INSTITUTO
UNIVERSITÁRIO
DE LISBOA

Adoção da Tecnologia Blockchain no Contexto das Cadeias de Abastecimento Marítimas

João Miguel Gonçalves dos Santos Rosa

Mestrado em Tecnologias Digitais para o Negócio

Orientador:
Professor Doutor João Carlos Amaro Ferreira,
Professor Auxiliar com Agregação,
ISCTE-IUL

janeiro de 2026

TECNOLOGIAS
E ARQUITETURA

Departamento de Ciências e Tecnologias da Informação

Adoção da Tecnologia Blockchain no Contexto das Cadeias de Abastecimento Marítimas

João Miguel Gonçalves dos Santos Rosa

Mestrado em Tecnologias Digitais para o Negócio

Orientador:
Professor Doutor João Carlos Amaro Ferreira,
Professor Auxiliar com Agregação,
ISCTE-IUL

janeiro de 2026

“Sometimes when you innovate, you make mistakes.
It is best to admit them quickly, and get on with improving your other innovations.”
Steve Jobs

Agradecimento

A presente dissertação é o culminar de um longo, mas recompensador, ano árduo de estudo e de trabalho académico e igualmente marcado por uma forte aprendizagem e de redescobrimento da vida académica.

Quero começar por agradecer ao professor João Carlos Ferreira pela sua imensa disponibilidade no trabalho de orientação de redação da tese. Quero também agradecer aos meus colegas Carla Varanda, Paulo Moreira e Ricardo Tomásio pelo espírito de grupo e de entreajuda que demonstraram ao longo deste ano.

Um especial agradecimento à minha família, minha companheira Lilian e o meu filho Diego que apesar de privados da minha companhia por longos períodos, o seu incansável apoio motivou-me e permitiu-me que continuasse focado no objetivo de realizar o mestrado em tecnologias digitais para o negócio.

Agradeço também aos meus pais, pelo amor e pela educação que me proporcionaram, que moldaram a pessoa e o profissional que sou atualmente.

Resumo

Esta dissertação desenvolve e valida, em contexto académico, uma solução conceptual baseada em tecnologia blockchain para aplicação nas cadeias de abastecimento marítimas, com particular enfoque no ecossistema portuário português. O trabalho foi conduzido segundo a Design Science Research Methodology (DSRM), estruturando-se em várias etapas complementares: revisão sistemática da literatura, definição de requisitos técnicos, conceção de uma arquitetura tecnológica e validação conceptual do artefacto proposto.

Numa primeira fase, foi realizada uma revisão sistemática da literatura, seguindo o protocolo PRISMA, que permitiu identificar o estado da arte, as principais tendências de adoção, os benefícios associados e as barreiras existentes à implementação da blockchain no setor marítimo-logístico. Com base nesta análise, foram definidos requisitos técnicos e funcionais alinhados com os desafios reais do setor.

Subsequentement, foi concebida uma arquitetura conceptual baseada em Hyperledger Fabric, estruturada como uma rede blockchain permissionada, capaz de suportar a rastreabilidade de contentores, a gestão segura de documentação eletrónica e a automação de processos logísticos através de smart contracts. A solução integra múltiplos stakeholders — incluindo autoridades portuárias, operadores logísticos, transportadoras e entidades reguladoras — promovendo interoperabilidade, transparência e confiança entre intervenientes.

A validação do artefacto foi realizada através de um questionário estruturado aplicado a profissionais do setor marítimo-portuário, permitindo avaliar a utilidade percebida, a viabilidade de adoção e as principais barreiras associadas. Os resultados evidenciam uma perceção globalmente positiva quanto ao potencial da solução para melhorar a eficiência operacional, a rastreabilidade e a confiança interorganizacional, embora condicionada por desafios de natureza regulatória, organizacional e de interoperabilidade.

O principal contributo deste trabalho reside na proposta de uma arquitetura conceptual alinhada com as necessidades do setor marítimo, complementada por uma validação empírica baseada na perceção de stakeholders, contribuindo para a compreensão dos fatores críticos que influenciam a adoção da blockchain em cadeias de abastecimento marítimas.

Palavras-chave: Blockchain; Cadeias de Abastecimento Marítimas; Hyperledger Fabric; Design Science Research; Logística Portuária; Transformação Digital.

Abstract

This dissertation develops and conceptually validates a blockchain-based solution for application in maritime supply chains, with a particular focus on the Portuguese port ecosystem. The research was conducted following the Design Science Research Methodology (DSRM), structured across several complementary stages: systematic literature review, definition of technical requirements, design of a technological architecture, and conceptual validation of the proposed artefact.

In the initial phase, a systematic literature review was conducted using the PRISMA protocol, enabling the identification of the state of the art, adoption trends, associated benefits, and existing barriers to blockchain implementation in the maritime-logistics sector. Based on this analysis, a set of technical and functional requirements aligned with real-world industry challenges was established.

Subsequently, a conceptual architecture based on Hyperledger Fabric was designed, structured as a permissioned blockchain network capable of supporting container traceability, secure electronic document management, and process automation through smart contracts. The solution integrates multiple stakeholders — including port authorities, logistics operators, shipping companies, and regulatory entities — promoting interoperability, transparency, and trust among participants.

The artefact was validated through a structured questionnaire administered to professionals in the maritime-port sector, enabling the assessment of perceived usefulness, adoption feasibility, and key implementation barriers. The results indicate an overall positive perception regarding the solution's potential to improve operational efficiency, traceability, and interorganizational trust, although conditioned by regulatory, organizational, and interoperability challenges.

