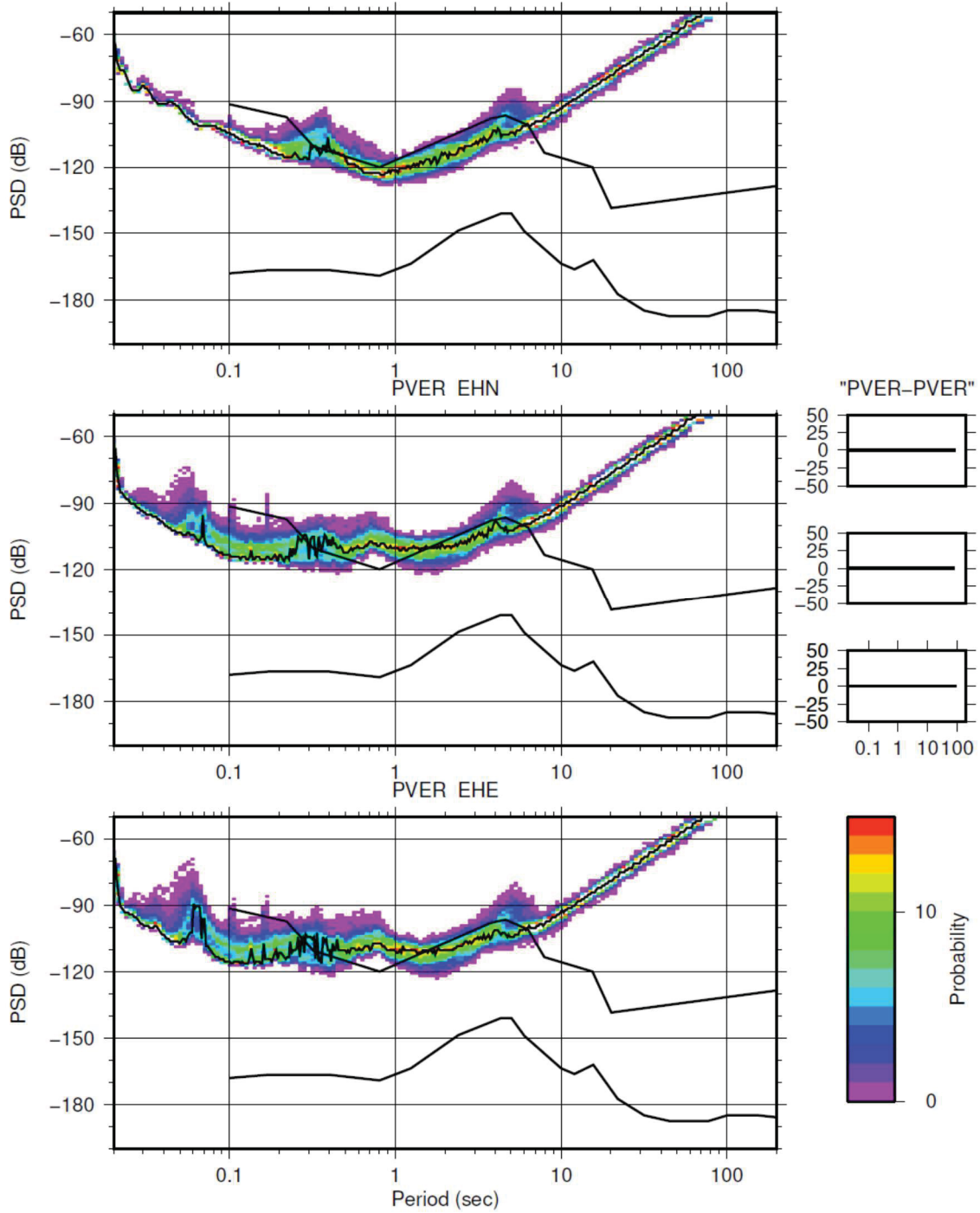
Estação PMAT

PMAT EHZ 20170101 0000-20170201 