



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE BARRAGENS DE BETÃO
Núcleo de Geodesia Aplicada

Proc. 0404/11/16113

O RUÍDO DA MEDIÇÃO RELATIVA GNSS COM ELEVADA FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM

Estudo realizado para o PIP 2005 – 2008
n.º 0404/11/16113

Lisboa • Fevereiro de 2009

I&D BARRAGENS DE BETÃO

RELATÓRIO 43/2009 – DBB/NGA

**O Ruído da Medição Relativa GNSS com
Elevada Frequência de Amostragem**

**Le Bruit de la Mesure Relative GNSS avec
Haute Fréquence d'Échantillonnage**

**GNSS Relative Measurement Noise with
High Frequency Sampling**

ÍNDICE DO TEXTO

1 – Introdução	1
2 – Medição das Bases	3
2.1 – A Base LNEC	3
2.2 – Ensaio nas Bases na Barragem do Cabril	11
3 – Simulação de um Sinal com Frequência de 1Hz	23
4 – Considerações Finais	25
5 – Referências	26

ÍNDICE DAS FIGURAS

Figura 1 – Estação GNSS semi-permanente do LNEC (DBB).....	3
Figura 2 – Segunda estação GNSS, no edifício das Componentes (COMP).	4
Figura 3 – Séries temporais das variações das componentes dE (azul), dN (vermelho) e dh (verde) relativas às amostras observadas a 1Hz, no intervalo 12h00 a 18h00 do dia 24 de Janeiro.....	7
Figura 4 – Séries temporais das variações das componentes dE (azul), dN (vermelho) e dh (verde) relativas às amostras observadas a 10Hz, no intervalo 12h00 a 13h00 do dia 26 de Janeiro.....	8
Figura 5 – Períodogramas das séries temporais das variações das componentes dE (azul), dN (vermelho) e dh (verde) relativas às amostras observadas a 1Hz, no intervalo 12h00 a 18h00 do dia 24 de Janeiro.....	9
Figura 6 – Períodogramas das séries temporais das variações das componentes dE (azul), dN (vermelho) e dh (verde) observadas a 10Hz, no intervalo 12h00 a 13h00 do dia 26 de Janeiro.....	10
Figura 7 – Bases Cabril1 (REF1 – CBR) e Cabril2 (REF2 – CBR).	12
Figura 8 – Estação REF1, na margem direita da Barragem.	12
Figura 9 – Estação GNSS REF2, na margem esquerda da barragem, perto da Capela da Senhora da Confiança.	13
Figura 10 – Estação GNSS CBR, no coroamento da Barragem do Cabril, no lado de montante, junto à consola central.....	13
Figura 11 – Séries temporais das variações das componentes dE (azul), dN (vermelho) e dh (verde) relativas às amostras observadas a 1Hz, no intervalo 8h00 a 14h00, da base Cabril1.....	16

Figura 12 – Séries temporais das variações das componentes dE (azul), dN (vermelho) e dh (verde) relativas às amostras observadas a 1Hz, no intervalo 8h00 a 14h00, da base Cabril2.	17
Figura 13 – Períodogramas das séries temporais das variações das componentes dE (azul), dN (vermelho), da base Cabril1, observada a 1Hz, no intervalo 8h00 a 14h00 do dia 23 de Outubro.	18
Figura 14 – Períodograma da série temporal das variações da componente dh da base Cabril1, observada a 1Hz, no intervalo 8h00 a 14h00 do dia 23 de Outubro.	19
Figura 15 – Períodograma da série temporal das variações da componente dE, da base Cabril2 observada a 1Hz, no intervalo 8h00 a 14h00 do dia 23 de Outubro. .	20
Figura 16 – Períodograma da série temporal das variações da componente dN, da base Cabril2, observada a 1Hz, no intervalo 8h00 a 14h00 do dia 23 de Outubro.	21
Figura 17 – Períodograma da série temporal das variações da componente dh, da base Cabril2, observada a 1Hz, no intervalo 8h00 a 14h00 do dia 23 de Outubro. Note-se que o eixo das ordenadas (expresso em milímetros) não se encontra à escala dos outros períodogramas, devido às limitações de formato da página.....	22
Figura 18 – Série temporal (dh) observada a 10Hz na base LNEC (verde) e a sua soma com um sinal de 1Hz e amplitude de 4mm (roxo).	23
Figura 19 – Períodograma da série temporal (dh) observada a 10Hz na base LNEC (verde) e períodograma da sua soma com um sinal com a frequência de 1Hz e amplitude de 4mm (roxo).....	24

ÍNDICE DOS QUADROS

Quadro 1 – Estatísticas das soluções com frequência de amostragem de 1Hz e de 10Hz nas três componentes: média (M), desvio-padrão (DP), desvio máximo (DMAX) e desvio mínimo (DMIN) para a média.	5
Quadro 2 – Estatísticas das soluções com frequência de amostragem de 1Hz, nas três componentes, das bases Cabril1 e Cabril2: média (M), desvio-padrão (DP), desvio máximo (DMAX) e desvio mínimo (DMIN) para a média.....	14

O RUÍDO DA MEDIÇÃO RELATIVA GNSS COM ELEVADA FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM

1 – Introdução

Este Relatório destina-se a apresentar os resultados de ensaios de caracterização do ruído do posicionamento cinemático com o GNSS, em modo relativo, com elevada frequência de amostragem. Designa-se por posicionamento cinemático, o modo de posicionamento em que, na sequência de cada medição da fase da portadora, é calculada uma posição: trata-se de um modo de posicionamento adequado a medir o movimento. De acordo com a velocidade do movimento, são necessárias frequências de amostragem mais ou menos elevadas. O posicionamento diz-se estático quando são usados conjuntos (de tamanho variável) de medições da fase da portadora para calcular uma posição. Deve notar-se que a incerteza de medição com o posicionamento estático é menor do que a incerteza de medição com o posicionamento cinemático.

Esta caracterização do ruído do GNSS tem por objectivo avaliar a sua aptidão para a monitorização de deslocamentos de estruturas flexíveis que podem apresentar movimentos vibratórios com frequências relativamente elevadas – como é o caso dos tabuleiros das pontes atirantadas – em tempo real ou em tempo quase-real.

Para caracterizar o ruído do GNSS, foram medidas, com frequências de amostragem de 1Hz e 10Hz, três bases definidas por duas antenas de precisão – com os respectivos receptores – ao longo de intervalos de tempo, que variaram entre uma e seis horas, durante os quais as bases foram supostas invariáveis.

As três bases observadas no ensaio foram: i) A base LNEC, com cerca de 325m, materializada no *campus* do LNEC, por uma antena estacionada no topo do edifício do DBB e outra antena estacionada no topo do edifício das Componentes; ii) A base Cabril1, com cerca de 150m, materializada na barragem do Cabril, por uma antena estacionada na margem direita, a montante da barragem (REF1) e uma segunda antena estacionada no coroamento da barragem (CBR); iii) A base Cabril2, com cerca de 700m, também materia-

lizada na barragem do Cabril, por uma antena estacionada na margem esquerda, a jusante da barragem (REF2) e pela antena estacionada no coroamento da barragem (CBR).

A base LNEC apresenta condições muito favoráveis de observação: os horizontes das antenas estão desimpedidos, pelo que se consegue observar todos os satélites acima do horizonte e o efeito do erro de reflexão de sinais (*multipath*) é reduzido. A observação das bases Cabril1 e Cabril2 foi afectada por erros de reflexão e mesmo de interrupção de sinal, essencialmente devidos ao trânsito sobre o coroamento da barragem, o que simula, de algum modo, as condições de observação de pontos sobre o tabuleiro de uma ponte.

Nos ensaios referidos foram usados dois receptores GNSS Topcon GB-1000, com acesso às ondas portadoras L1 e L2 do GPS e do GLONASS, cada um deles equipado com uma antena de precisão GNSS Topcon Choke Ring CR-3.

As observações GNSS realizadas nestes ensaios foram processadas com o *software* Pinnacle da Topcon, usando as rotinas de processamento adequadas ao posicionamento cinemático. Os resultados consistiram em séries temporais de posições 3D correspondentes às épocas de observação, com frequências de amostragem de 1Hz e de 10Hz. As posições 3D são expressas em coordenadas relativas a um referencial local, cujas componentes são Este-Oeste (E), Norte-Sul (N) e altitude elipsoidal (h). Foi subtraída a cada série a primeira posição, de modo a obter séries temporais de variações de posição Este-Oeste (dE), Norte-Sul (dN) e vertical (dh).

O relatório apresenta: i) Os gráficos com as séries temporais constituídas pelas variações, nas três componentes Norte-Sul (dN), Este-Oeste (dE) e vertical (dh), observadas ao longo dos ensaios; ii) Estatísticas como as médias, os desvios-padrão e os desvios máximo e mínimo relativamente à média, das várias séries temporais; iii) Periodogramas resultantes da análise de Fourier das séries temporais.

Nas conclusões, é feita uma apreciação global dos resultados, apresentam-se recomendações quanto aos métodos mais adequados para a utilização do GNSS em posicionamento cinemático, na monitorização de deslocamentos, e são propostos estudos a desenvolver futuramente.

2 – Medição das Bases

2.1 – A Base LNEC

2.1.1 – A base LNEC, com cerca de 325m, encontra-se materializada no *campus* do LNEC, por uma antena estacionada no topo do edifício do DBB (Figura 1) e outra antena estacionada no topo do edifício das Componentes (Figura 2). As antenas encontram-se aproximadamente à mesma altitude elipsoidal ($h_{DBB}=156.57m$ e $h_{COMP}=152.74m$).



Figura 1 – Estação GNSS semi-permanente do LNEC (DBB).

Durante os dias 23 a 25 de Janeiro de 2009, a base foi observada continuamente com uma frequência de amostragem de 1Hz. No dia 26 do mesmo mês, a base foi observada, durante três horas, com uma frequência de amostragem de 10Hz.

