

MONITORIZAÇÃO EM TEMPO REAL DA DINÂMICA COSTEIRA COM O NEXUS

Miguel Milhazes¹; Francisco Bastos¹; Diogo Fonseca¹; João Alves¹; Matheus Nascimento¹; Piet Haerens¹

¹HAEDES Portugal, Casais do Arrocho, 2025-452 Azóia de Cima, Portugal

miguel.milhazes@haedes.eu; francisco.bastos@haedes.eu; piet.haerens@haedes.eu;

joao.alves@haedes.eu; matheus.nascimento@haedes.eu; piet.haerens@haedes.eu.

Resumo

Com este trabalho pretende-se apresentar o Nexus, uma solução de monitorização de sistemas aquáticos em tempo real, desenvolvida para responder aos desafios da medição e gestão da dinâmica costeira. O Nexus integra sensores de nível de água e boias oceanográficas, permitindo uma recolha contínua de dados, acessíveis remotamente.



Figura 1. Arquitetura do sistema NEXUS.

A monitorização da dinâmica costeira continua a apresentar desafios, tanto pela variabilidade natural das condições destes ambientes como pela ausência de dados locais e contínuos. A informação sobre o estado do mar é essencial para diversas aplicações, desde a segurança da navegação e das infraestruturas costeiras, que exige dados em tempo real, até ao planeamento e dimensionamento de obras marítimas, que requerem séries temporais longas. Parâmetros como a elevação máxima da superfície do mar, a altura significativa da onda ou o nível da superfície livre têm impacto direto na operação e segurança de infraestruturas, mas nem sempre estão disponíveis com a resolução necessária (Arduin et al., 2019).

Neste contexto, os modelos numéricos são normalmente utilizados para simular as condições de agitação marítima e os seus efeitos na zona costeira. Estes modelos recorrem frequentemente a bases de dados globais, contudo, para que os resultados sejam fiáveis num contexto local, é essencial calibrá-los com dados recolhidos no terreno, uma vez que estas bases de dados podem nem sempre estar atualizadas nem serem representativas do local.

A combinação de dados *in situ* com modelação numérica e observação por satélite é, por isso, fundamental. É neste enquadramento que soluções como o Nexus podem ter um papel determinante: ao disponibilizar dados locais e contínuos de forma acessível, reforçam a base para modelos mais precisos e ferramentas de apoio à decisão mais fiáveis.

Com este trabalho apresentam-se as principais componentes tecnológicas do Nexus, os critérios para instalação em diferentes contextos costeiros e portuários, e alguns dos resultados preliminares obtidos em locais-piloto. São ainda discutidas as possibilidades de integração com outras fontes de dados e ferramentas de modelação, bem como o seu potencial para apoiar estratégias de monitorização e planeamento costeiro de médio e longo prazo.



Introdução

A monitorização da dinâmica costeira constitui um elemento central no apoio ao planeamento e à gestão de infraestruturas marítimas e portuárias. A variabilidade natural destes ambientes, associada a fenómenos como tempestades, marés vivas ou alterações de longo prazo induzidas pelas mudanças climáticas, coloca desafios tanto à segurança da navegação como à resiliência das estruturas costeiras. Neste contexto, o acesso a séries temporais de elevada resolução é fundamental para caracterizar condições extremas, validar modelos numéricos e apoiar processos de tomada de decisão em engenharia costeira.

A informação atualmente utilizada nesta área provém sobretudo de três tipos de fontes: marégrafos e boias instalados em pontos específicos da costa, observação remota por satélite e modelos numéricos de propagação da agitação marítima (como os utilizados pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera – HRES-WAM e SWAN).

Embora indispensáveis, estas abordagens apresentam limitações relevantes. A rede de boias do Instituto Hidrográfico cobre apenas parte do território nacional, com uma boia costeira e uma oceânica em quatro locais da costa continental, cinco boias no arquipélago dos Açores e três na Madeira. Outros equipamentos, como os perfiladores acústicos de correntes por efeito de Doppler (ADCP), não transmitem dados em tempo real e não fornecem séries temporais contínuas. Já a observação por satélite, apesar da vasta cobertura espacial, possui resolução temporal limitada e não capta fenómenos locais de curta duração (Peterson et al., 2003). Os modelos numéricos, por sua vez, dependem de bases de dados globais e exigem calibração local para assegurar resultados fiáveis, algo muitas vezes dificultado pela escassez de medições *in situ*.

Face a estas limitações, torna-se clara a necessidade de soluções que promovam a disponibilidade de dados locais em tempo real e que possam ser integradas de forma flexível com outras fontes de informação. Este artigo apresenta assim o desenvolvimento de um sistema de monitorização concebido para recolher e transmitir dados contínuos de parâmetros meteoceânicos. O objetivo é complementar as ferramentas existentes, aumentando a fiabilidade da calibração e validação de modelos, bem como a eficácia de sistemas de apoio à decisão no contexto costeiro e portuário.