0000 00-24

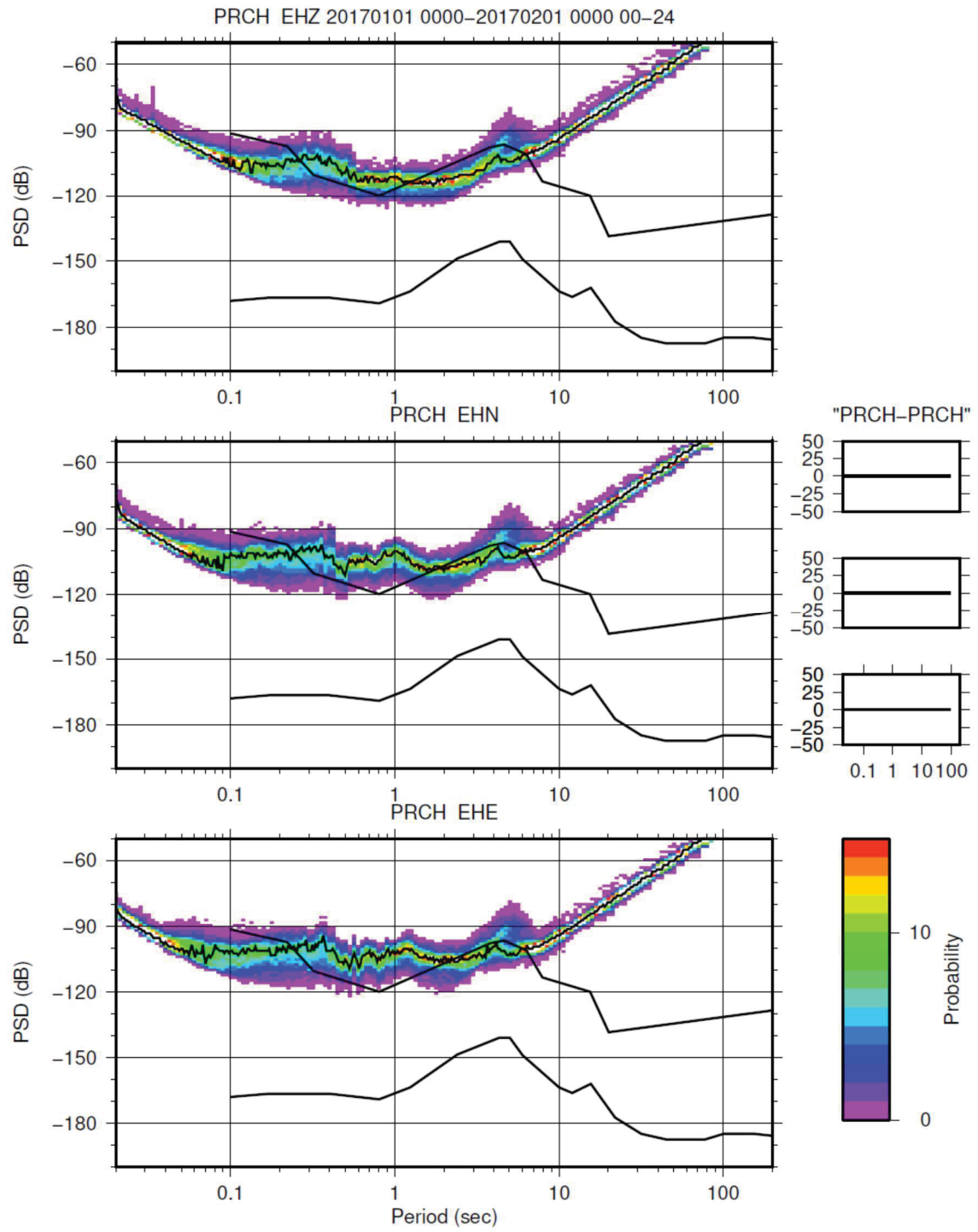


Estação PVER