The main contribution of this work lies in the proposal of a conceptual architecture aligned with the needs of the maritime sector, complemented by empirical validation based on stakeholder perceptions, contributing to a deeper understanding of the critical factors influencing blockchain adoption in maritime supply chains.

Keywords: Blockchain; Maritime Supply Chains; Hyperledger Fabric; Design Science Research; Port Logistics; Digital Transformation.

Índice

Agradecimento iii
Resumo v
Abstract vii
Índice de Figuras xiii
Índice de Tabelas xv
Lista de Abreviaturas xvii
CAPÍTULO 1 1
Introdução 1
1.1. Enquadramento 1
1.2. Motivação e relevância do estudo 2
1.3. Problema 4
1.4. Objetivos 5
1.5. Estrutura da tese 6
CAPíTULO 2 9
Revisão da Literatura 9
2.1. Análise de casos relevantes de implementação de blockchain no setor marítimo 9
2.1.1. Plataforma TradeLens (IBM–Maersk) 9
2.1.2. Porto de Antuérpia e projetos com a T-Mining 9
2.1.3. Global Shipping Business Network 10
2.1.4. VesselChain – Rastreio Descentralizado de Emissões e Sustentabilidade 11
2.2. Revisão de Literatura 12
2.2.1. Metodologia PRISMA 12
2.2.2. Pesquisa 14
2.2.3. Critérios de inclusão e exclusão. 15
2.2.4. Principais conclusões da revisão sistemática 15
CAPíTULO 3 21
Implementação de solução tecnológica em blockchain 21
3.1 Requisitos Técnicos 23
3.2 Arquitetura Técnica 25
3.2.1 Stakeholders na Cadeia Logística Marítima 26
3.2.1 Componentes Técnicos da Arquitetura 29

CAPÍTULO 4 35
Caso de implementação da solução Hyperledger Fabric aplicada aos Portos de Leixões, Lisboa e Sines 35
4.1. Identificação do problema e motivação 36
4.2. Solução proposta com Hyperledger Fabric 37
4.3. Concepção e desenvolvimento da solução 40
4.4. Modelo de dados mínimo 41
4.5. Mecanismo de governo 41
4.6. Interoperabilidade com PCS, TOS e sistemas aduaneiros (exemplos conceptuais) 41
4.7. Blocos funcionais da solução Hyperledger Fabric 42
4.8. Benefícios esperados e principais desafios 44
4.9. Demonstração e avaliação 45
CAPÍTULO 5 47
Validação Conceptual da Solução 47
5.1. Estrutura do questionário e tipologia de itens 48
5.2. Dimensões avaliadas e fundamentações teóricas do inquérito 48
5.3. Perguntas por dimensão 49
5.4. Questões qualitativas 51
5.5. Consistência interna e fiabilidade (Cronbach's alpha) 51
5.6. Síntese metodológica 52
5.7. Resultados da Investigação 52
5.8. Perfil da amostra 52
5.9. Análise dos resultados 54
5.10. Barreiras à implementação da solução 55
5.11. Limitações do estudo 55
5.12. Conclusão do estudo 56
CAPÍTULO 6 57
Discussão 57
6.1. Potenciais benefícios da implementação da tecnologia blockchain 57
6.2. Principais desafios à implementação da tecnologia blockchain 58
6.3. Fatores críticos para a implementação da solução 59
6.4. Síntese da Discussão 59
CAPÍTULO 7 61
Conclusões e Investigações Futuras 61
7.1 Como os objetivos foram alcançados 61
7.2 Resposta às Research Questions (RQs) 62

7.4 Conclusão final 63
7.4 Limitações e trabalho futuro 64
Referências Bibliográficas 65
Anexo A 68
Inquérito 68

Índice de Figuras

Figura 1:Principais intervenientes da cadeia logística marítima [9] 3
Figura 2:Diagrama do fluxo de PRISMA para a revisão sistemática de literatura 12
Figura 3 : Fluxograma da metodologia DSRM com integração de analítica preditiva baseada em XGBoost 22
Figura 4: Diagrama macro da arquitetura técnica [9] 23
Figura 5: Arquitetura técnica 26
Figura 6: Arquitetura técnica - Stakeholders na Cadeia Logística Marítima 28
Figura 7: Componentes técnicos da Hyperledger Fabric 29
Figura 8: Processo de transporte com utilização de IoT, blockchain e smartcontracts 33
Figura 9: Ilustração da solução em Hyperledger Fabric 38
Figura 10: View dashboard Operador Logístico 39
Figura 11: View dashboard Autoridade Portuária 39
Figura 12: View dashboard Alfândega 40
Figura 13: Blocos funcionais da solução Hyperledger Fabric 43
Figura 14: Gráfico com a distribuição etária dos participantes 53
Figura 15: Gráfico com a distribuição do género dos inquiridos 53

Índice de Tabelas

Tabela 1 Resumos dos principais trabalhos identificados 13
Tabela 2: Evolução tendências observadas entre 2020 e 2025 18
Tabela 3: Requisitos Técnicos 24
Tabela 4: Identificação Stakeholders e suas funções..... 27
Tabela 5: Distribuição dos dados entre a blockchain e armazenamentos externos 32
Tabela 6: Modelo de dados mínimo - ativos, campos e estados (lifecycle) 41
Tabela 7: Resultados do inquérito 54
Tabela 8: Alinhamento entre as questões de investigação, resultados do estudo e evidência teórica 60
Tabela 9: Tabela Cumprimento Objetivos 62
Tabela 10: Resposta Research Questions 63