As observações com uma frequência de amostragem de 1Hz, dos dias 24 e 25 de Janeiro, foram divididas em intervalos consecutivos de 6 horas. Na Figura 3 mostram-se os gráficos das séries temporais com as variações (dE, dN, dh) das coordenadas, relativamente às coordenadas da primeira época. Nos gráficos mostram-se as sub-séries (com 21600 valores) correspondentes ao intervalo entre as 12h00 e as 18h00 do dia 24 de Janeiro.



Figura 2 – Segunda estação GNSS, no edifício das Componentes (COMP).

As observações com uma frequência de amostragem de 10Hz, do dia 26 de Janeiro, foram divididas em 3 intervalos de 1 hora. Na Figura 4, mostram-se os gráficos das séries temporais com as variações (dE, dN, dh) das coordenadas, relativamente às coordenadas da primeira época. Nos gráficos mostram-se as sub-séries (com 36000 valores) correspondentes ao intervalo entre as 12h00 e as 13h00, do dia 26 de Janeiro.

2.1.2 – No Quadro 1, apresentam-se as estatísticas: média (M), desvio-padrão (DP), desvio máximo (DMAX) e desvio mínimo (DMIN) para a média, das três séries temporais de variações de coordenadas (21600 termos) das soluções a 1Hz e das três séries temporais de variações de coordenadas (31600 termos) das soluções a 10Hz.

De acordo com o Quadro 1: i) Os indicadores de incerteza das componentes altimétricas (dh) são maiores do que os indicadores das componentes planimétricas; ii) Os indicadores de incerteza das medições a 1Hz e a 10Hz são muito semelhantes no que diz respeito ao desvio-padrão, embora os valores extremos das medições a 1Hz sejam, em geral, um pouco maiores do que os extremos das medições a 10Hz (o que pode ser explicado pelo facto de as medições a 1Hz corresponderem a um intervalo muito maior (6h00) do que as medições a 10Hz (1h00)); iii) Verifica-se, tanto nas medições a 1Hz como nas medições a 10Hz, que os desvios-padrão são significativamente inferiores aos extremos.

Quadro 1 – Estatísticas das soluções com frequência de amostragem de 1Hz e de 10Hz nas três componentes: média (M), desvio-padrão (DP), desvio máximo (DMAX) e desvio mínimo (DMIN) para a média.

	1Hz			10Hz		
	dE	dN	dh	dE	dN	dh
M	-0.2mm	4.1mm	-11.9mm	-1.4mm	-3.6mm	-4.7mm
DP	3.1mm	3.3mm	7.0mm	3.2mm	2.7mm	6.1mm
DMAX	17.4mm	19.0mm	32.9mm	12.4mm	10.7mm	27.5mm
DMIN	-14.1mm	-13.1mm	-39.6mm	-11.9mm	-13.9mm	-24.7mm

2.1.3 – As séries temporais das variações de coordenadas (dE, dN e dh), para as frequências de amostragem de 1Hz e de 10Hz, foram submetidas a uma análise espectral. As séries de 1Hz foram expandidas, em série de Fourier, no intervalo entre zero e seis horas (21600 épocas com um intervalo de amostragem de 1s). As séries de 10Hz foram expandidas, em série de Fourier, no intervalo entre zero e uma hora (36000 épocas com um intervalo de amostragem de 0.1s).

A partir das densidades espectrais, foram construídos os respectivos periodogramas (Casaca e Lima, 2008b) que se apresentam na Figura 5 (1Hz) e na Figura 6 (10Hz). Para facilitar a análise dos periodogramas, são representadas as amplitudes (em mm) correspondentes aos períodos das componentes das séries de Fourier e não os seus quadrados, como é habitual.

No caso das medições a 1Hz, as três séries de Fourier têm 10799 termos, correspondentes a frequências entre 0.5Hz (frequência de Nyquist) – período mínimo de 2s – e (1/21600)Hz – período máximo de seis horas.

No caso das medições a 10Hz, as três séries de Fourier têm 17999 termos, correspondentes a frequências entre 5Hz (frequência de Nyquist) – período mínimo de 0.2s e (1/3600)Hz – período máximo de uma hora.

A análise dos periodogramas da Figura 5 (medições a 1Hz) mostra que: i) Em planimetria, as amplitudes são (com exceção de um máximo na componente dN correspondente ao período de seis horas), inferiores a um milímetro; ii) Em altimetria, as amplitudes são sempre inferiores a 1.6mm.

A análise dos periodogramas da Figura 6 (medições a 10Hz) mostra que: i) Na componente dE, as amplitudes são todas inferiores a 2mm; ii) Na componente dN, as amplitudes são todas inferiores a 1mm; iii) Na componente dh, as amplitudes são todas inferiores a 3mm.

Se, nas Figuras 5 e 6, considerarmos apenas os períodos mais baixos (frequências mais altas) com valores inferiores a limites entre 10s (0.1Hz) e 100s (0.01Hz), as amplitudes correspondentes são homogêneas e inferiores a poucas décimas de mm, parecendo traduzir apenas o ruído branco (Casaca e Lima, 2008a).

Os valores mais elevados das amplitudes, que correspondem a períodos da ordem de vários minutos, são presumivelmente devidos a alterações lentas do efeito da reflexão dos sinais dos satélites GNSS e da refração da troposfera.

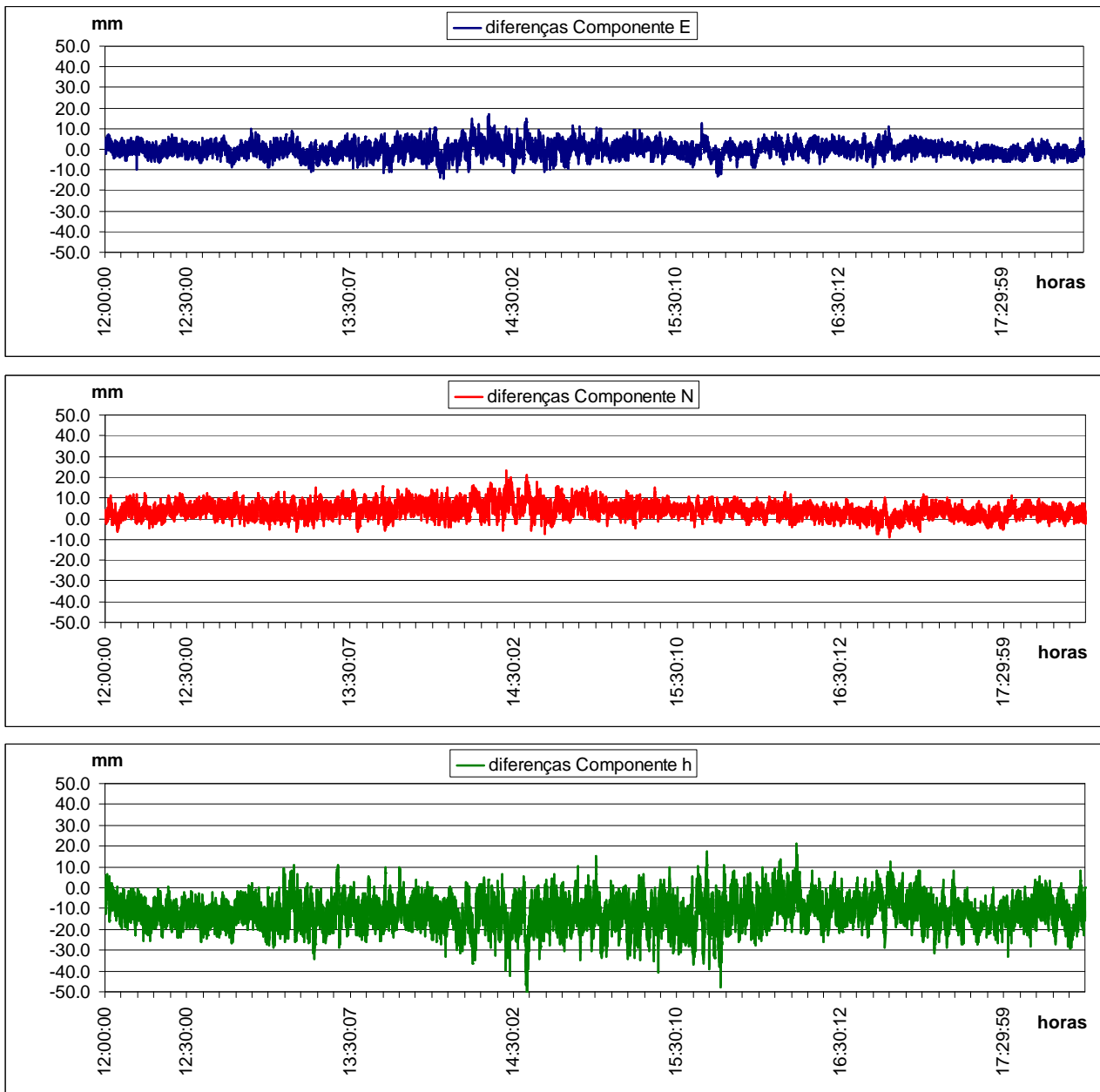


Figura 3 – Séries temporais das variações das componentes dE (azul), dN (vermelho) e dh (verde) relativas às amostras observadas a 1Hz, no intervalo 12h00 a 18h00 do dia 24 de Janeiro.

