

## TECNOLOGIAS DE MONITORIZAÇÃO DE SISTEMAS MARINHOS: APLICAÇÃO À RIA DE AVEIRO (PORTUGAL)

João Miguel Dias<sup>1</sup>; Nuno Vaz<sup>1</sup>; Rita Nolasco<sup>2</sup>; José Luis Santos<sup>3</sup>; Marcela Teixeira<sup>4</sup>; Orlando Frazão<sup>3</sup>;  
António Soares<sup>2</sup>; Fernando A. Monteiro Santos<sup>2</sup>; José Fortes Lopes<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Departamento de Física, Universidade de Aveiro, Campus de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal

Phone: +351234370356. e-mail: jdias@fis.ua.pt

<sup>2</sup> Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa, Campo Grande, Ed. C8, Piso 6, 1749-016 Lisboa, Portugal

<sup>3</sup> INESC Porto, UOSE, Rua do Campo Alegre 687, 4169-007 Porto, Portugal

<sup>4</sup> CABELTE S.A., Apartado 3, Praia da Granja, 4407 S. Felix da Marinha, Portugal

### RESUMO

Este trabalho apresenta duas novas tecnologias distintas para monitorização de sistemas marinhos e a sua aplicação à Ria de Aveiro: uma tecnologia óptica para medição da temperatura da água e uma tecnologia electromagnética para o cálculo de caudais. A comparação de resultados obtidos através do recurso à tecnologia óptica com resultados de medições efectuadas utilizando tecnologia convencional (STD) mostra que as séries de temperatura da água têm a mesma variabilidade. A análise espectral de dados de diferença de potencial (d.d.p.) obtidos com o cabo eléctrico mostra que o pico de maior energia surge na frequência correspondente à  $M_2$ , a principal componente de maré na Ria de Aveiro, o que mostra que os dados de d.d.p. são sensíveis à maré.

### ABSTRACT

This work presents new technologies for monitoring marine environments and its application to Ria de Aveiro lagoon: one optical technology to measure water temperature and one electromagnetic technology for the determination of water fluxes. The comparison of data obtained by the optical technology and by conventional technology (STD) shows that the water temperature series have the same variability. The spectral analysis of the data of potential difference obtained by an electric cable shows that the more energetic pick appears in the frequency corresponding to  $M_2$ , the principal tidal component in Ria de Aveiro. This shows that the potential difference data is sensible to the tide.

Palavras-Chave: tecnologia óptica, indução electromagnética, ria de aveiro.

### 1. INTRODUÇÃO

A Ria de Aveiro é um sistema lagunar de águas pouco profundas, situado no Noroeste da Península Ibérica (40°38'N, 8°45'W). É formada por quatro canais principais e caracteriza-se por ter uma estrutura bastante complexa (fig. 1). É também caracterizada por grandes zonas intermareais, nomeadamente sapais e bancos de lodo. Possui uma só ligação com o Oceano Atlântico, uma embocadura aberta artificialmente no início do séc. XIX. É o mais importante sistema lagunar português, favorecendo as suas características naturais as actividades náuticas e de recreio. Por outro lado são águas muito ricas em nutrientes, e assim a laguna é muito importante em termos biológicos. As suas margens são usadas para fins agrícolas e nelas existe também uma variedade de pequenas e médias indústrias. Por estas razões a Ria de Aveiro afecta, directa ou indirectamente, a vida de cerca de 300,000 pessoas que vivem em torno dos seus canais.

As características deste sistema, assim como de outras regiões costeiras de idêntica importância, tornam a sua monitorização permanente especialmente importante para a sua gestão sustentada. O recurso a tecnologias convencionais de amostragem de parâmetros físicos tem-se revelado bastante dispendioso e de difícil utilização em escalas espaciais e temporais elevadas.