Lista de Abreviaturas

API – Application Programming Interface

CA – Certificate Authority

DSRM – Design Science Research Methodology

eBL – Electronic Bill of Lading

eFTI – Electronic Freight Transport Information

IA – Inteligência Artificial

IoT – Internet of Things

ML – Machine Learning

MSP – Membership Service Provider

NFT – Non-Fungible Token

PCS – Port Community System

PoC – Proof of Concept

PRISMA – Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses

RFID – Radio-Frequency Identification

TEU – Twenty-foot Equivalent Unit

TLS – Transport Layer Security

TOS – Terminal Operating System

XGBoost – Extreme Gradient Boosting

ZKP / ZKPs – Zero-Knowledge Proof(s)

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1. Enquadramento

O setor marítimo desempenha um papel crítico no comércio internacional, sendo responsável por aproximadamente 80 a 90% do volume total das trocas comerciais mundiais [1], [2]. Esta preponderância verifica-se igualmente na Europa e também em Portugal, onde os sistemas de abastecimento marítimo constituem um pilar da economia nacional, beneficiando de uma localização geoestratégica privilegiada e de uma elevada dependência do transporte marítimo para as operações de exportação e importação.

Não obstante da sua importância, as cadeias logísticas marítimas enfrentam desafios persistentes relacionados com a ineficiência operacional, a excessiva burocracia, a falta de transparência e riscos de fraude [2]. Historicamente, a documentação física tem sido amplamente utilizada — um exemplo paradigmático é o conhecimento de embarque, cuja existência remonta a vários séculos e que, ainda hoje, subsiste maioritariamente em formato papel [3], o que contribui para a morosidade e vulnerabilidade dos processos logísticos.

Estima-se que cerca de 20% dos custos associados ao envio de um contentor estejam relacionados com encargos administrativos, nomeadamente a produção e gestão de documentação em suporte físico[3], o que ilustra a preponderância da burocracia nas operações marítimas. Estas ineficiências não só aumentam os custos logísticos, como também alavancam atrasos, litígios comerciais e oportunidades de práticas fraudulentas no manuseamento de mercadorias[2].

Nos últimos anos, a tecnologia blockchain tem emergido como uma potencial solução disruptiva para mitigar diversos destes obstáculos nas cadeias de abastecimento.

No contexto das cadeias logísticas marítimas, esta tecnologia oferece a possibilidade de digitalizar e modernizar processos tradicionalmente executados em papel, assegurando a rastreabilidade integral das operações, o acompanhamento em tempo real, a redução de erros humanos e a prevenção da adulteração de documentos [4]. Para além disso, através da adoção de contratos inteligentes (smart contracts) — constituem mecanismos programáveis que executam automaticamente ações comerciais, como autorizações de entrega ou pagamentos condicionados ao cumprimento de determinados critérios — é possível eliminar intermediários desnecessários e agilizar as operações logísticas [5].

Deste modo, a adoção da tecnologia blockchain possui o potencial de reforçar a eficiência, melhorar a segurança da informação e fomentar a confiança entre os diversos intervenientes da cadeia de abastecimento, incluindo transportadoras, transitários, terminais portuários, autoridades aduaneiras, seguradoras, entre outros. Na realidade, diversas investigações sugerem que a implementação desta tecnologia no setor do transporte marítimo poderá reduzir significativamente as fraudes, otimizar procedimentos e fortalecer as relações de confiança entre os parceiros logísticos, aumentando simultaneamente a transparência e a segurança nas transações.

Este paradigma inovador tem dado origem a várias iniciativas e projetos-piloto no setor marítimo. Um dos exemplos mais emblemáticos é a plataforma TradeLens [6], desenvolvida em parceria entre a Maersk — um dos maiores armadores a nível mundial — e o gigante tecnológico IBM. Lançada em 2018, a plataforma ambicionava juntar todos os atores da logística marítima num único sistema global, com o objetivo de alcançar a rastreabilidade total e a digitalização da mercadoria contentorizada, demonstrando a aplicabilidade da blockchain na integração entre portos, operadores logísticos, despachantes e expedidores, juntos numa rede partilhada.

Paralelamente, vários portos internacionais têm vindo a aderir a esta vaga de inovação. O Porto de Antuérpia [5], por exemplo, implementou um projeto-piloto que recorre à blockchain para garantir a libertação segura de contentores, eliminando a necessidade de utilização de códigos PIN suscetíveis de abuso. Outros portos europeus — como Roterdão, Valência ou Barcelona — têm igualmente explorado soluções baseadas em blockchain para aumentar a eficiência e a segurança nas suas comunidades portuárias.

Em Portugal, esta transformação tecnológica começou também a ganhar tração, sobretudo no setor das pescas. A startup Bitcliq [7], sediada nas Caldas da Rainha, desenvolveu o primeiro marketplace baseado em tecnologia blockchain destinado à comercialização de pescado, permitindo ligações em tempo real entre embarcações e compradores, assegurando a rastreabilidade total desde a captura até ao consumo final.

Estes exemplos evidenciam uma tendência crescente, tanto a nível internacional como nacional, de implementação da tecnologia blockchain nos ecossistemas marítimos, com vista à modernização de processos e à criação de valor num setor tradicionalmente histórico e caracterizado por uma abordagem conservadora.

