



RASTREABILIDADE AMBIENTAL E IMUTABILIDADE COM BLOCKCHAIN

Filipe Martins

Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo (APDL)

filipe.martins@apdl.pt

Resumo

No âmbito do Projeto ReNEW foi desenvolvido e testado um sistema inovador de monitorização ambiental com base em tecnologia blockchain pública, aplicado à deteção de descargas ilegais de águas residuais por embarcações na via navegável do Douro. O sistema assenta na instalação de sensores a bordo de navios, que monitorizam de forma contínua, com cadência de minuto a minuto, o nível dos tanques de águas cinzentas e negras. A cada leitura, o sensor associa a informação de nível a dados complementares, nomeadamente a posição geográfica obtida por GPS, o número MMSI da embarcação e a data e hora, formando um registo completo e contextualizado da operação.

Estes registos são agregados e imediatamente submetidos a uma blockchain pública, assegurando a sua imutabilidade, autenticidade e disponibilidade. A escolha por uma infraestrutura pública, em vez de soluções centralizadas, garante independência relativamente a qualquer entidade específica e reforça a confiança distribuída na gestão ambiental de espaços navegáveis.

O sistema integra um componente baseado em contratos inteligentes, que monitoriza os dados inscritos. Sempre que é detetada uma redução significativa no nível dos tanques de águas residuais, o contrato verifica automaticamente se essa alteração ocorreu dentro de uma zona oficialmente designada para descargas, como um ponto de recolha de resíduos portuário ou uma instalação autorizada. Quando tal condição não se verifica, o contrato ativa um processo automático de notificação dirigido à Agência Portuguesa do Ambiente, permitindo o início de uma averiguação com base em evidência digital segura e não alterável.

Esta abordagem representa um avanço significativo na fiscalização ambiental em ambientes fluviais e portuários. A integridade dos dados assegurada pela tecnologia blockchain estabelece um novo paradigma de responsabilidade ambiental, suportado em rastreabilidade contínua e validação independente. Além disso, esta solução funciona como um mecanismo indireto de incentivo ao bom comportamento, promovendo práticas mais responsáveis por parte dos operadores, que passam a saber que as suas ações estão a ser registadas de forma permanente e verificável.

Mais do que um caso isolado, esta aplicação valida o potencial do uso de blockchain como infraestrutura de confiança em sistemas de monitorização ambiental distribuída. A solução poderá ser aplicada a outros contextos, como o controlo de lavagens de tanques em mar aberto, descargas de águas de lastro ou emissões de poluentes em zonas costeiras sensíveis. A sua eficácia dependerá, naturalmente, da adoção alargada desta tecnologia e de políticas públicas que incentivem a interoperabilidade entre sensores, normas e plataformas de confiança.

A experiência no Douro demonstra que é possível articular tecnologia avançada com objetivos ambientais exigentes, contribuindo para práticas mais sustentáveis em portos e vias navegáveis e alinhando-se com a visão europeia de um transporte fluvial mais limpo, transparente e resiliente.

Introdução

As vias navegáveis interiores desempenham um papel fundamental na mobilidade, na economia regional e no turismo, mas estão também sujeitas a pressões ambientais significativas. No caso do rio Douro, a navegação turística constitui uma atividade relevante, que movimenta milhares de passageiros todos os anos e contribui de forma decisiva para a economia local. Contudo, esta atividade gera igualmente desafios relacionados com a gestão de recursos hídricos e com o



tratamento adequado das águas residuais produzidas a bordo.

Embora existam infraestruturas de receção portuária para a recolha de águas cinzentas e negras, a fiscalização do cumprimento das regras ambientais apresenta limitações. Os mecanismos tradicionais de monitorização baseiam-se sobretudo em inspeções presenciais e em registos de abastecimento e descarga, o que não permite assegurar, em tempo real, a deteção de descargas irregulares. Acresce ainda uma lacuna institucional: a Agência Portuguesa do Ambiente (APA) não procede à certificação ou fiscalização sistemática das estações de tratamento de águas residuais (ETAR) instaladas a bordo das embarcações, enquanto a Direção-Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos (DGRM), ao certificar as embarcações, não avalia esses sistemas por considerar que a matéria é de natureza ambiental. Esta indefinição cria um vazio regulatório que fragiliza a fiscalização.