Desde Outubro de 2002 estão a ser implementadas na Ria de Aveiro, no âmbito do projecto *PROTEU – Tecnologias Avançadas para a Monitorização de Sistemas Estuarinos e Costeiros*, novas tecnologias de monitorização de sistemas marinhos. Estas tecno-

logias compreendem duas vertentes: uma consiste na utilização de cabos de fibra óptica com sensores de Bragg que possibilitam a medição da temperatura da água. Com este propósito foi instalado um cabo de fibra óptica longitudinal experimental no Canal de Mira, prevendo-se proximamente a instalação de um outro cabo longitudinal ao longo do Canal do Espinheiro (fig.1), para estudar a principal zona de mistura entre água salgada e água doce na Ria de Aveiro. A outra vertente consiste na utilização de cabos eléctricos com eléctrodos nas extremidades, transversais à direcção do fluxo de água, para através da modelação dos respectivos resultados determinar o caudal de água através da secção. Foi instalado um cabo na fronteira Oeste (Barra) da Ria de Aveiro, para a medição de caudais entre a laguna e o Oceano Atlântico. Num futuro próximo prevê-se a instalação de um segundo cabo na fronteira Este da laguna com o rio Vouga, para determinação do respectivo caudal fluvial. A fig. 1 mostra a localização dos cabos de fibra óptica longitudinais no Canal de Mira e no Canal do Espinheiro e a localização dos cabos eléctricos transversais no Rio Vouga e na Barra.

### 2. TECNOLOGIA ÓPTICA

Numa primeira fase de implementação do projecto na laguna foi instalado em Fevereiro de 2002 um protótipo do cabo de fibra óptica no Canal de Mira, junto à Vagueira (fig.2). Esse protótipo tinha inseridos nove sensores, diferentemente espaçados, sendo composto por seis fibras, sendo o seu comprimento de cerca de 850 metros

(fig. 3). O cabo estava fixo ao fundo do canal por maciços de betão, concebidos de forma a levantarem o cabo na zona dos sensores, com o objectivo de evitar a deposição de sedimentos (fig.4).

A instalação deste protótipo precede a instalação, no Canal do Espinheiro (fig. 1), de um cabo de fibra óptica

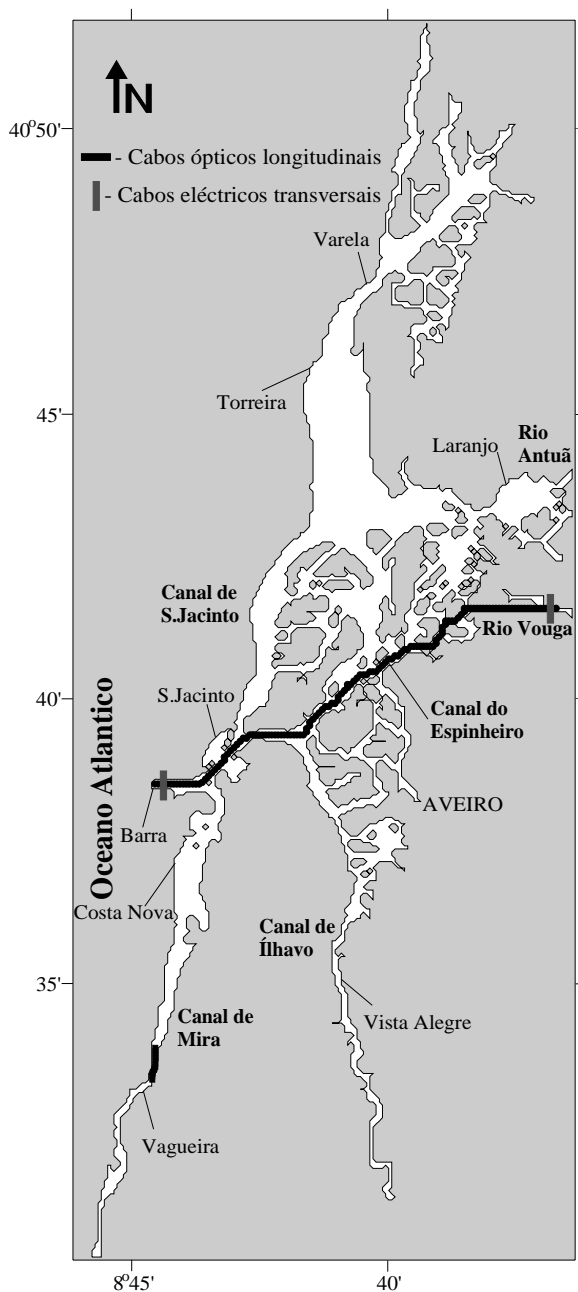


Figura 1 – Mapa da Ria de Aveiro, com a localização dos cabos de fibra óptica e dos cabos eléctricos.