1.2. Motivação e relevância do estudo

Apesar do expressivo potencial atribuído à tecnologia blockchain e do entusiasmo gerado por diversas iniciativas inovadoras, a realidade demonstra que a sua implementação efetiva nas cadeias de abastecimento marítimas permanece ainda aquém das expectativas [8].

A maioria esmagadora dos documentos de transporte marítimo continua a ser emitida em formato e suporte convencional, físico. Estimativas recentes apontam que apenas entre 1,5% e 2% das cartas de porte de embarque são atualmente emitidas em formato eletrónico a nível mundial (eBL – Electronic Bill of Lading) [5], o que evidencia o ainda lento progresso da digitalização no setor. A tecnologia blockchain, por consequência, ainda não se encontra amplamente incorporada nas operações quotidianas do comércio marítimo. A Figura *1* ilustra os principais intervenientes e os desafios nos processos tradicionais da cadeia logística marítima.

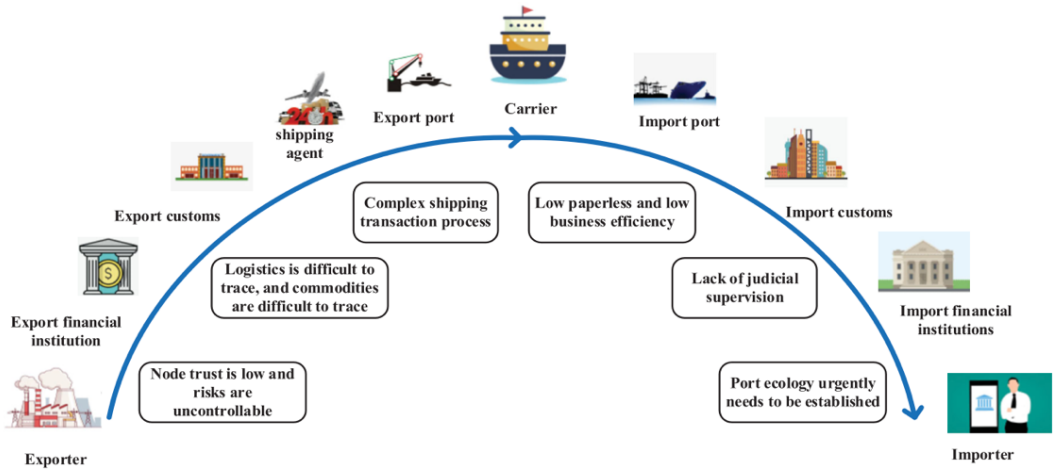


Figura 1:Principais intervenientes da cadeia logística marítima [9]

Inclusivamente, iniciativas de referência, como a plataforma TradeLens, enfrentaram obstáculos significativos[6]. No final de 2022, a Maersk anunciou a descontinuação da plataforma até ao primeiro trimestre de 2023, justificando a decisão com a insuficiência de cooperação industrial global necessária para assegurar a viabilidade do projeto. Embora a tecnologia tenha demonstrado a sua eficácia, a ausência de elementos-chave — como outras transportadoras, transitários e expedidores — inviabilizou o desenvolvimento do efeito de rede indispensável ao sucesso da plataforma. Este desfecho sublinha um aspeto fundamental: a adoção da blockchain não depende exclusivamente da tecnologia em si, mas, sobretudo, do alinhamento estratégico entre todos os intervenientes e da transformação organizacional e setorial que a sua aplicação exige [10].

Apesar da proliferação de investigações focadas na blockchain em cadeias de abastecimento de forma geral, a sua aplicabilidade nos domínios portuário e marítimo permanece ainda pouco explorada. Existem publicações que salientam os benefícios da tecnologia, acompanhados de descrições de casos iniciais, mas verifica-se uma lacuna no que concerne à identificação clara dos obstáculos, oportunidades e impactos concretos da blockchain no setor, bem como orientações para a sua implementação eficaz.

Esta lacuna é particularmente notória no contexto europeu e, em especial, em Portugal, onde as dinâmicas regulatórias, económicas e culturais podem diferir substancialmente de geografia para geografia. Assim, revela-se pertinente uma análise e estudo sobre a forma como a adoção da tecnologia blockchain está a materializar-se (ou poderá vir a materializar-se) nas cadeias de abastecimento marítimo na Europa, avaliando até que ponto as capacidades tecnológicas se traduzem em resultados tangíveis e quais os fatores que facilitam ou dificultam esse processo.

As redes logísticas marítimas enfrentam, na atualidade, pressões acrescidas no sentido de se tornarem mais resilientes, eficientes e sustentáveis, em consonância com agendas políticas e económicas, como os programas de digitalização e descarbonização do setor dos transportes promovidos pela União Europeia. A tecnologia blockchain, ao permitir mecanismos de confiança descentralizada e de partilha segura de informação, poderá contribuir significativamente para esses objetivos — promovendo a desmaterialização documental, o cumprimento normativo (com redução dos custos de auditoria) e a articulação em tempo real entre os agentes comerciais.