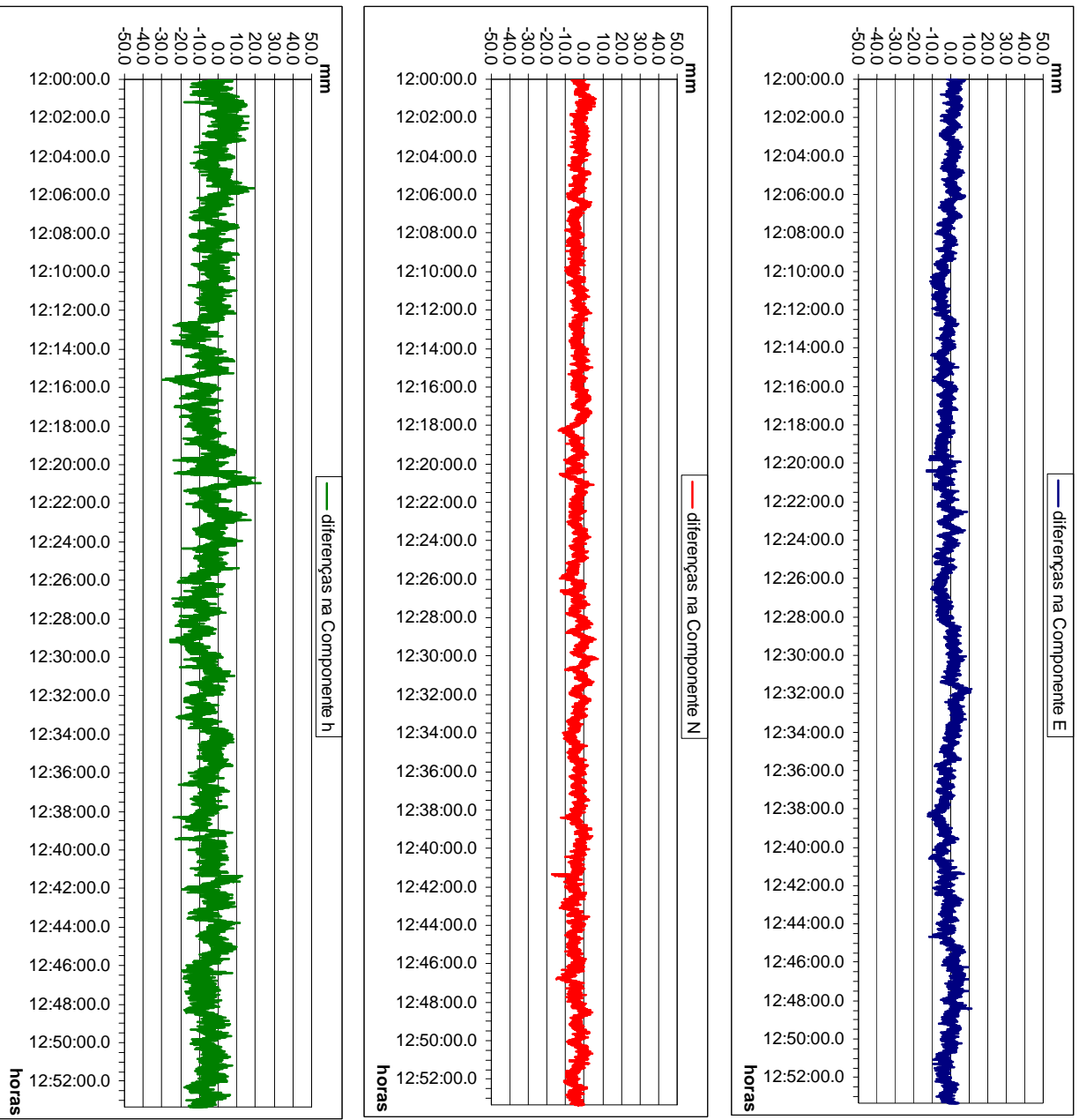


Figura 4 – Séries temporais das variações das componentes dE (azul), dN (vermelho) e dh (verde) relativas às amostras observadas a 10Hz, no intervalo 12h00 a 13h00 do dia 26 de Janeiro.

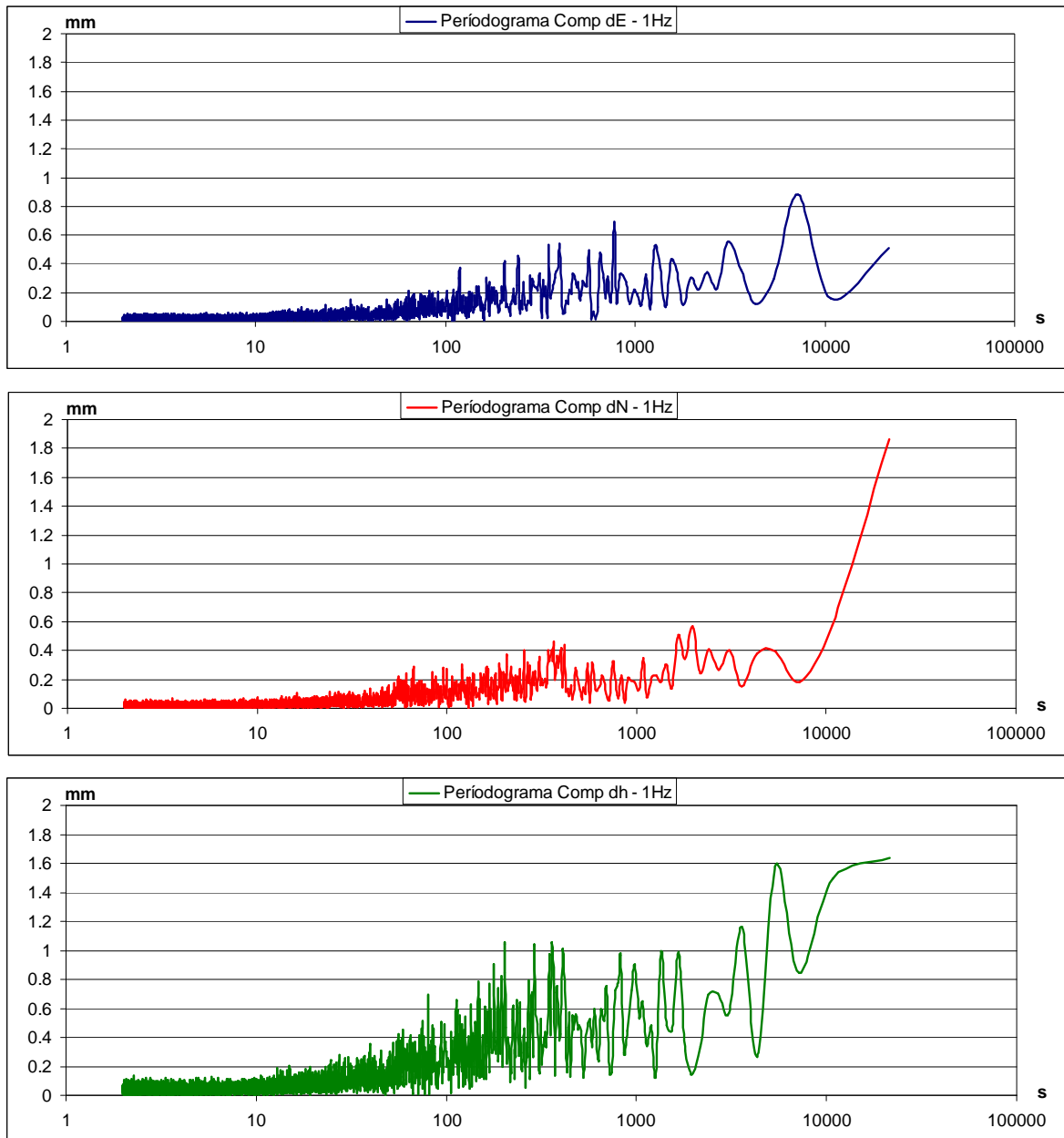


Figura 5 – Períodogramas das séries temporais das variações das componentes dE (azul), dN (vermelho) e dh (verde) relativas às amostras observadas a 1Hz, no intervalo 12h00 a 18h00 do dia 24 de Janeiro.