longitudinal com cerca de 10 km de extensão e sensores de temperatura espaçados de 500 m, o qual permitirá monitorizar a temperatura da água neste canal que serve de ligação entre o Rio Vouga e o Oceano Atlântico. Estes sensores permitirão a medição da temperatura da água em tempo real e em contínuo, permitindo deste modo a construção de uma base de dados sobre a principal zona da Ria de Aveiro onde se dá a mistura entre a água salgada proveniente do oceano

e a água doce de origem fluvial. A instalação deste cabo longitudinal está prevista para o Verão de 2003.

Este protótipo esteve a efectuar medições de temperatura da água desde 5 de Junho a 5 de Setembro de 2002, com um intervalo de amostragem de 9 minutos.



Figura 2 – Fase da instalação do protótipo do cabo de fibra óptica no canal de Mira.

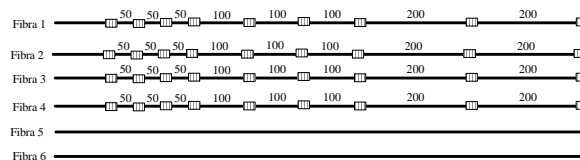


Figura 3 – Esquema do protótipo do cabo de fibra óptica instalado no Canal de Mira. No esquema estão representadas as localizações dos sensores de Bragg, o espaçamento entre sensores e o número de fibras que constituem o cabo.

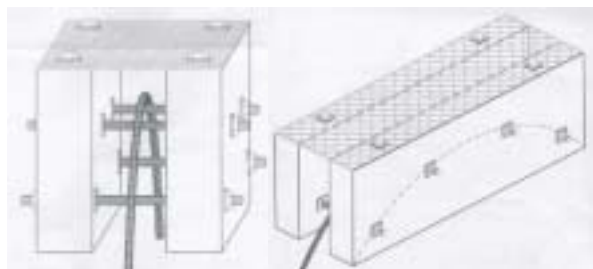


Figura 4 – Suportes de fixação do cabo de fibra óptica.

Foi efectuada uma calibração dos sensores do protótipo recorrendo a tecnologia convencional (STD). Com este propósito foram efectuadas medições de temperatura da água, nas localizações de cada sensor, com um intervalo de amostragem de 1 segundo no dia 17 de Julho de 2002. Estes valores foram utilizados para calibrar individualmente cada um dos sensores.

Para se fazer a validação deste protótipo do cabo de fibra óptica efectuou-se uma campanha de recolha de dados, recorrendo a tecnologia convencional (STD), nos dias 30 e 31 de Julho de 2002, de modo a fazer-se a comparação com os dados obtidos com os sensores de Bragg. O período de amostragem foi de cerca de 25 horas (dois ciclos de maré). A análise efectuada às séries de temperatura obtidas com o STD e com o sensor 9 do ca-

bo de fibra óptica mostra que elas têm a mesma variabilidade, como se pode observar na fig. 5. Os valores medidos pelo sensor de Bragg são mais elevados que os medidos pelo STD, o que revela que a calibração dos sensores do protótipo deverá ser melhorada.

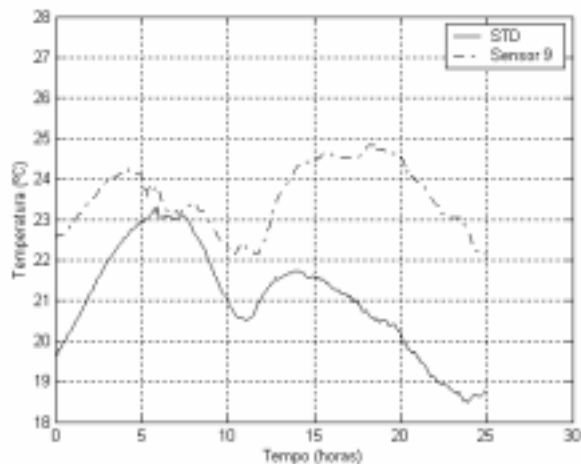


Figura 5 – Séries de temperatura da água obtidas com o STD e o sensor 9 do cabo de fibra óptica.