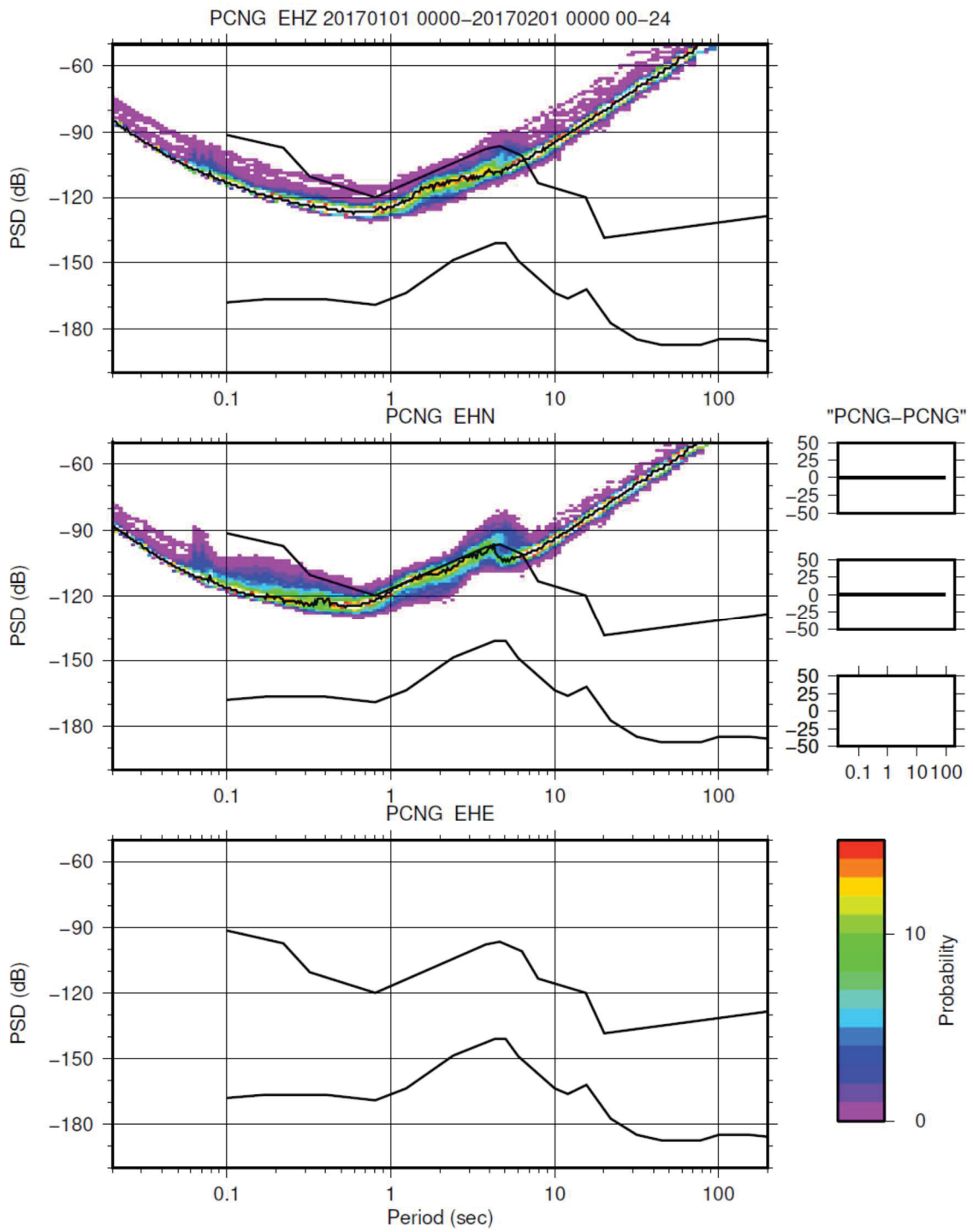
PVER EHZ 20170101 0000-20170201 0000 00-24