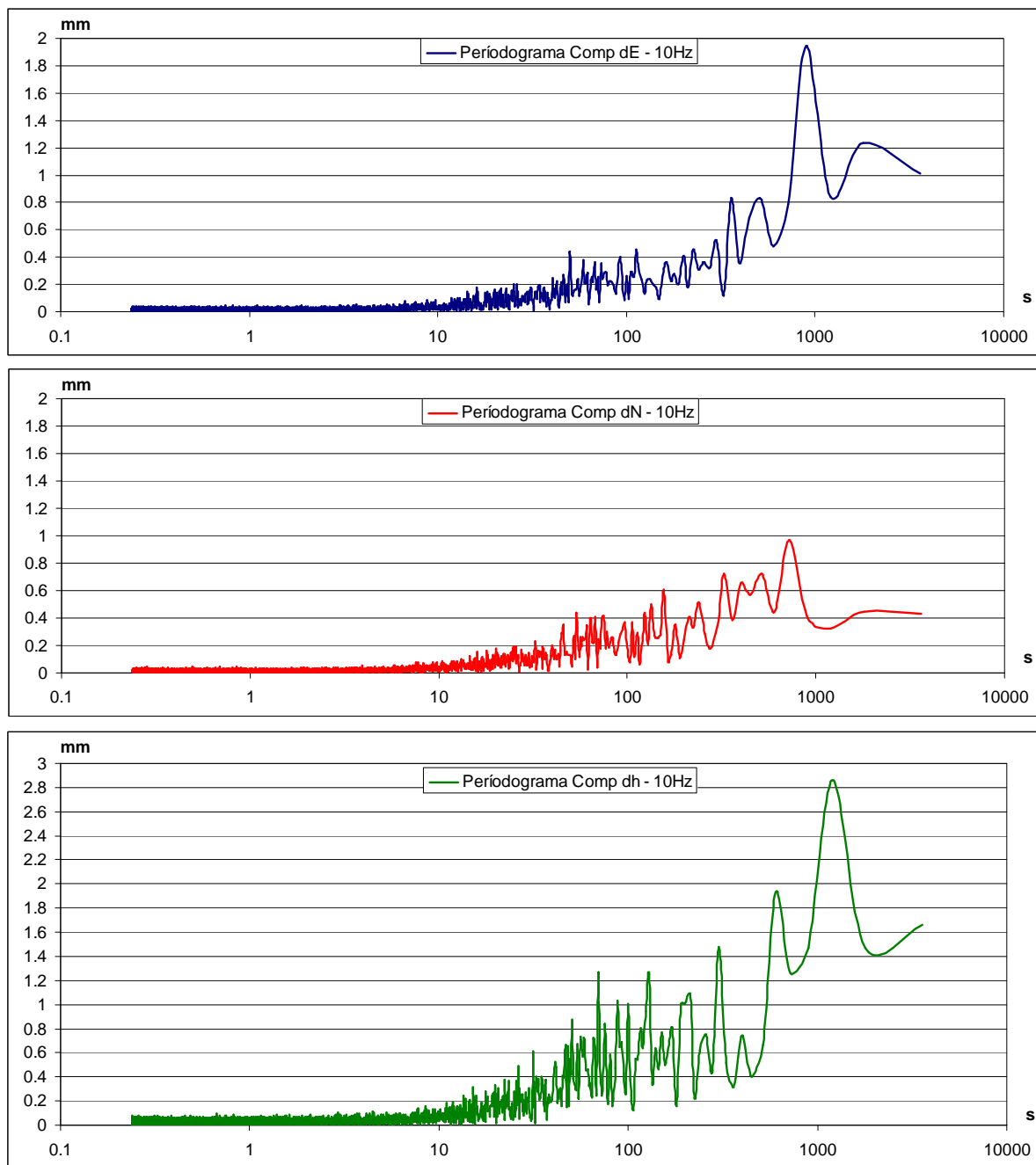


Figura 6 – Períodogramas das séries temporais das variações das componentes dE (azul), dN (vermelho) e dh (verde) observadas a 10Hz, no intervalo 12h00 a 13h00 do dia 26 de Janeiro.

2.2 – As Bases na Barragem do Cabril

2.2.1 – Em Outubro de 2008, foi realizado, na Barragem do Cabril, um ensaio com duas bases: i) Uma com cerca de 150m de comprimento e um desnível altimétrico de 31m, designada por Cabril1 (Figura 7); ii) A segunda com cerca de 700m de comprimento e um desnível altimétrico de 160m, designada por Cabril2 (Figura 7). As duas bases têm uma extremidade comum: um ponto localizado no coroamento da barragem, designado por CBR (Figura 10). A segunda extremidade da base Cabril1 é um ponto localizado na margem direita, designado por REF1 (Figura 8). A segunda extremidade da base Cabril2 é um ponto localizado na margem esquerda, designado por REF2 (Figura 9), próximo da Capela da Senhora da Confiança.

Estas duas bases foram observadas no dia 22 de Outubro de 2008, durante 6 horas, entre as 8h00 e as 14h00, com uma frequência de amostragem de 1Hz. Do processamento das bases resultaram, para cada uma, 21600 posições.

2.2.2 – As Figuras 11 e 12 mostram que a amplitude das variações nas três componentes destas duas bases é consideravelmente maior do que no caso da base LNEC. As séries temporais observadas da base Cabril1 têm um aspecto típico das séries afectadas pelo erro de reflexão dos sinais. Este erro, devido à existência de superfícies reflectoras nas vizinhanças das antenas, é caracterizado por uma variação lenta que acompanha a variação das posições dos satélites.

A localização da estação designada por CBR parece ter sido significativamente penalizada pelo erro de reflexão dos sinais, por se encontrar mais baixa do que o topo das viaturas que circulam sobre a barragem. Este efeito deve ter sido agravado pelo facto de, durante o ensaio, ter estado estacionada, junto à antena CBR, uma carrinha de caixa alta (não visível na Figura 10), que prestava apoio aos serviços de manutenção da barragem.



Figura 7 – Bases Cabril1 (REF1 – CBR) e Cabril2 (REF2 – CBR).



Figura 8 – Estação REF1, na margem direita da Barragem.



Figura 9 – Estação GNSS REF2, na margem esquerda da barragem, perto da Capela da Senhora da Confiança.



Figura 10 – Estação GNSS CBR, no coroamento da Barragem do Cabril, no lado de montante, junto à consola central.

Nas séries temporais observadas na base Cabril2, também se nota a presença do erro de reflexão de sinais que é agravado (devido à refração troposférica) pelo grande desnível que existe entre CBR e REF2 (cerca de 160m).

No Quadro 2, apresentam-se as estatísticas: média (M), desvio-padrão (DP), desvio máximo (DMAX) e desvio mínimo (DMIN) para a média, das três séries temporais de variações de coordenadas (21600 termos) das soluções a 1Hz de cada uma das bases, Cabril1 e Cabril2.

Da análise do Quadro 2 conclui-se que: i) Os indicadores de incerteza de todas as componentes das duas bases do Cabril são consideravelmente superiores aos indicadores das componentes da base LNEC; ii) Os indicadores de incerteza das componentes altimétricas (dh) são maiores do que os indicadores das componentes planimétricas; iii) Os indicadores de incerteza das medições da base Cabril1 e da base Cabril2 são muito semelhantes, no que diz respeito ao desvio-padrão das componentes planimétricas, mas o desvio-padrão da componente altimétrica de Cabril1 é significativamente inferior ao de Cabril2, devido ao facto desta última base ter um grande desnível; iv) Verifica-se, nas medições de ambas as bases, que os desvios-padrão são muito inferiores aos extremos.

Quadro 2 – Estatística das soluções com frequência de amostragem de 1Hz, nas três componentes, das bases Cabril1 e Cabril2: Média (M), desvio-padrão (DP), desvio máximo (DMAX) e desvio-mínimo (DMIN) em relação à média.

	Cabril1			Cabril2		
	dE	dN	dh	dE	dN	dh
M	-4.3mm	5.0mm	4.1mm	0.4mm	-0.4mm	17.6mm
DP	5.5mm	9.0mm	17.2mm	6.8mm	10.4mm	29.4mm
DMAX	72.9mm	79.9mm	161.2mm	61.5mm	32.9mm	198.6mm
DMIN	-42.3mm	-114.7mm	-99.3mm	-30.9mm	-34.2mm	-170.5mm

2.2.3 – As séries temporais das variações de coordenadas (dE, dN e dh), para as frequências de amostragem de 1Hz, das duas bases Cabril1 e Cabril2, foram submetidas a uma análise espectral. Estas séries foram expandidas, em série de Fourier, no intervalo entre zero e seis horas (21600 épocas com um intervalo de amostragem de 1s).

A partir das densidades espectrais, foram construídos os respectivos periodogramas que se apresentam nas Figura 13 e 14 (Cabril1) e nas Figura 15, 16 e 17 (Cabril2). Para facilitar a

análise dos periodogramas, são representadas as amplitudes (em mm) correspondentes aos períodos das componentes das séries de Fourier e não os seus quadrados, como é habitual.

Como se tratam de medições a 1Hz, as três séries de Fourier de cada base têm 10799 termos, correspondentes a frequências entre 0.5Hz (frequência de Nyquist) – período mínimo de 2s – e (1/21600)Hz – período máximo de seis horas.

A análise dos periodogramas das Figuras 13 e 14 (base Cabril1) mostra que: i) Na componente dE, as amplitudes são inferiores a dois milímetros; ii) Na componente dN, as amplitudes são sempre inferiores a 4mm (com exceção à correspondente ao período de 90 minutos, cuja amplitude é de cerca de 6mm); iii) Na componente altimétrica, as maiores amplitudes correspondem aos períodos maiores, sendo cerca de 8mm a amplitude mais elevada, correspondendo esta ao período de uma hora.

A análise dos periodogramas das Figuras 15, 16 e 17 (base Cabril2) mostra que: i) Na componente dE, as amplitudes são todas inferiores a 4.2mm; ii) Na componente dN, as amplitudes são todas inferiores a 8.4mm (este máximo é atingido no período de 90 minutos); iii) Na componente dh, as maiores amplitudes correspondem aos períodos maiores, sendo cerca de 19mm a amplitude mais elevada (este máximo é atingido no período de duas horas).

De forma análoga aos periodogramas da base LNEC, constata-se, nas Figuras 13 a 17, considerando apenas os períodos mais baixos (frequências mais altas) com valores inferiores a limites entre 10s (0.1Hz) e 100s (0.01Hz), as amplitudes correspondentes são homogêneas e inferiores a poucas décimas de mm, parecendo, também, traduzir o ruído branco.

Os valores mais elevados das amplitudes, que correspondem a períodos da ordem de vários minutos, são presumivelmente devidos a alterações lentas do efeito da reflexão dos sinais dos satélites e da refração troposférica.