A presença do protótipo permite a avaliação das características do transporte de calor entre a embocadura e a Vagueira. Utilizando os dados recolhidos durante o período de amostragem é possível determinar o desfasamento temporal da temperatura da água entre a Barra e a Vagueira.

Com este objectivo foram comparadas duas séries de dados: uma de altura de água na Barra e outra de temperatura da água medida pelo sensor 9 do protótipo. Como não existem séries de temperatura da água simultâneas para a Barra e Vagueira durante este período, determinou-se primeiro a relação entre a altura de água e a temperatura da água para a Barra.

Para se obter o desfasamento temporal da temperatura da água, na Vagueira, em relação à maré, na Barra, realizou-se a análise espectral cruzada das séries de dados referidas. Depois de conhecido o desfasamento entre a altura de água e a temperatura da água (para o mesmo ponto) calculou-se a coerência quadrada e a fase entre as séries de altura de água e de temperatura da água na Barra e na Vagueira, respectivamente.

Para uma situação de Verão, Junho-Julho de 2001, o desfasamento obtido, na Barra, entre a temperatura da água e a altura de água foi de 10.59 horas. Se o desfasamento entre a altura de água e a temperatura da água fosse, exactamente, 12.42 horas quando a maré estivesse em preia-mar a curva de temperatura estaria no seu ponto mínimo. Para uma situação de baixa-mar a curva de temperatura estaria no seu ponto máximo. Como o desfasamento, nesta situação de Verão, é de 10.59 horas, quando a maré está no seu ponto mais alto, preia-mar, a curva da temperatura da água encontra-se próxima do mínimo para esse ciclo de maré, e vice-versa.

A fig. 6 representa a série de temperatura obtida com o sensor 9 do cabo de fibra óptica na Vagueira e a série de altura de água prevista para a Barra, para o período de 5

de Junho a 5 de Setembro de 2002. Esta série de altura de água tem um intervalo de amostragem de 9 minutos, tendo sido prevista a partir do conhecimento das constantes harmónicas da maré. Estas foram determinadas por análise harmónica dos dados horários de maré, medidos no marégrafo da Barra, recorrendo ao pacote de análise harmónica T\_TIDE (Pawlowicz et al. 2002).

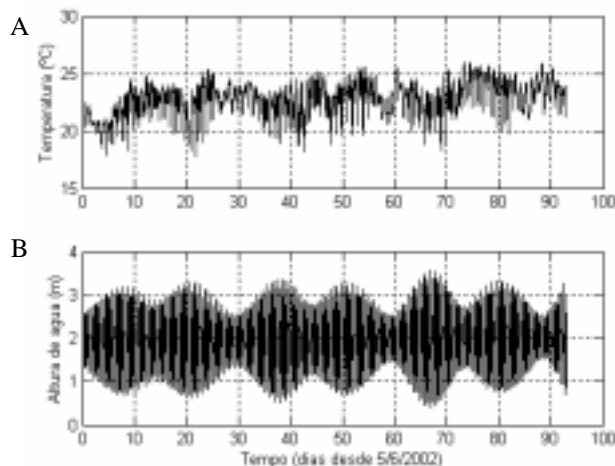


Figura 6 – Temperatura da água na Vagueira medida pelo sensor 9 do cabo de fibra óptica (A) e altura de água na Barra (B), para o período de 5 de Junho a 5 de Setembro de 2002. Dados de 9 em 9 minutos.