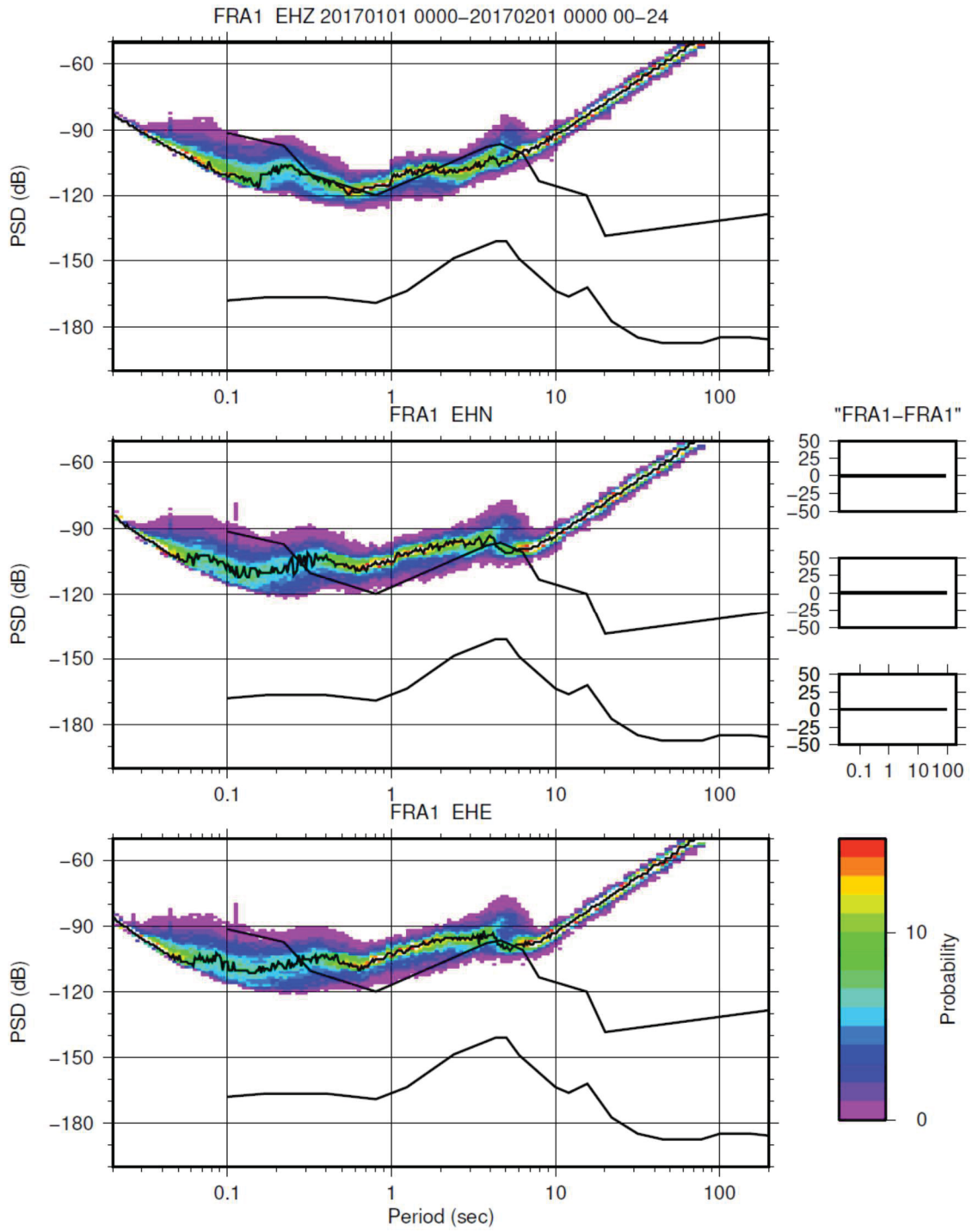
Estação PRCH



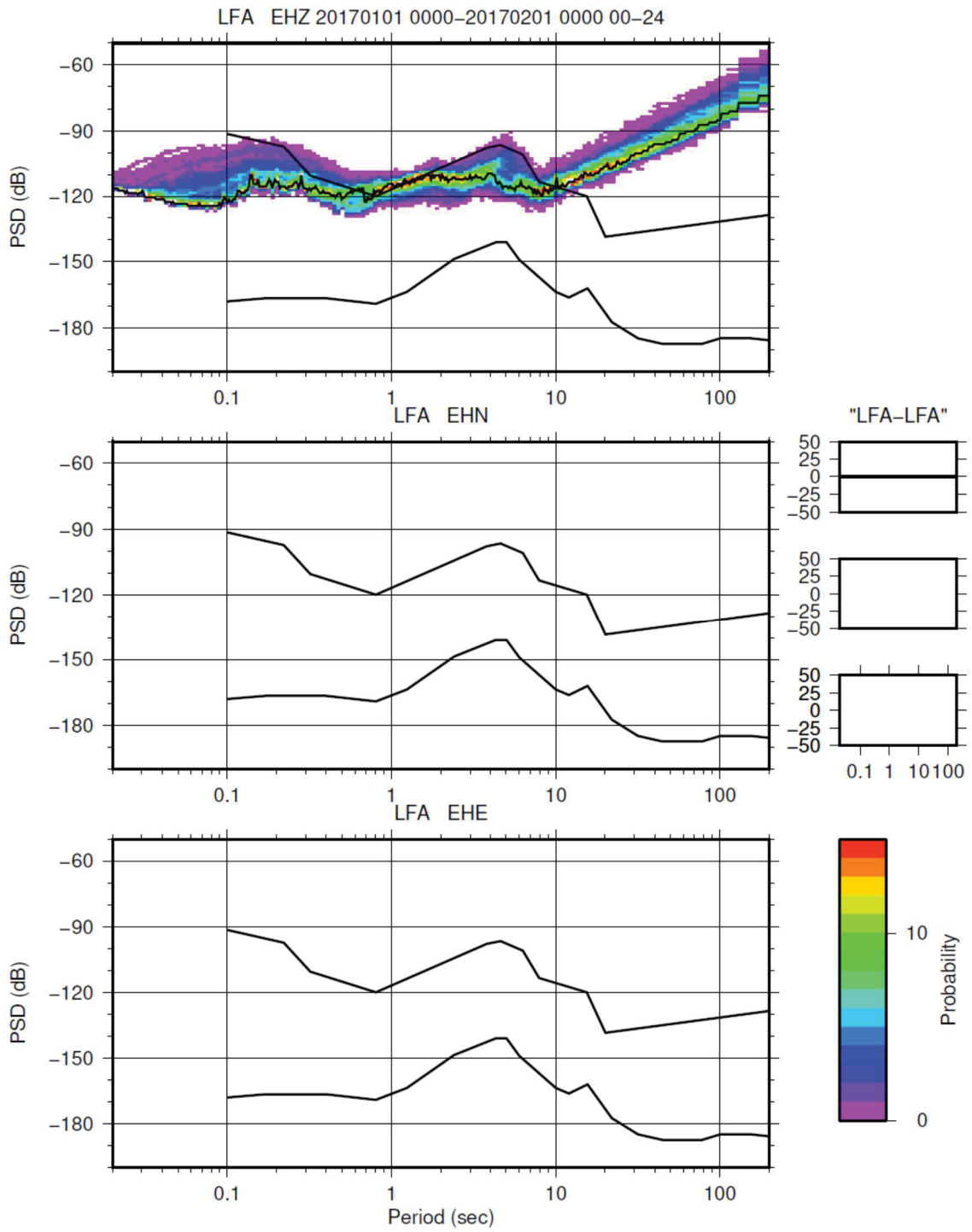
Estação PCNG



Estação FRA1



Estação LFA



UNIVERSIDADE DOS AÇORES
Faculdade de Ciências e Tecnologia

Rua da Mãe de Deus
9500-321 Ponta Delgada
Açores, Portugal

Análise de ruído sísmico para a instalação de estações sísmicas

Rodrigo Sousa Arruda



DM

2018