No caso português, sendo um país com uma forte herança marítima e com ambições de se afirmar como um polo logístico no Atlântico, compreender os desafios e as oportunidades trazidas pela tecnologia blockchain no setor marítimo reveste-se não apenas de interesse teórico, mas também de relevância estratégica. Portos nacionais como Sines, Leixões ou Lisboa poderão beneficiar da utilização de soluções baseadas em blockchain para melhorar os fluxos de contentores, reduzir tempos de escala e potenciar a integração com redes logísticas internacionais, tornando-se mais competitivos e atrativos. Do mesmo modo, empresas portuguesas do setor dos transportes e logística marítima poderão beneficiar da adoção precoce desta tecnologia, ao reforçar a transparência junto de clientes internacionais e ao integrarem plataformas de alcance global.

Assim, a motivação para o presente trabalho resulta da necessidade de identificar mecanismos para acelerar a transformação digital no setor, potenciando os benefícios desta tecnologia junto dos diversos stakeholders.

1.3. Problema

Apesar do amplo consenso em torno das vantagens potenciais associadas à tecnologia blockchain, a sua implementação efetiva nas cadeias de abastecimento marítimas tem ocorrido de forma lenta e limitada. Verifica-se, neste contexto, um paradoxo evidente: por um lado, existem múltiplos benefícios teóricos documentados e experiências piloto bem-sucedidas; por outro, a integração da tecnologia blockchain nas operações marítimas permanece incipiente e enfrenta diversos desafios estruturais e operacionais.

Este desfasamento entre o potencial e a prática levanta questões fundamentais quanto aos fatores que sustentam a resistência ou as dificuldades na adoção da tecnologia. A questão que norteia este pode, assim, ser enunciada nos seguintes termos: quais os motivos que explicam o reduzido avanço da adoção da tecnologia blockchain nas cadeias logísticas marítimas, tendo em conta o seu potencial inovador, e de que forma poderão ser superados os obstáculos existentes? Paralelamente, procura-se compreender quais os benefícios antecipados e que condições são necessárias para a sua concretização.

Este problema de investigação envolve múltiplas dimensões interligadas. Do ponto de vista tecnológico, podem ser identificados entraves como a escalabilidade das soluções blockchain, a integração com os denominados sistemas legados e a eficiência das infraestruturas tecnológicas disponíveis. Em paralelo, surgem obstáculos de natureza organizacional, como a necessidade de reengenharia dos processos, a alocação de recursos financeiros, a escassez de competências técnicas e interpessoais específicas e, nomeadamente, a resistência à mudança. Adicionalmente, importa considerar os fatores interorganizacionais, designadamente a exigência de cooperação entre múltiplos intervenientes, a necessidade de alinhamento de incentivos e a definição de critérios comuns de atuação.

Há evidência de que as complexidades inerentes ao setor marítimo — marcado por uma multiplicidade de intervenientes, regulações heterogéneas e elevado grau de incerteza — contribuem para a morosidade na adoção da tecnologia. Os obstáculos práticos — desde os custos iniciais significativos até à ausência de harmonização entre stakeholders — continuam a limitar a disseminação da tecnologia, mesmo perante os benefícios potenciais ao nível da eficiência, transparência e segurança das operações.

Em simultâneo, constata-se uma lacuna de conhecimento aprofundado sobre as estratégias mais eficazes para estimular a adoção da blockchain, o que dificulta a tomada de decisões informadas por parte dos gestores e os decisores políticos. Esta carência teórica e prática compromete a capacidade do setor de explorar plenamente as potencialidades da tecnologia.

Em síntese, o presente estudo visa analisar a discrepância entre o potencial disruptivo da tecnologia blockchain e a sua aplicação concreta no setor marítimo, com o objetivo de identificar os principais entraves à sua adoção e propor vias viáveis para a sua implementação.

1.4. Objetivos

Com o intuito de responder ao problema acima identificado, pretende-se estabelecer um conjunto de objetivos que possibilitem orientar a estrutura e desenvolvimento do presente estudo. Os principais objetivos definidos são os seguintes:

- Analisar o estado da arte e o potencial da tecnologia blockchain nas cadeias de abastecimento marítimas;
- Identificar os principais desafios e requisitos associados à adoção da blockchain em cadeias de abastecimento marítimas;
- Conceber uma solução tecnológica baseada em blockchain aplicada às cadeias de abastecimento marítimas; e
- Validar conceptualmente a solução proposta junto de profissionais do setor marítimo.

Estes objetivos podem ser, resumidamente, mapeados nas seguintes questões de investigação ("Research Question"):

- RQ1 – Quais os benefícios potenciais percebidos da adoção da tecnologia blockchain nas cadeias de abastecimento marítimas, em termos de eficiência operacional, transparência, rastreabilidade e reforço da confiança interorganizacional?
- RQ2 – Quais os principais obstáculos à adoção da tecnologia blockchain no contexto marítimo-portuário, incluindo barreiras legais/regulatórias, interoperabilidade com sistemas legados, custos de implementação, partilha de informação sensível e resistência organizacional à mudança?
- RQ3 – Quais os fatores determinantes para a aceitação e adoção futura de soluções blockchain no setor marítimo, nomeadamente ao nível do modelo de governação, envolvimento regulatório, interoperabilidade, implementação gradual, capacitação e compromisso da liderança?

1.5. Estrutura da tese

Após o Capítulo 1 – Introdução, que apresenta o enquadramento geral do tema objeto do estudo, a motivação da investigação e a formulação do problema, a dissertação prossegue com a explicitação dos objetivos do mesmo, das questões de investigação e de uma visão geral da abordagem metodológica. A estrutura da tese desenvolve-se ao longo dos seguintes capítulos:

- Capítulo 2 – Revisão da Literatura, capítulo no qual se aborda a análise do estado da arte sobre a tecnologia blockchain e a sua aplicação no setor marítimo-portuário. Integra ainda a análise de casos internacionais relevantes e uma revisão sistemática da literatura conduzida segundo a metodologia PRISMA.