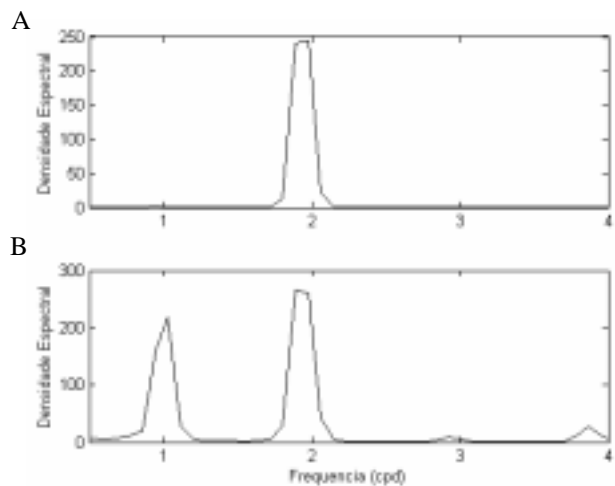


Figura 7 – Espectros simples de alturas de água na Barra (A) e de temperatura da água na Vagueira (B).

Os espectros simples das séries temporais de altura de água e de temperatura da água (fig. 7) mostram que o máximo da densidade espectral está associado ao período semi-diurno de 12.42 horas. No caso da temperatura da água, o espectro revela que a energia associada ao período diurno (24.19 horas) é também bastante elevada.

Este pico diurno no espectro da temperatura pode ser explicado pelo facto de a Ria de Aveiro ser um sistema lagunar de águas pouco profundas, com uma profundidade média de cerca de 1 m, e de a temperatura da água ser governada não só pela maré, mas também pela radiação

solar (Dias et al. 1999), que tem uma periodicidade diurna. A análise espectral cruzada mostra que a temperatura da água na Vagueira e a altura da água na Barra estão bem relacionadas, com uma coerência quadrada de 0.912 no período semi-diurno correspondente à componente  $M_2$ , como se pode observar na fig. 8.

Para este período semi-diurno o desfasamento obtido entre as duas grandezas é de  $75^\circ$ , o que corresponde a 2.6 horas.

A maré na Ria de Aveiro é governada pela componente lunar  $M_2$ , que tem uma periodicidade de 12.42 horas. O mínimo de temperatura da água na Vagueira tem um desfasamento relativamente à preia-mar na Barra de 15.02 horas (12.42 h+2.6 h). Numa situação de Verão o desfasamento entre um ponto máximo de altura de água, preia-mar, e um mínimo de temperatura é, para a Barra, de 10.59 horas. Deste modo pode-se inferir que o desfasamento entre mínimo de temperatura da água na Barra (situação aproximada de preia-mar), e o mínimo de temperatura na Vagueira é de 4.43 horas.

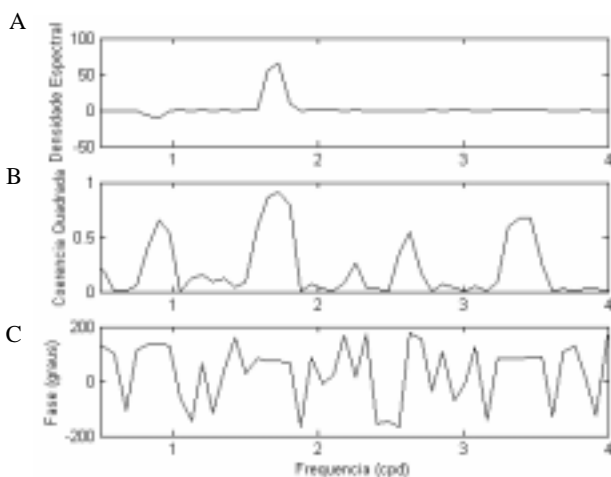


Figura 8 – Espectro cruzado (A), coerência quadrada (B) e fase (C) entre a altura de água na Barra e a temperatura da água na Vagueira.

### 3. TECNOLOGIA ELECTROMAGNÉTICA

A segunda fase de implementação do projecto consistiu na instalação em Julho de 2002 de um cabo eléctrico transversal ao canal da embocadura da Ria de Aveiro (figs.1 e 9). Este permite a medição da diferença de potencial entre as margens de S. Jacinto e da Barra (canal da embocadura), de acordo com o esquema da fig. 10, com o objectivo de medir o fluxo de água através deste canal. Uma vez que a Ria de Aveiro tem uma única ligação com o Oceano Atlântico, a medição deste fluxo permite caracterizar as trocas entre a laguna e o oceano. Este cabo eléctrico, com cerca de 350 metros de comprimento, está fixo ao fundo do canal por um sistema de poitas de cimento regularmente espaçadas.