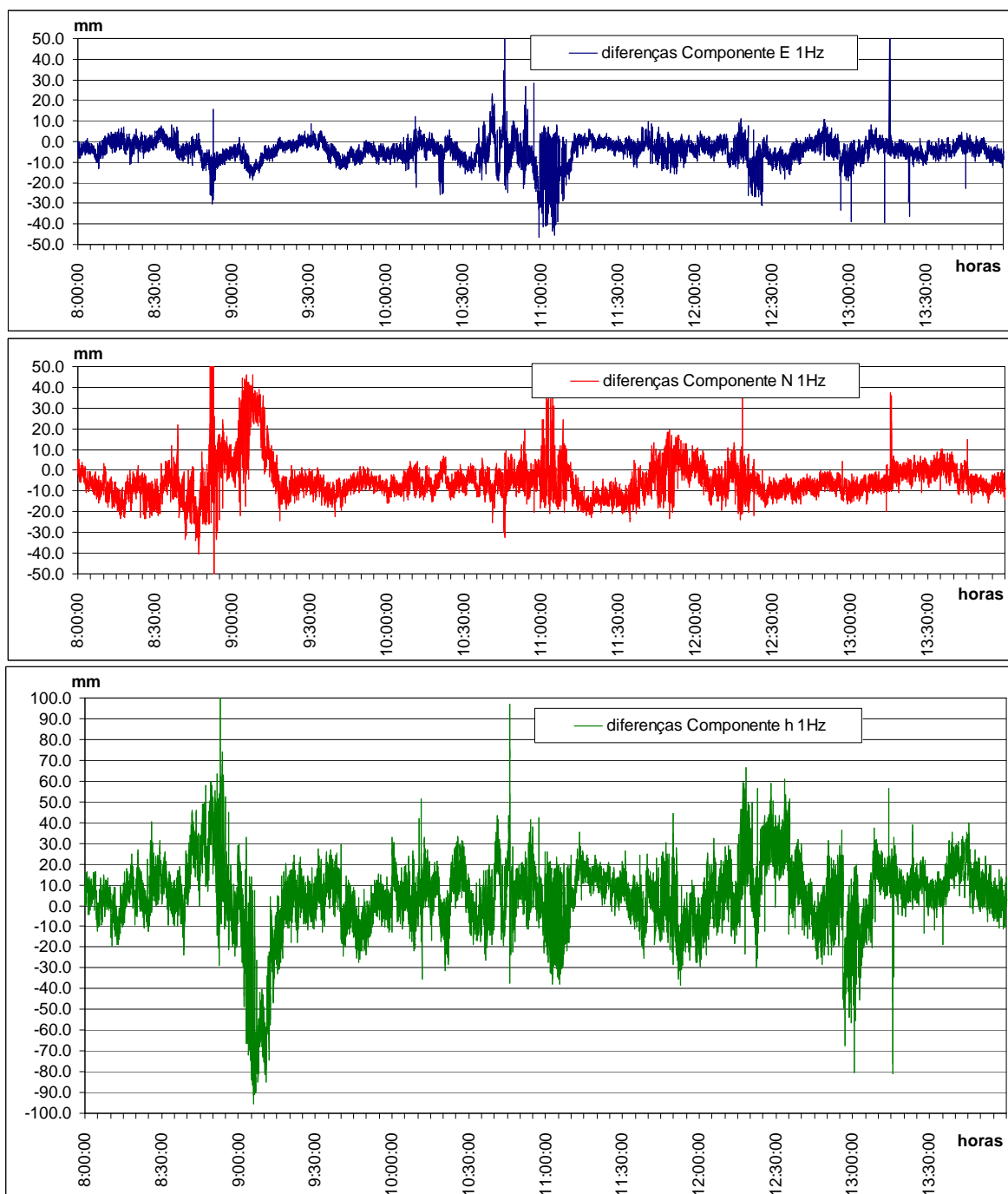


Figura 11 – Séries temporais das variações das componentes dE (azul), dN (vermelho) e dh (verde) relativas às amostras observadas a 1Hz, no intervalo 8h00 a 14h00, da base Cabril1.

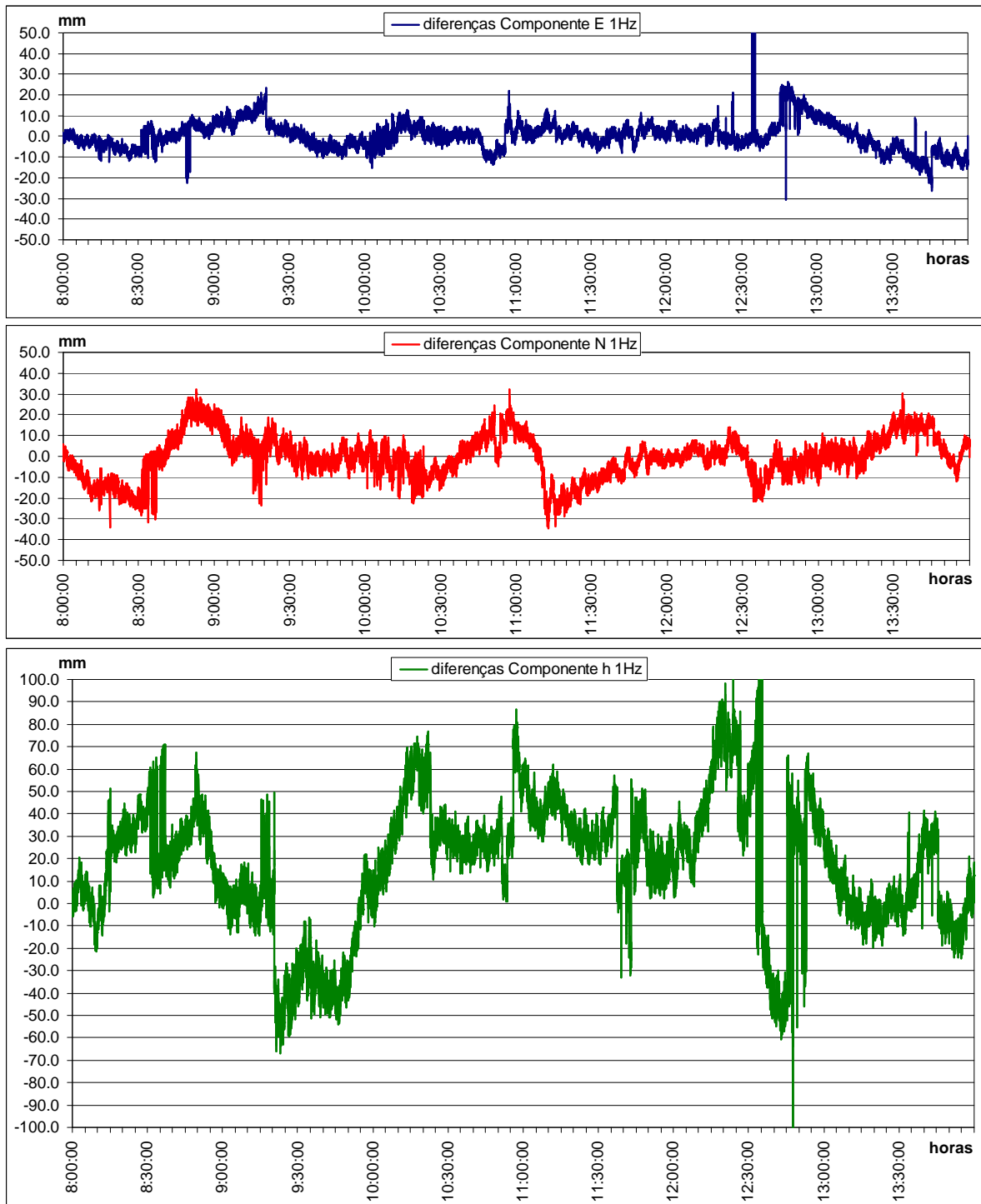


Figura 12 – Séries temporais das variações das componentes dE (azul), dN (vermelho) e dh (verde) relativas às amostras observadas a 1Hz, no intervalo 8h00 a 14h00, da base Cabril2.

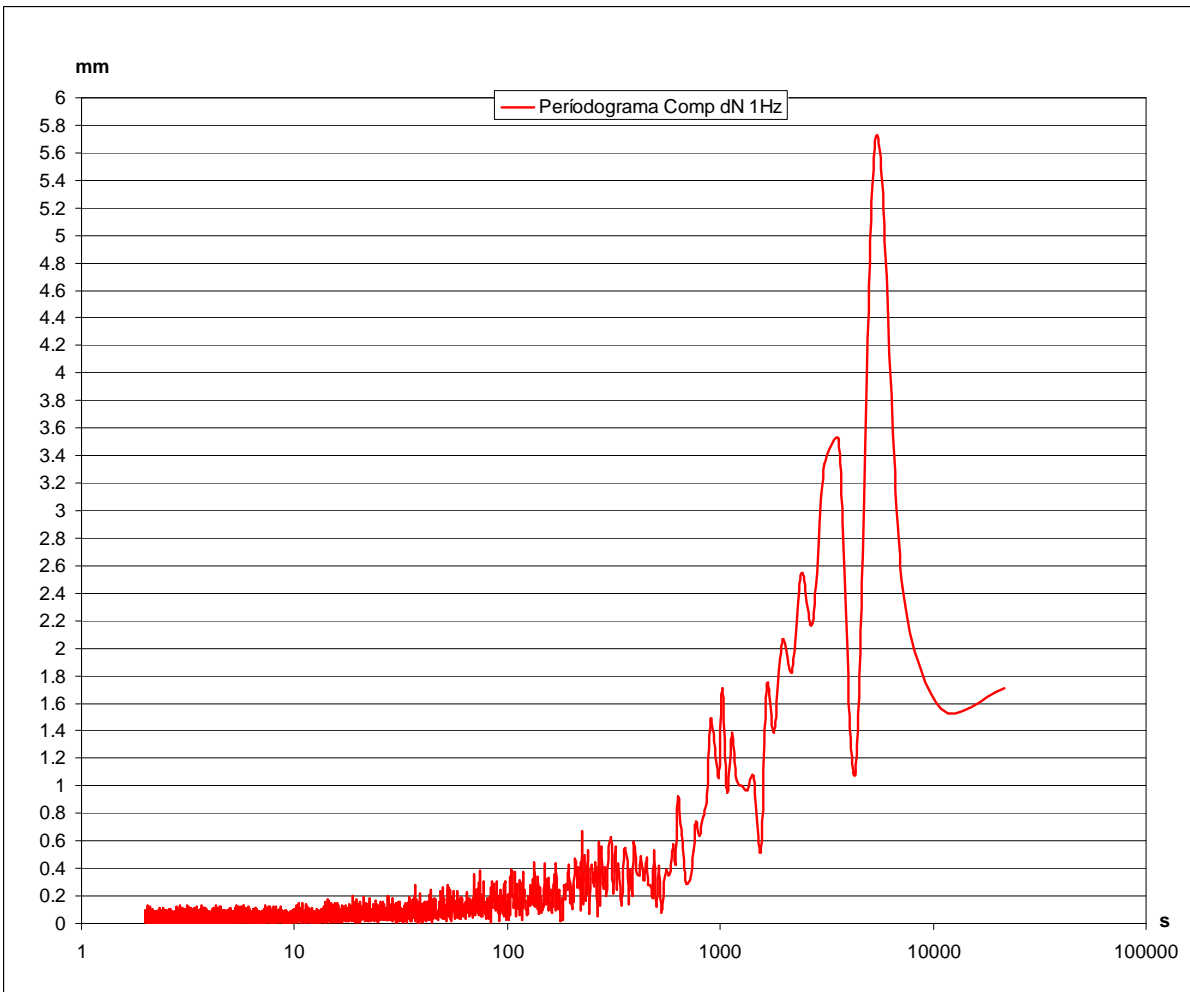
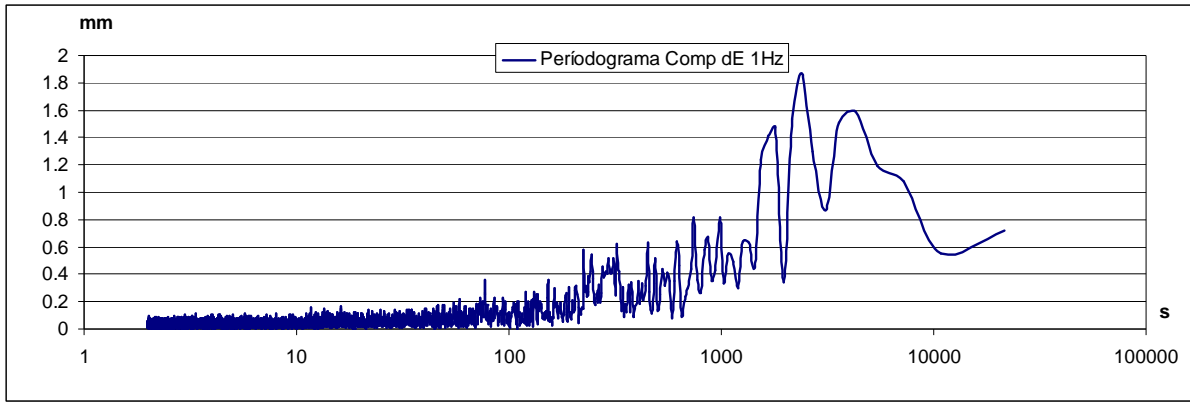