- Capítulo 3 – Implementação de Solução Tecnológica em Blockchain, descrevendo a conceção da solução proposta, enquadrada pela Design Science Research Methodology (DSRM) [11]. São definidos os requisitos técnicos e funcionais e apresentada a arquitetura tecnológica, contemplando segurança, interoperabilidade e integração com sistemas legados e tecnologias complementares.
- Capítulo 4 – Caso de Implementação da Solução Hyperledger Fabric Aplicada aos Portos de Leixões, Lisboa e Sines, com a apresentação de um caso de implementação prospetivo, inspirado em experiências internacionais. O capítulo descreve os fluxos operacionais e os benefícios esperados da adoção da solução, incluindo o desenvolvimento de um *mockup* conceptual da plataforma, elaborado com recurso à ferramenta Figma AI, como representação visual do artefacto tecnológico proposto.
- Capítulo 5 – Validação Conceptual da Solução, no qual se apresenta a validação da solução, desenvolvida conceptualmente. Esta validação é suportada pela realização de inquéritos a profissionais do setor marítimo-logístico e portuário, bem a consequente análise dos resultados obtidos através dos mesmos. Não é realizada qualquer prova de conceito técnica nem implementação funcional do sistema, sendo estas atividades assumidas como trabalho a desenvolver em investigações futuras.
- Capítulo 6 – Discussão, com a análise dos resultados à luz dos objetivos definidos, discutindo de forma integrada os benefícios potenciais da adoção da blockchain, os principais obstáculos à sua implementação e os fatores determinantes para a sua adoção, em articulação com a evidência apresentada na revisão da literatura.

Por fim, o Capítulo 7 – Conclusões e Investigações Futuras, sintetiza os principais contributos do estudo, apresenta as conclusões finais e identifica linhas de investigação futura, nomeadamente o desenvolvimento de provas de conceito e/ou projetos-piloto adicionais à solução proposta.

CAPÍTULO 2

Revisão da Literatura

2.1. Análise de casos relevantes de implementação de blockchain no setor marítimo

Este subcapítulo apresenta estudos de casos internacionais de adoção da tecnologia blockchain no contexto das cadeias de abastecimento marítimas, nomeadamente iniciativas como a plataforma *TradeLens*, os projetos desenvolvidos no Porto de Antuérpia em colaboração com a T-Mining, bem como outras experiências relevantes, nomeadamente os consórcios, Global Shipping Business Network, Silsal, entre outros. Estes casos ilustram benefícios concretos, dificuldades operacionais e fatores críticos de sucesso ou insucesso associados à implementação de soluções baseadas em blockchain.

2.1.1. Plataforma TradeLens (IBM–Maersk)

Lançada em 2018 pela IBM e pela Maersk, a TradeLens foi uma plataforma de blockchain permissionada construída sobre a infraestrutura Hyperledger Fabric[6], com o objetivo de digitalizar o comércio marítimo global. Atingiu uma escala significativa, contando com mais de 300 organizações participantes, incluindo grandes transportadoras marítimas e autoridades portuárias, e processando mais de 40 milhões de eventos e 20 milhões de documentos [10].

A plataforma oferecia funcionalidades como submissão eletrónica de documentos, rastreio em tempo real e integração com os sistemas aduaneiros. Em projetos-piloto, reportaram-se melhorias operacionais significativas, como a redução de 40% no tempo de transporte [10].

Contudo, apesar do sucesso técnico, o projeto foi descontinuado em 2022, essencialmente devido à baixa adesão do setor. A perceção um modelo de governo não neutro, liderado pela Maersk, e a relutância na partilha de dados por parte de outras entidades comprometeram a confiança e a cooperação necessárias. O caso evidencia que a eficácia tecnológica, por si só, não garante o êxito, fatores como o modelo de governo e a confiança interorganizacional são muito importantes [6], [10].

2.1.2. Porto de Antuérpia e projetos com a T-Mining

O Porto de Antuérpia, em colaboração com a startup T-Mining, assumiu uma posição de vanguarda na aplicação de soluções blockchain no ambiente portuário. Destacam-se dois projetos demonstrativos:

i. Eliminação de códigos PIN através de *tokens* digitais, com recurso aos *smart contracts* que permitiram uma entrega segura e à prova de fraude entre armadores, terminais e transportadores terrestres.
ii. Digitalização de documentação fitossanitária e de origem, emitida na Nova Zelândia e acessível antecipadamente às autoridades belgas através de blockchain, permitindo a automatização de processos, maior fiabilidade e redução de atrasos.

Estes projetos demonstraram a viabilidade técnica e operacional da tecnologia. As principais lições extraídas incluem a importância de: (i) selecionar casos de uso com impacto imediato, (ii) envolver todos os stakeholders desde o início do processo, e (iii) medir e comunicar os resultados para fomentar a adesão.

Em 2025, o Porto de Antuérpia-Bruges avançou com uma expansão significativa da sua infraestrutura digital, integrando IA preditiva e tecnologia blockchain para otimizar o planeamento logístico e a gestão de contentores. Através da cooperação com startups especializadas, o porto desenvolveu um sistema digital alimentado por dados em tempo real provenientes de sensores IoT e registados numa rede blockchain permissionada.