Os cabos eléctricos têm nas suas extremidades que estão em contacto permanente com a água eléctrodos. Estes foram colocados no interior de uma cavidade, em dois maciços de cimento especialmente concebidos, de forma a que sejam sensíveis ao fluxo de água (fig.11). Esta é uma técnica útil para a monitorização de sistemas marinhos; conhecendo o campo magnético terrestre e o campo eléctrico induzido por

cargas em movimento sujeitas à acção deste campo magnético terrestre, pode-se quantificar o fluxo de água num determinado sistema marinho. No caso concreto da Ria de Aveiro, a medição da diferença de potencial induzida pela água em movimento, em conjunto com o conhecimento do



Figura 9 – Fase da instalação do cabo eléctrico no canal da embocadura.

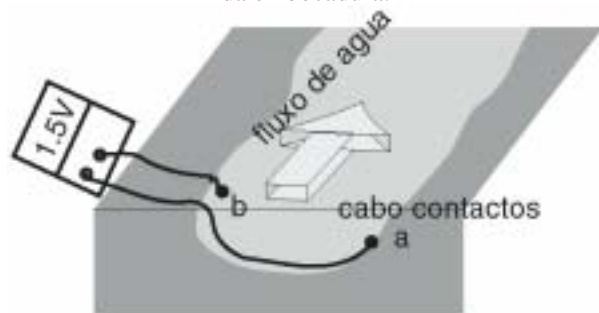


Figura 10 – Diagrama que representa a embocadura da Ria de Aveiro e os eléctrodos colocados nas margens de S. Jacinto e da Barra para a medição da diferença de potencial eléctrico (d.d.p.).



Figura 11 – Maciço de cimento, com cavidade para instalação de um eléctrodo.

campo magnético terrestre, medido utilizando um magnetómetro já instalado na Área Militar de S.Jacinto, permite determinar o fluxo de água através da secção transversal do canal da embocadura.

Este sistema está em funcionamento desde 23 de Julho de 2002. Neste trabalho são apresentados os resultados da análise espectral dos valores de diferença de potencial eléctrico obtidos desde o início dos registos até 13 de Novembro de 2002. Na fig. 12 é apresentada a evolução temporal dos registos dos valores das diferenças de potencial eléctrico, os quais foram medidos entre os eléctrodos localizados nas duas margens do canal. A diferença de potencial eléctrico varia entre  $-13$  e  $13$  mV. A série temporal das diferenças de potencial também permite a visualização do ciclo de marés vivas marés mortas e da desigualdade diurna características de um regime misto de maré.

A análise espectral revela que os máximos de energia estão associados às frequências correspondentes às componentes  $M_2$  e  $S_2/K_2$ , como se pode observar na fig. 13. As frequências correspondentes a  $P_1/K_1$ ,  $O_1$  e  $M_4$  também estão presentes ainda que com uma amplitude bastante menor. O valor máximo absoluto é observado na frequência semi-diurna, correspondente à  $M_2$ , que constitui deste modo o pico mais energético. Verifica-se desta forma que a componente da maré  $M_2$  induz um campo eléctrico superior a qualquer outra componente do campo eléctrico. Este resultado está de acordo com os resultados obtidos por Dias et al (2000), que observa que a maré na laguna é essencialmente semi-diurna.

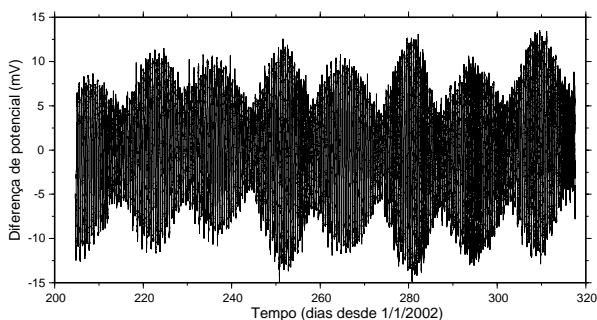


Figura 12 – Diferença de potencial medida entre os dois eléctrodos, situados nas margens Norte e Sul do canal da embocadura da Ria de Aveiro (S. Jacinto e Barra). Registo realizado entre 23 de Julho e 13 de Novembro de 2002