Sistema desenvolvido

O sistema desenvolvido integra dois tipos de dispositivos de monitorização: boias oceanográficas e sensores de nível de água.

Tradicionalmente, as boias oceanográficas baseiam-se em sensores de inércia (acelerómetros combinados com giroscópios) que registavam os movimentos da superfície livre e, a partir destes, permitiam estimar parâmetros de onda. Com os avanços recentes da eletrónica, tornou-se possível recorrer ao posicionamento através de sistemas GNSS (*Global Navigation Satellite System*) para medir diretamente as variações de latitude, longitude e altitude da boia, a partir das quais se derivam os principais parâmetros de agitação marítima.

O processamento de dados inicia-se com a validação das séries temporais, removendo valores atípicos (*outliers*) e eliminando o ruído, com uma frequência de corte de $f_{cut} = 0,02$ Hz ($T = 50$ s), como mostra a Figura 2.

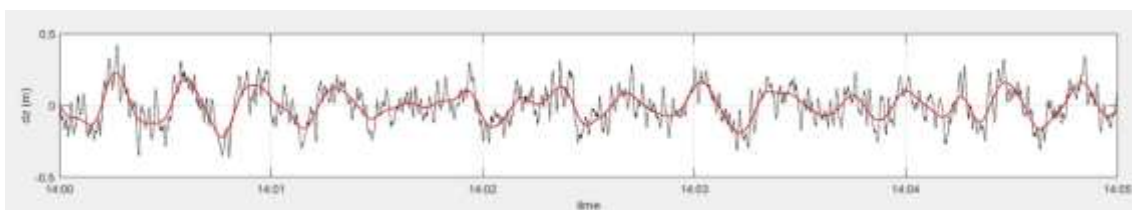


Figura 2 - Sinal de entrada e saída após frequência de corte



A análise espectral começa através da transformada rápida de Fourier (FFT), que decompõe o sinal registado pela boia nas suas diferentes frequências, como ilustrado na Figura 3a, onde a onda observada é representada como a soma das várias ondas que a constituem. Na Figura 3b, representa-se a distribuição da energia em função da frequência sob a forma de um espectro de energia das ondas. Neste gráfico é possível observar a densidade espectral e, função da frequência. A área sob a curva permite calcular a variância da superfície livre, da qual se obtêm os parâmetros característicos da onda.

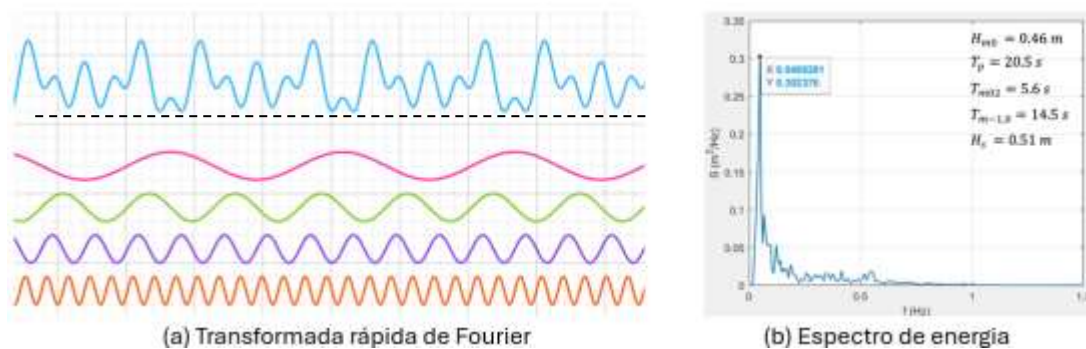


Figura 3 – Análise espectral

A correlação entre os três eixos (Norte–Sul, Este–Oeste e vertical) fornece informação sobre a direção de propagação das ondas, enquanto os registos verticais permitem calcular os parâmetros não direcionais. A partir destas análises obtêm-se os parâmetros de ondas como a altura significativa da onda (H_{m0}), o período médio (T_{m02}), o período de energia (T_{m-10}), o período de pico (T_p), direção média de propagação (MDir) e a dispersão direcional (σ_{Dir}). Estes parâmetros são fulcrais no suporte ao dimensionamento de infraestruturas marítimas, como quebra-mares e cais, no apoio à segurança operacional em portos.

Os sensores de nível são dispositivos fixos que registam a variação unidirecional da superfície livre. No sistema desenvolvido recorre-se a sensores ultrassónicos, que permitem elevada resolução temporal num formato compacto e de custo reduzido. O processamento segue uma lógica semelhante: validação, filtragem e análise espectral. No entanto, não é realizada análise direcional, limitando-se ao eixo vertical. Assim, os dados permitem derivar parâmetros como o nível médio do mar, a elevação máxima durante tempestades e a sobre-elevação induzida pela agitação. Estes sensores são igualmente úteis para identificar fenómenos de curta duração, como ondas de ressonância em portos ou ondas geradas por tráfego marítimo, que podem comprometer a segurança operacional. Além disso, a monitorização contínua da maré em escala local possibilita o estudo de estuários, rios e zonas propensas a cheias, fornecendo informação crítica para decisões em situações de risco.