A integração entre blockchain e IA permitiu prever congestionamentos, anomalias operacionais e emissões associadas ao tráfego portuário, aumentando a eficiência operacional e a sustentabilidade ambiental. O caso do Porto de Antuérpia ilustra uma tendência emergente de convergência tecnológica, em que a blockchain atua como camada de confiança para dados utilizados por algoritmos de machine learning aplicados à logística marítima.

2.1.3. Global Shipping Business Network

Criado em 2019, o Global Shipping Business Network é um consórcio internacional sem fins lucrativos, que integra transportadoras marítimas e operadores portuários. Adota um modelo de governo descentralizado e tem como principal objetivo a digitalização da carta de porte de embarque (eBL).

A plataforma registou resultados positivos, nomeadamente transações digitais entre a Ásia e a Europa, reforçando a eficiência e segurança documental.

Na realidade a Global Shipping Business Network consolidou-se, em 2025, como um dos ecossistemas blockchain mais relevantes na digitalização do transporte marítimo. Com uma arquitetura descentralizada baseada em Hyperledger Fabric, a GSBN reúne operadores portuários, transportadoras, agentes de carga e autoridades alfandegárias num consórcio neutro que processa milhões de documentos eletrónicos de embarque (eBL) em tempo real.

A solução distingue-se pela capacidade de interoperabilidade com sistemas legados e pela integração com identidades digitais verificadas (Verifiable Credentials) para autenticação dos intervenientes. O modelo permitiu reduzir significativamente o tempo de emissão e validação de eBL — de vários dias para algumas horas — promovendo uma cadeia logística mais transparente, segura e eficiente.

Comparativamente à plataforma TradeLens, a GSBN apresenta uma estrutura de governação menos centralizada, mitigando a perceção de dependência de um único operador tecnológico e favorecendo a adoção por transportadoras concorrentes. Este modelo colaborativo e neutro demonstra a maturação do conceito de consórcio de blockchain no setor marítimo.

2.1.4. VesselChain – Rastreio Descentralizado de Emissões e Sustentabilidade

A VesselChain, lançada em 2025 por um consórcio europeu de armadores e autoridades ambientais, propõe uma plataforma blockchain destinada ao rastreio de emissões de CO_2 e poluentes marítimos. Com base em contratos inteligentes, a solução recolhe automaticamente dados de sensores instalados em navios e reporta-os a autoridades portuárias e reguladoras, garantindo integridade, transparência e auditoria ambiental.

A iniciativa representa uma resposta direta às exigências da Organização Marítima Internacional (IMO) no âmbito do Carbon Intensity Indicator (CII) e do EU Emissions Trading System (ETS) aplicados ao transporte marítimo. A VesselChain reforça o papel da blockchain como ferramenta de compliance ambiental e monitorização descentralizada, demonstrando a sua relevância crescente na transição ecológica do setor.

Apesar do êxito técnico de projetos como GSBN, Porto de Antuérpia e VesselChain, a comparação com o encerramento da TradeLens em 2023 continua instrutiva. As falhas da TradeLens derivaram, em grande medida, de uma estrutura de governação centralizada e de uma adesão limitada de stakeholders fora do ecossistema da Maersk e da IBM.

As novas iniciativas demonstram que o sucesso das plataformas blockchain marítimas depende não apenas da inovação tecnológica, mas também de modelos de governação abertos, interoperáveis e colaborativos. A tendência observada em 2025 evidencia uma evolução do paradigma de blockchain empresarial para redes consorciais descentralizadas, sustentadas por incentivos partilhados e confiança mútua entre os participantes.

2.2. Revisão de Literatura

2.2.1. Metodologia PRISMA

A revisão de literatura é estruturada seguindo uma revisão sistemática de acordo com os princípios da metodologia PRISMA (Preferred Reporting Itens for Systematic Review and Meta Analysis). Esta análise, suportada na pesquisa da aplicação da tecnologia blockchain nas cadeias logísticas marítimas, realizada em outubro de 2025 e com enfoque em artigos de jornais e conferências entre 2020 e 2025.

A Figura 2 resume o processo de seleção de artigos relevantes com base na metodologia PRISMA, para uma análise sistemática, tendo resultado numa pesquisa de 23 artigos publicados nas bases de dados Web of Science. Scopus e IEEE.