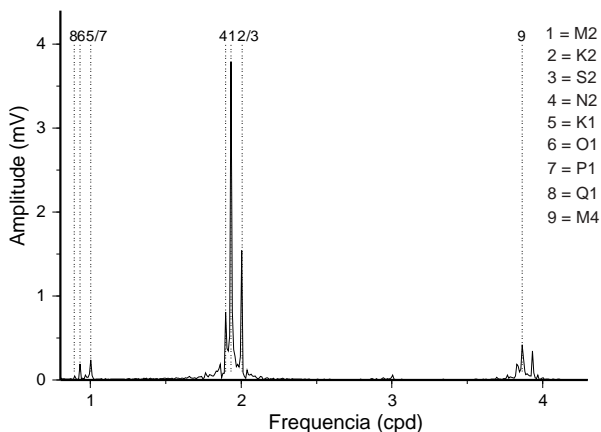


Figura 13 – Espectro de amplitudes da diferença de potencial eléctrico, entre S. Jacinto e a Barra, registadas entre 23 de Julho e 13 de Novembro de 2002

#### 4. CONCLUSÕES

As tecnologias inovadoras descritas neste trabalho são bastante promissoras e demonstram a sua aplicabilidade para a monitorização de sistemas costeiros, com claros benefícios relativamente às tecnologias convencionais. Num meio como a Ria de Aveiro, sondas convencionais de temperatura ou de fluxos dificilmente poderão funcionar em boas condições durante períodos elevados. A tecnologia que está a ser desenvolvida neste projecto apresenta diversas vantagens, como um tempo de vida elevado (prevê-se alguns anos), leitura em tempo real e ausência de manutenção

O protótipo do cabo de fibra óptica revela resultados animadores para a continuação do projecto. A temperatura da água medida pelos sensores de Bragg revela claramente o sinal da maré, visível no seu espectro por um pico energético na frequência semi-diurna. Este efeito da maré também é visível na forma da curva de temperatura da água, já que esta, para um período que compreende dois ciclos de maré, apresenta a mesma variabilidade que a série de altura de água obtida com o STD. A série de temperatura do sensor 9 do protótipo mostra uma coerência muito elevada, 0.912, com a série de maré. Esta correlação elevada revela que o calor é transportado de forma significativa pela maré ao longo dos canais da Ria de Aveiro. O desfasamento entre a temperatura da água na Barra e a temperatura da água na Vagueira é de 4.43 horas.

A tecnologia electromagnética utilizada neste estudo revela ser prometedora na determinação de caudais em canais relativamente estreitos e dominados por fortes correntes de maré. Os resultados da análise espectral dos dados de diferença de potencial mostram claramente que o pico mais energético corresponde à componente  $M_2$ , a principal componente de maré na Ria de Aveiro.

#### AGRADECIMENTOS

À empresa Irmão Cavaco, S.A., parceiros no projecto, pela instalação dos cabos de fibra óptica e eléctrico na Vagueira e na embocadura da Ria de Aveiro.

Este trabalho é financiado pelo projecto PROTEU – Tecnologias Avançadas para a Monitorização de Sistemas Estuarinos e Costeiros (PDCTM/P/MAR/15275/1999). Um dos autores (M.R.N.) também é financiada por uma bolsa da FCT (PRAXIS XXI/BPD/20170/99 e SFRH/BPD/10256/02).

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DIAS, J.M., LOPES, J.F., DEKEYSER, I. (1999). Hydrological Characterisation of Ria de Aveiro, Portugal, in Early Summer. *Oceanologica Acta*, vol. 22, nº 5, pp 473-485.
- DIAS, J.M., LOPES, J.F., DEKEYSER, I. (2000). Tidal Propagation in Ria de Aveiro Lagoon, Portugal. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 25, Nº4, pp 369-374.
- PAWLOWICZ, R., BEARDSLEY, B., LENTZ, S. (2002). Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB Using T\_TIDE. *Computers & Geosciences* 28, pp – 920-937.