Foi neste contexto que, no âmbito do projeto europeu ReNEW – Resilience-centric Smart, Green, Networked EU Inland Waterways, se procurou explorar o potencial de tecnologias emergentes para reforçar a rastreabilidade ambiental e aumentar a transparência na gestão das descargas. O conceito testado no Living Lab do Douro combinou sensores já disponíveis a bordo das embarcações com uma infraestrutura de dados baseada em blockchain pública. A literatura recente confirma que a combinação IoT e blockchain tem sido proposta como infraestrutura de confiança para dados ambientais, sobretudo pela imutabilidade, rastreabilidade e auditabilidade distribuída, embora com limitações de escalabilidade e governação que condicionam a sua adoção em larga escala (Mulligan et al., 2024; Arshad et al., 2023). No domínio hídrico, revisões sistemáticas da literatura sobre sistemas de monitorização da qualidade da água baseados em IoT e blockchain evidenciam ganhos consistentes na integridade dos dados e na automatização da conformidade através de contratos inteligentes, reforçando a confiança pública nos registos ambientais (Thuy et al., 2025; Wang et al., 2025).

A utilização da blockchain introduz uma dimensão de imutabilidade, autenticidade e auditabilidade independente, ultrapassando as limitações de sistemas centralizados e reforçando a confiança no processo de fiscalização. Associada a contratos inteligentes, esta tecnologia permite automatizar a verificação das condições de descarga, gerar alertas em tempo real e disponibilizar evidência digital segura às autoridades competentes.

O presente artigo apresenta a experiência desenvolvida no Douro, descrevendo a metodologia seguida, os principais resultados alcançados e as implicações desta abordagem para a evolução dos mecanismos de monitorização ambiental em portos e vias navegáveis.

Metodologia

A metodologia seguida no Living Lab do Douro baseou-se numa abordagem participativa e iterativa, integrando entidades reguladoras, operadores, a autoridade portuária e parceiros tecnológicos do projeto ReNEW. O objetivo foi assegurar que a solução desenvolvida respondia a desafios operacionais reais e se enquadrava no contexto institucional português.

Envolvimento de stakeholders

Desde o início do processo foram realizadas reuniões técnicas com a APA e a DGRM, de forma a validar os requisitos legais e operacionais. Adicionalmente, envolveram-se operadores turísticos do Douro, enquanto potenciais utilizadores e destinatários diretos do sistema, assim como estaleiros navais para validar tecnicamente a abordagem preconizada.

Recolha e enriquecimento de dados

Para garantir total independência relativamente aos sistemas de bordo e assegurar a fiabilidade da informação recolhida, foi instalado um sensor ultrassónico dedicado no tanque de águas residuais, ligado a um datalogger próprio desenvolvido no âmbito do projeto. Este dispositivo integrava ainda um módulo GPS autónomo e um relógio interno, o que permitiu assegurar que tanto a georreferenciação como a marca temporal de cada leitura não dependiam dos equipamentos originais da embarcação.



Cada medição de nível do tanque foi assim complementada com a posição geográfica, a identificação da embarcação através do número MMSI e a data e hora do registo, produzindo pacotes de dados completos, consistentes e contextualizados. Esta arquitetura garantiu a rastreabilidade independente de toda a informação, representando em tempo quase real o nível dos tanques de águas residuais a bordo.

Submissão em blockchain

Os dados eram agregados localmente por um computador embarcado com conectividade 4G/5G, responsável pelo pré-processamento e envio dos registos para uma blockchain pública. Esta opção assegurou independência relativamente a qualquer entidade central e reforçou a confiança no sistema, uma vez que a informação se tornava imutável e auditável por qualquer parte interessada. A escolha de uma infraestrutura pública visou maximizar a auditabilidade independente e a confiança institucional, ainda que blockchains permissionadas oferecessem menor latência e maior controlo de acesso (Mulligan et al., 2024).

Contratos inteligentes

Foi desenvolvido um contrato inteligente que monitorizava automaticamente os dados inscritos na blockchain. Sempre que se verificava uma redução significativa do nível dos tanques, o contrato validava se tal ocorrência coincidia com uma zona georreferenciada de descarga autorizada, como pontos de recolha portuários ou instalações credenciadas. Caso contrário, era registado um evento de não conformidade.

Notificação e auditoria

Quando um evento de descarga irregular era detetado, o sistema emitia uma notificação automática às entidades competentes, contendo dados técnicos do incidente: posição, hora, identificação da embarcação e variação registada no tanque. Todos os registos permaneciam armazenados de forma imutável e verificável, criando uma evidência digital robusta que poderia suportar processos de fiscalização ou de auditoria ambiental.

Resultados e Discussão

A solução foi testada no âmbito do Living Lab do Douro através da instalação do sistema a bordo da embarcação Cachão da Valeira, operada pela APDL. Esta embarcação foi selecionada por possuir tanques de águas residuais de capacidade comparável às dos navios de cruzeiro turístico que operam regularmente no rio Douro.