Figura 13 – Períodogramas das séries temporais das variações das componentes dE (azul), dN (vermelho), da base Cabril1, observada a 1Hz, no intervalo 8h00 a 14h00 do dia 23 de Outubro.

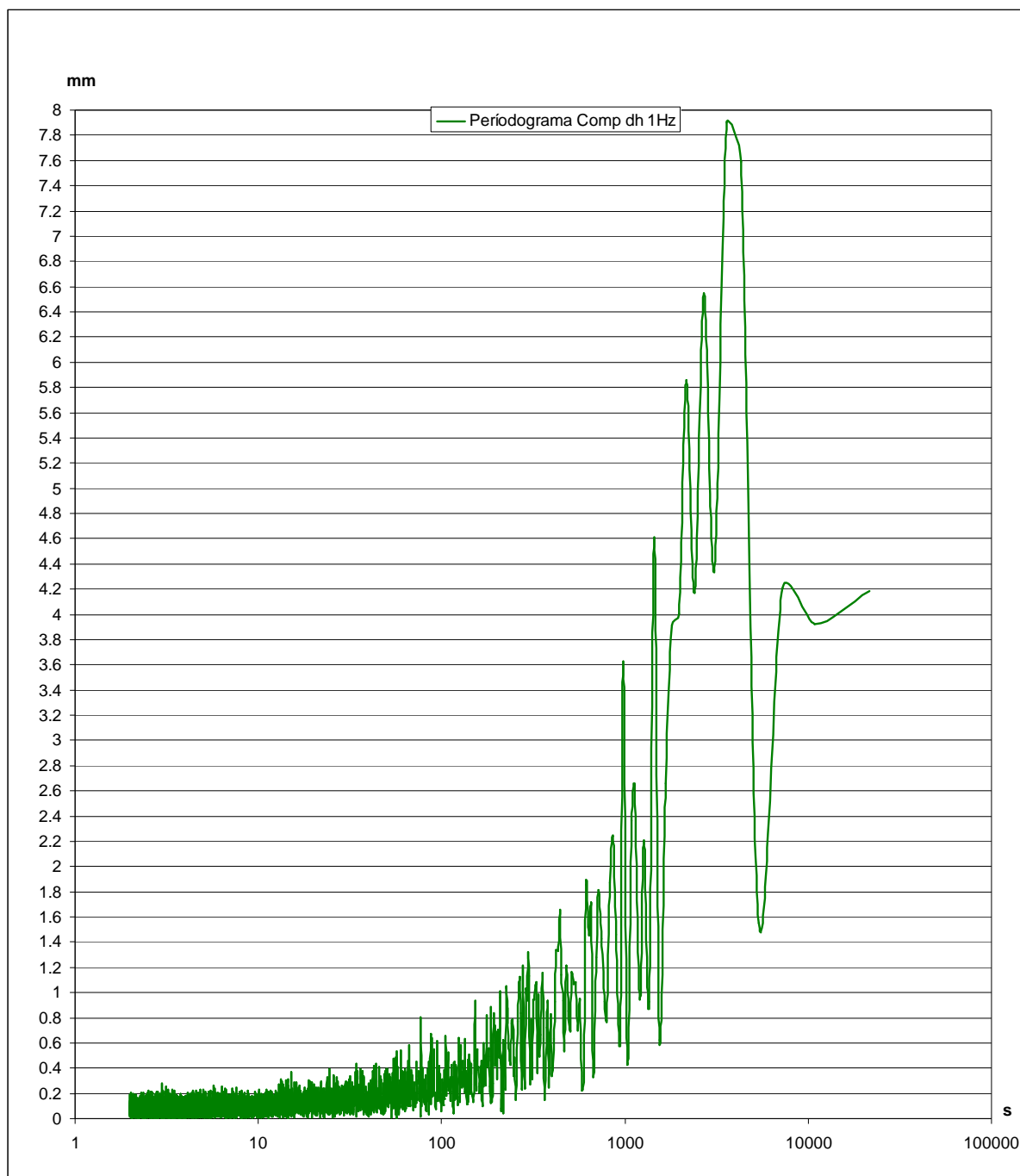


Figura 14 – Períodograma da série temporal das variações da componente dh da base Cabril1, observada a 1Hz, no intervalo 8h00 a 14h00 do dia 23 de Outubro.

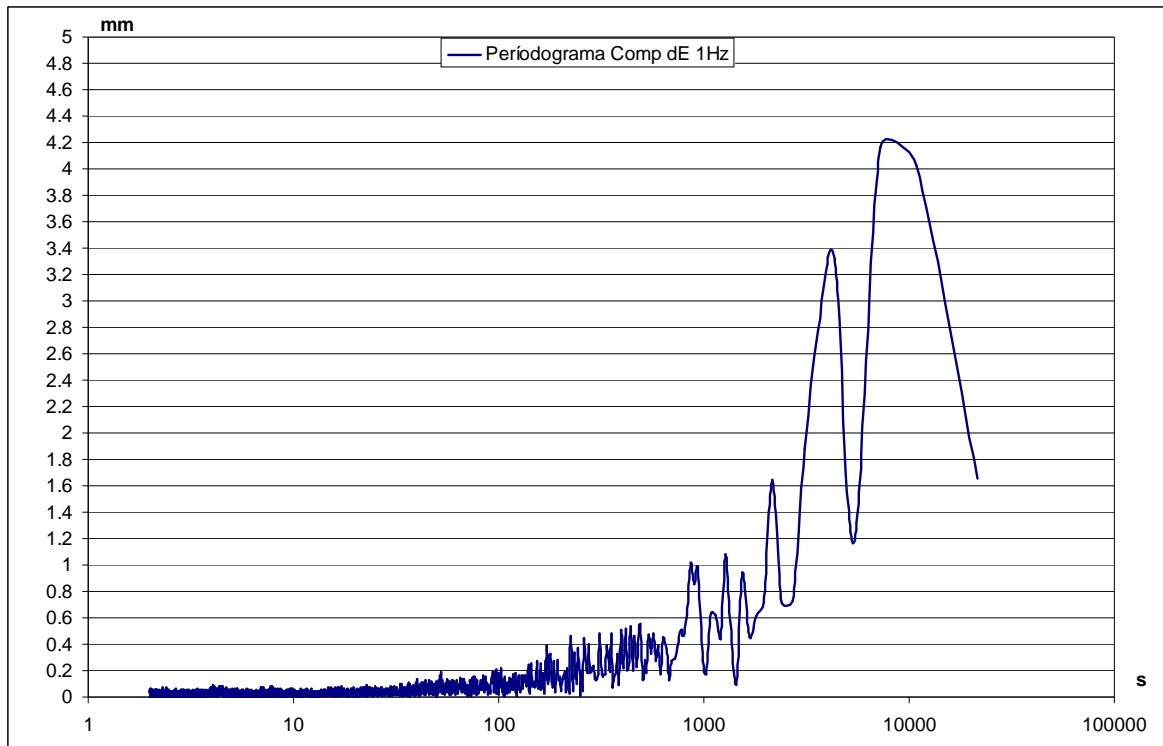


Figura 15 – Períodograma da série temporal das variações da componente dE, da base Cabril2 observada a 1Hz, no intervalo 8h00 a 14h00 do dia 23 de Outubro.