Um aspeto central do sistema é a transmissão de dados em tempo quase real. Para este efeito, é utilizada telemetria por rede celular, complementada por redundância via satélite em locais sem cobertura celular. Assim, é possível não apenas a criação de bases de dados de longo prazo, mas também a integração em sistemas de alerta, contribuindo para reforçar a resiliência das infraestruturas costeiras e portuárias.

Resultados iniciais

De momento, encontram-se instaladas boias na costa algarvia e no porto de Sines, bem como sensores de nível no porto em construção em Anaklia, Geórgia. Estas implementações-piloto tiveram como objetivo testar a robustez do sistema em diferentes contextos: zonas costeiras



expostas, ambientes portuários sujeitos a tráfego intenso e zonas de construção marítima. Estes primeiros testes, ilustrados na Figura 4, permitiram avaliar o desempenho dos equipamentos em ambiente real, identificar potenciais vulnerabilidades e validar a eficácia da telemetria utilizada. Em particular, foi possível testar a telemetria em ambiente real, e analisar o impacto de fatores como a bioincrustação, a turbulência local e a interferência de estruturas portuárias nos sinais recolhidos.

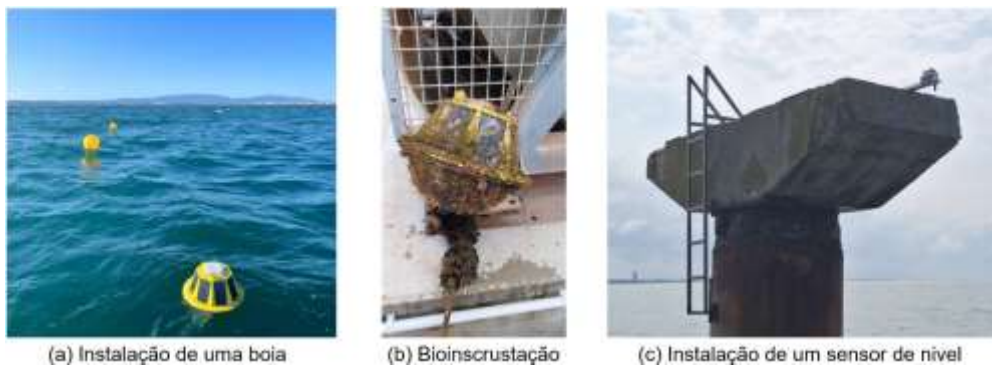


Figura 4. Testes em ambiente real.

Estes testes forneceram também informação prática sobre os requisitos de instalação e manutenção, contribuindo para otimizar os procedimentos de ancoragem das boias e de fixação dos sensores de nível. No seu conjunto, os pilotos realizados revelaram-se essenciais não apenas para aferir a fiabilidade do sistema, mas também para orientar a sua evolução, demonstrando o seu potencial como uma rede de monitorização costeira e portuária de maior escala.

Conclusões

O desenvolvimento do sistema Nexus demonstra a relevância e o potencial das soluções de monitorização em tempo quase real para responder aos desafios da gestão costeira e portuária. A integração de boias oceanográficas e sensores de nível ultrassónicos mostrou ser eficaz na recolha contínua de dados locais, assegurando séries temporais de elevada resolução e com transmissão remota estável. Os resultados preliminares obtidos confirmam a robustez do sistema, enquanto evidenciam a necessidade de procedimentos de instalação e manutenção adaptados a cada cenário. Para além do apoio imediato à segurança operacional e ao dimensionamento de infraestruturas marítimas, a disponibilidade contínua destes dados constitui uma mais-valia para a calibração de modelos numéricos e para a integração com observações por satélite, promovendo assim uma gestão costeira mais informada e resiliente.

Concluindo, os primeiros ensaios demonstram que o Nexus pode evoluir para uma rede alargada de monitorização costeira e portuária, capaz de sustentar estratégias de planeamento, mitigação de riscos e adaptação às alterações climáticas.

Referências Bibliográficas

- Arduin, F., Stopa, J.E., Chapron, B., Collard, F., Husson, R., Jensen, R.E., Johannessen, J., Mouche, A., Passaro, M., Quartly, G.D., Swail, V., e Young, I. (2019). "Observing Sea States". *Frontiers in Marine Science*, 6:124.
- Peterson, D.L., Brass, J.A., Smith, W.H., Langford, G., Wegener, S., Dunagan, S., Hammer, P., e Snook, K. (2003). "Platform options of free-flying satellites, UAVs or the International Space Station for remote sensing assessment of the littoral zone". *International Journal of Remote Sensing*, 24(13), 2785-2804.