Validação funcional

Durante a fase piloto foram realizadas simulações de descargas legais e ilegais, que confirmaram a capacidade do sistema para detetar reduções de nível nos tanques em tempo quase real, validar automaticamente se a descarga ocorria numa área georreferenciada autorizada, registar o evento de forma imutável na blockchain pública e gerar alertas automáticos para as autoridades competentes. Estes resultados comprovaram a viabilidade técnica do modelo, bem como a robustez dos mecanismos de rastreabilidade e de auditoria digital.

Transparência e confiança

A utilização de uma blockchain pública revelou-se um fator diferenciador. Em vez de um sistema centralizado e dependente de uma única entidade, os registos foram armazenados numa infraestrutura distribuída, neste caso a rede Ethereum, garantindo confiança, transparência e independência institucional. Esta característica foi valorizada nas reuniões com stakeholders, em particular pelas autoridades ambientais, que reconheceram a importância da imutabilidade para efeitos de prova. Estes resultados alinham-se com observações reportadas noutros estudos, que demonstram ganhos de confiança institucional quando a integridade e a ordem temporal das medições ambientais são ancoradas em ledgers distribuídos (Mulligan et al., 2024).



Limitações identificadas

Apesar dos resultados positivos, o piloto apresentou algumas limitações. O sistema foi testado apenas numa embarcação, não permitindo avaliar o impacto em larga escala, e não foi possível quantificar diretamente uma redução efetiva de descargas ilegais, dado o curto período de implementação. Acresce ainda que subsistem lacunas regulatórias relacionadas com a certificação das ETAR a bordo, que condicionam a adoção plena da solução. A literatura sublinha também limitações estruturais semelhantes em projetos de monitorização ambiental baseados em blockchain, nomeadamente a escalabilidade e os custos por transação, bem como o chamado problema do “oráculo”: a blockchain não valida a veracidade física da medição, exigindo mecanismos complementares de certificação do hardware, calibrações periódicas e redundância de sensores (Ajakwe et al., 2025).

Potencial de replicação

Apesar destas limitações, a experiência revelou um forte potencial de replicação em outros contextos ambientais. Para além da aplicação aos navios no Douro, a mesma abordagem poderá ser utilizada para monitorizar lavagens de tanques em mar aberto, descargas de águas de lastro ou rastreabilidade de emissões atmosféricas em zonas costeiras sensíveis. A arquitetura modular, baseada em sensores, contratos inteligentes e blockchain pública, poderá ser facilmente adaptada a diferentes usos, reforçando o seu carácter transversal.

O piloto desenvolvido no âmbito do projeto ReNEW, aplicado à via navegável do Douro, demonstrou a viabilidade técnica e institucional de um sistema de monitorização ambiental suportado em blockchain pública. Os resultados obtidos confirmaram que é possível detetar e validar automaticamente descargas de águas residuais, gerar evidência digital segura e disponibilizá-la de forma imediata às autoridades competentes. Esta abordagem contribui não apenas para a fiscalização mais eficaz, mas também para um efeito dissuasor, incentivando comportamentos responsáveis por parte dos operadores.

Conclusões

Embora a experiência se tenha limitado a uma escala piloto, o sistema revelou um forte potencial de replicação em outros contextos, como a monitorização de lavagens de tanques, descargas de águas de lastro ou emissões poluentes em zonas costeiras sensíveis. A consolidação desta solução dependerá, contudo, da sua integração em políticas públicas claras e de uma maior articulação institucional no enquadramento regulatório das ETAR a bordo.

Em síntese, este caso de estudo no Douro valida o contributo das tecnologias emergentes, em particular da blockchain, como instrumentos estratégicos para reforçar a sustentabilidade, a transparência e a resiliência do transporte fluvial e portuário.

Referências Bibliográficas

- Arshad, R., et al. (2023). “Blockchain and environmental sustainability: A systematic literature review”. *Journal of Cleaner Production*, 411, 137296.
- Ajakwe, I. U., et al. (2025). “Internet-of-Things-blockchain integration in environmental monitoring systems”. *International Journal of Environmental Science and Technology* (online).
- Mulligan, C., et al. (2024). “Blockchain for sustainability: A systematic literature review”. *Marine Policy*, 160, 105908.
- Thuy, T. L., et al. (2025). “Blockchain-Enabled Water Quality Monitoring: A Comprehensive Review of Digital Innovations and Challenges”. *Water*, 17(17), 2522.
- Wang, X., et al. (2025). “Improving the quality of groundwater self-monitoring based on blockchain”. *Environmental Impact Assessment Review* (online).