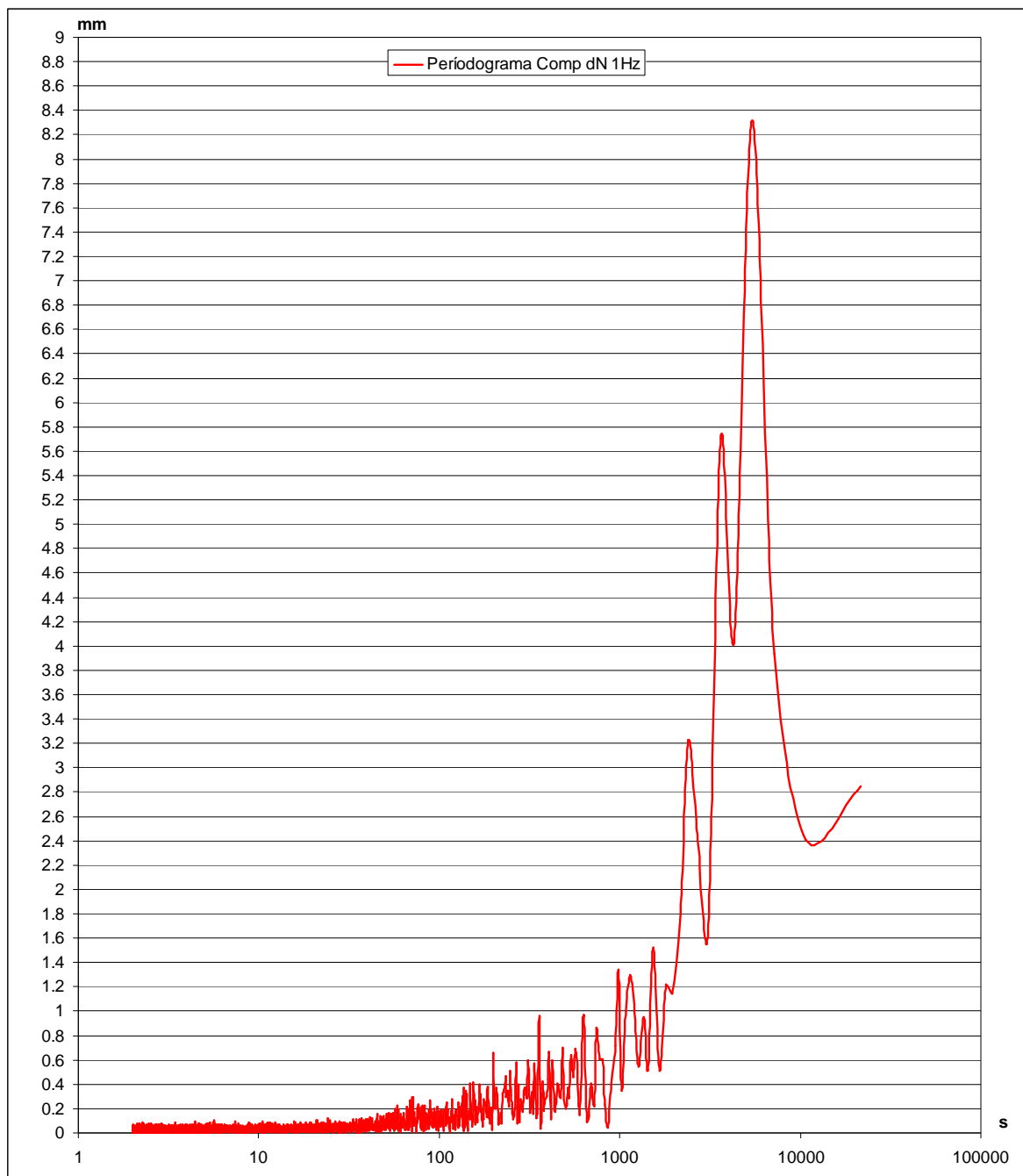


Figura 16 – Períodograma da série temporal das variações da componente dN, da base Cabril2, observada a 1Hz, no intervalo 8h00 a 14h00 do dia 23 de Outubro.

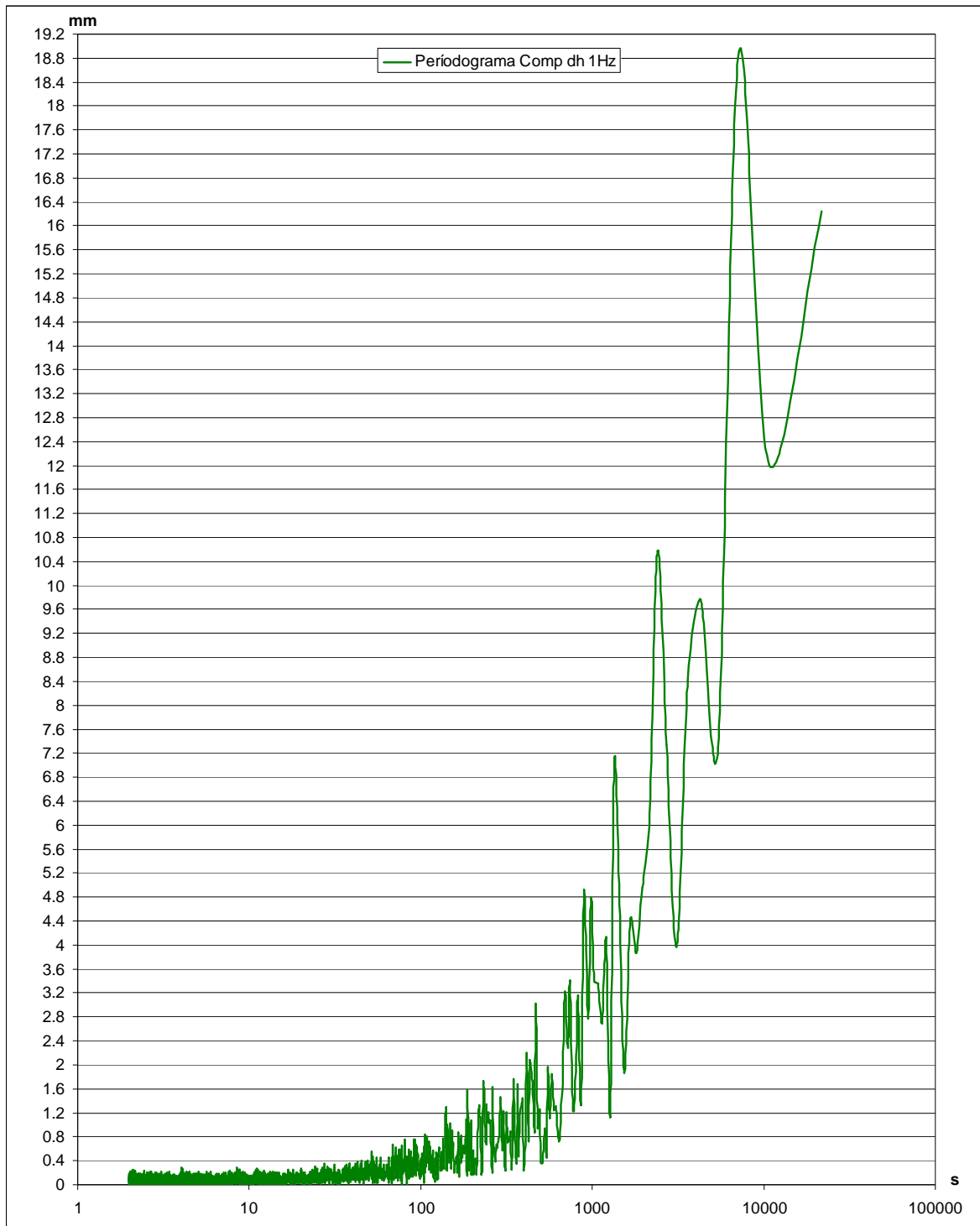


Figura 17 – Períodograma da série temporal das variações da componente dh, da base Cabril2, observada a 1Hz, no intervalo 8h00 a 14h00 do dia 23 de Outubro. Note-se que o eixo das ordenadas (expresso em milímetros) não se encontra à escala dos outros períodogramas, devido às limitações de formato da página.

3 – Simulação de um Sinal com Frequência de 1Hz

As doze séries temporais apresentadas, que resultam das variações de coordenadas de estações supostamente fixas, representam o ruído da medição relativa GNSS com elevada frequência de amostragem (1Hz e 10Hz). Como se verifica da comparação das bases LNEC com as bases Cabril, este ruído pode ter variações muito grandes em função das condições de observação. No entanto, os periógramas correspondentes às doze séries temporais apresentam características de ruído branco, com baixa densidade espectral para períodos (*grosso modo*) inferiores a 100 segundos (0.01Hz). Isto significa que sinais com frequências superiores a 0.01Hz, embora com amplitudes pequenas, são identificáveis nos periógramas.

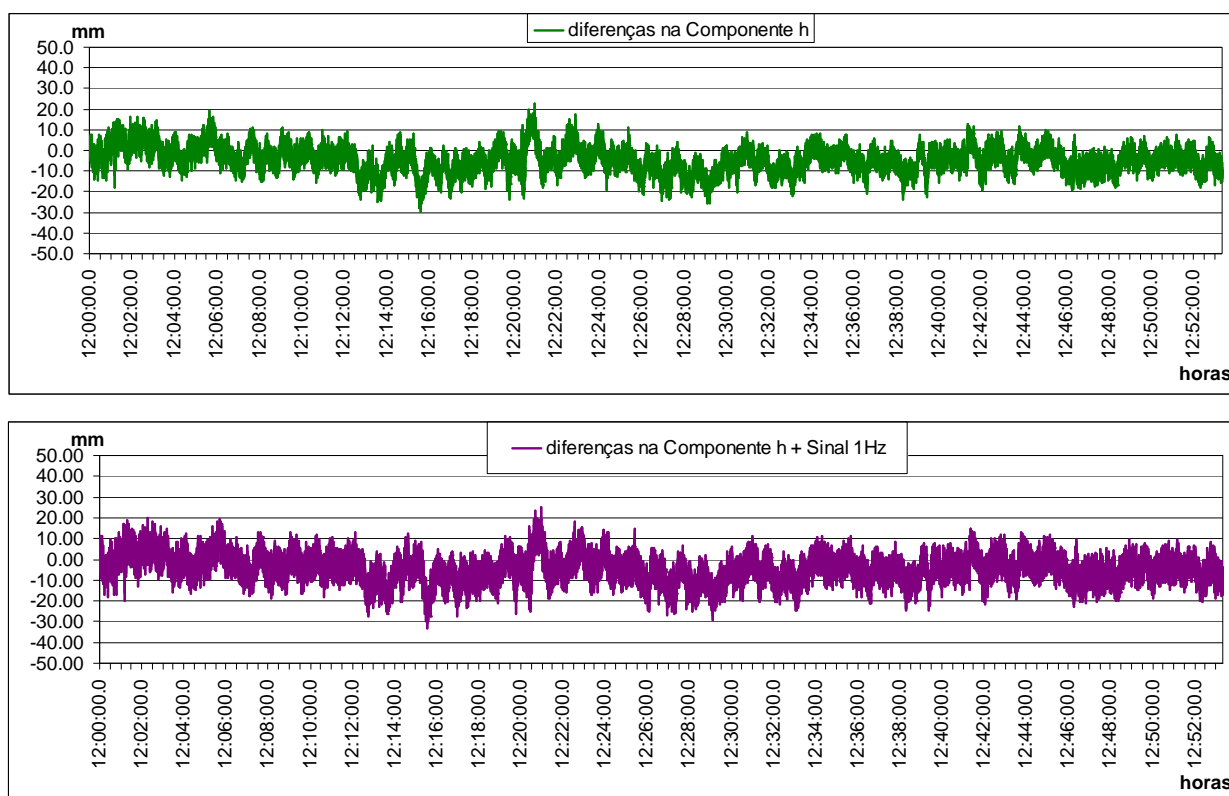


Figura 18 – Série temporal (dh) observada a 10Hz na base LNEC (verde) e a sua soma com um sinal de 1Hz e amplitude de 4mm (roxo).

A título de exemplo, foi simulado um sinal com a frequência de 1Hz e a amplitude de 4mm, na série temporal da componente vertical (dh), medida a 10Hz, na base LNEC. Na Figura 18, apresentam-se os gráficos da série temporal observada e da sua soma com o sinal simulado. A Figura 18 permite verificar que o sinal simulado não se distingue do ruído. No entanto, o periógrama correspondente à série temporal que resulta da soma da

série observada com o sinal simulado (Figura 19) assinala muito claramente a sua frequência e a sua amplitude. Note-se que as restantes densidades espectrais permanecem inalteradas.

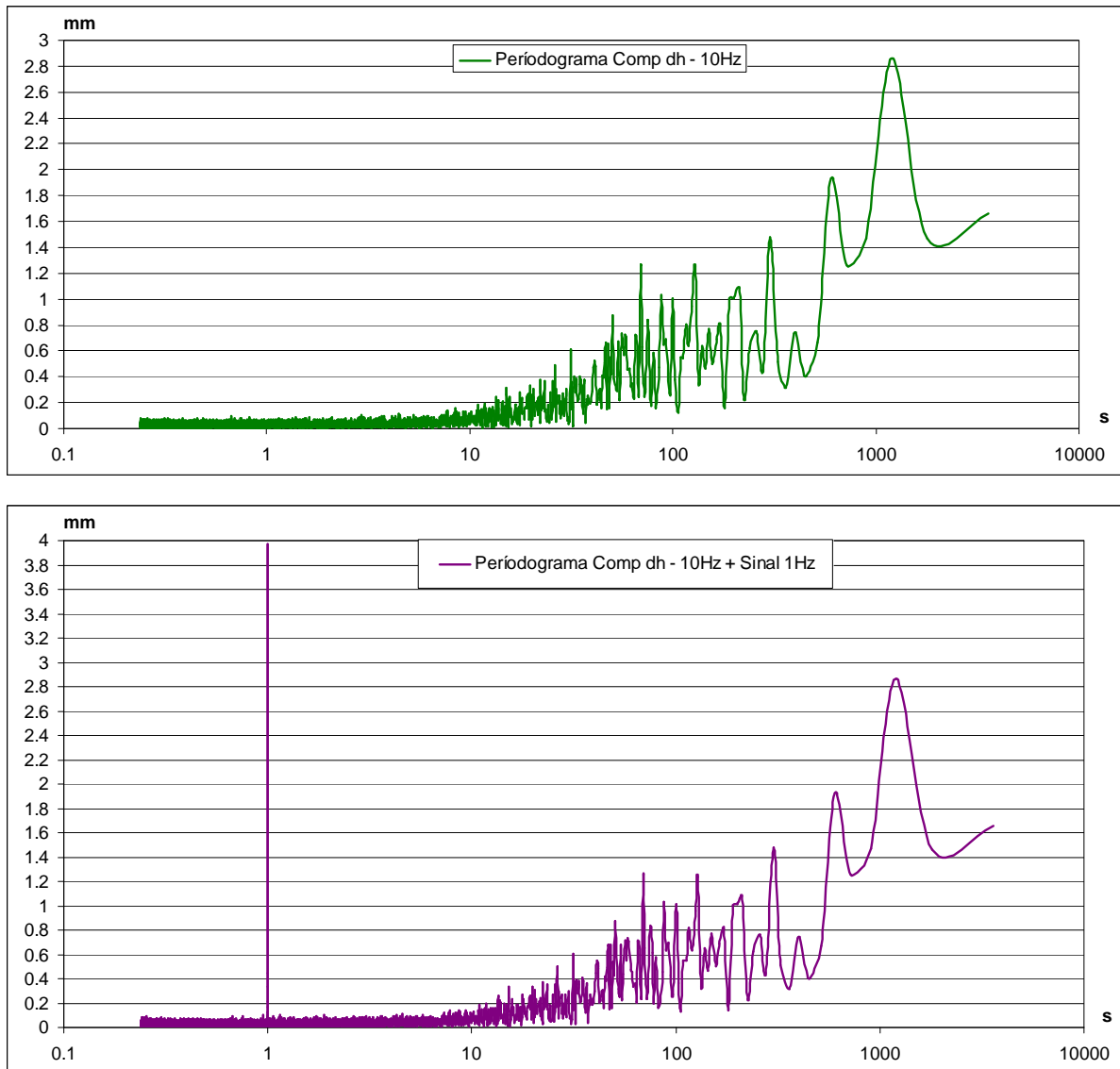


Figura 19 – Periodograma da série temporal (dh) observada a 10Hz na base LNEC (verde) e periodograma da sua soma com um sinal com a frequência de 1Hz e amplitude de 4mm (roxo).

4 – Considerações Finais

Este conjunto de ensaios, forçosamente incompleto, procurou caracterizar o ruído do posicionamento cinemático (para frequências de amostragem de 1Hz e de 10Hz) com o GNSS em modo relativo, usando equipamento de precisão para observar bases curtas (entre 150m e 700m) em condições favoráveis e em condições desfavoráveis, no que diz respeito aos erros devidos à reflexão dos sinais e à variabilidade da refração troposférica.

Os resultados dos ensaios, sintetizados nas estatísticas apresentadas nos Quadros 1 e 2, permitem verificar que, mesmo nas condições mais desfavoráveis (componente vertical da base de 700m observada a 1Hz) o desvio padrão é cerca de 3cm. Nas condições mais favoráveis (base LNEC de 325m, observada a 1Hz) o desvio padrão da componente vertical é de 7mm.

A análise espectral das séries temporais observadas revela, no entanto, que as características do ruído são mais favoráveis à determinação de movimentos vibratórios do que uma simples análise das estatísticas apresentadas nos Quadros 1 e 2 dá a entender. Com efeito, para frequências superiores a 0.01Hz (*grosso modo*), as amplitudes das componentes do desenvolvimento em série de Fourier são muito pequenas, inferiores a poucas décimas de milímetro (0.1mm, no caso mais favorável, e 0.4mm, no caso mais desfavorável), o que permite detectar, naquela banda de frequências, movimentos vibratórios com amplitudes milimétricas (cf. exemplo apresentado na Secção 3).

Quanto à frequência de amostragem, o ensaio permitiu constatar que a observação a 10Hz apresenta um ruído semelhante ao da observação a 1Hz. A observação a 10Hz exige, no entanto, equipamento informático de apoio adequado e cabos de ligação antena-receptor com atraso (*delay*) pequeno.

Em conclusão: parece ser possível, usando métodos de processamento de sinal, tais como a análise espectral e os filtros (passa-alto, passa-baixo (Lima e Casaca, 2008), passa-banda, adaptáveis, etc.) e combinando o posicionamento cinemático com o posicionamento estático (com intervalo de processamento variável), monitorizar movimentos vibratórios com uma incerteza de medição muito inferior à indicada pelos resultados brutos. Considera-se, deste modo, importante o prosseguimento dos estudos de caracterização e modelação do ruído.

5 – Referências

Casaca, J. e Lima, J. N. (2008a). O Ruído na Observação Contínua GNSS. Revista da Ordem dos Engenheiros, INGENIUM, II Série, nº 105, pág. 57.

Casaca, J. e Lima, J. N. (2008b). Spectral Characterization of GNSS Time Series. Actas da 6ª Assembleia Luso-Espanhola de Geodesia e Geofísica, Tomar, pág. 249 – 250.

Lima, J. N. e Casaca, J. (2008). Smoothing GNSS Time Series with Asymmetric Moving Averages. Simpósio Internacional *Measuring the Changes*, organização conjunta FIG, IAG e LNEC. Lisboa.

Lisboa, LNEC, Fevereiro de 2009,

VISTOS

O Chefe do Núcleo de Geodesia
Aplicada



Eng.º João Manuel Martins Casaca

O Director do Departamento de
Barragens de Betão



Eng.º Carlos Alberto de Brito Pina

AUTORIA



Eng.º José Nuno Pedroso de Lima
(Investigador Auxiliar)



Eng.º João Manuel Martins Casaca
(Investigador-coordenador)



Eng.ª Maria João Henriques
(Investigador Principal)