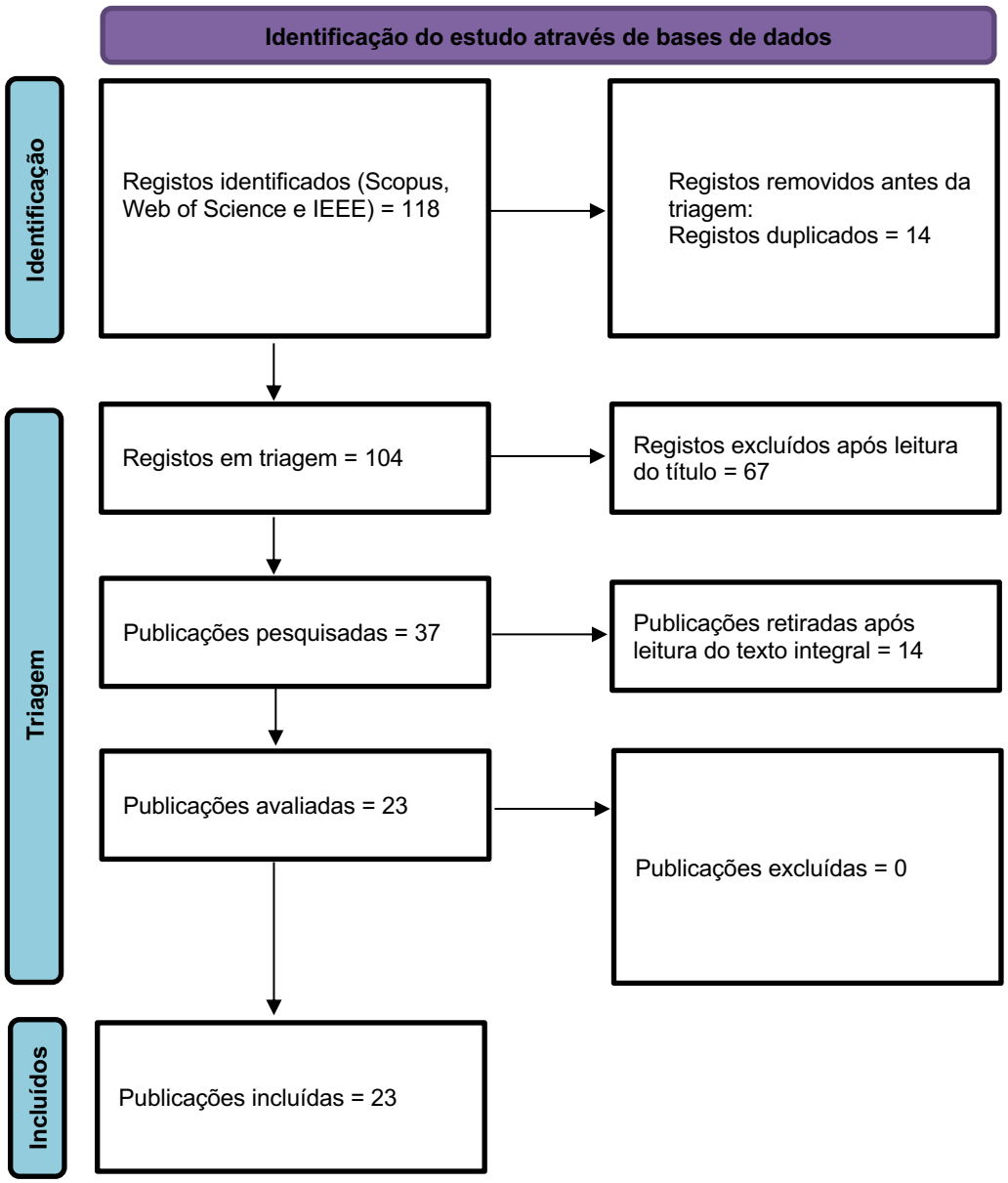


Figura 2:Diagrama do fluxo de PRISMA para a revisão sistemática de literatura

Primeiramente, foram eliminados 14 artigos duplicados, restando 104 artigos para análise posterior. Após avaliar títulos, resumos e resultados, sessenta e sete artigos foram considerados irrelevantes. Os restantes 37 artigos foram considerados na íntegra para uma análise detalhada, tendo sido efetuada uma nova análise ao seu conteúdo e sua relevância para o estudo, não tendo sido considerados 14 artigos. Os resultados de 23 artigos de texto completo foram, então, organizados em categorias considerando a sua relevância. Em suma, no final, 23 artigos foram abrangidos por este estudo, conforme se ilustra na Tabela *1* abaixo:

Tabela 1 Resumos dos principais trabalhos identificados

#	Título	Contribuição	Caso aplicado	Área do estudo
1	Blockchain: How shipping industry is dealing with the ultimate technological leap	Explica como o setor marítimo está a comporta-se à possibilidade de adoção da tecnologia blockchain, destacando oportunidades e desafios práticos.	Transporte marítimo	Digitalização e inovação no transporte marítimo.
2	Blockchain adoptions in the maritime industry: a conceptual framework	Fornece um quadro conceptual para perceber fatores que incentivam ou criam barreiras a adoção da tecnologia blockchain.	Não aborda caso específico	Modelos de adoção tecnológica em cadeias marítimas.
3	Blockchain technology in maritime supply chains: applications, architecture and challenges	Apresenta aplicações concretas, a arquitetura técnica e os principais obstáculos e barreiras na adoção da tecnologia blockchain no setor.	Conhecimento eletrónico de embarque (eBL) e rastreabilidade de carga.	Logística marítima e arquitetua do sistema
4	Using NFTs and Blockchain for Traceability and Auctioning of Shipping Containers and Cargo in Maritime Industry	Explora a integração de NFTs com blockchain para rastrear contentores de forma segura	Contentores e cargas em cadeias marítimas.	Rastreabilidade, comércio eletrónico de carga.
5	Blockchain adoption in container shipping: An empirical study on barriers, approaches, and recommendations	Analisa as barreiras que dificultam a adoção da tecnologia blockchaine, sugerindo soluções práticas	Transporte marítimo de contentores.	Gestão de transporte de contentores e inovação tecnológica.
6	Barriers to blockchain adoption in the seaport industry: A fuzzy DEMATEL analysis	Identifica as barreiras à adoção em portos, nas suas diferentes vertentes (técnica, regulatório, entre outras)	Portos internacionais, com foco na indústria portuária	Gestão portuária e transformação digital.
7	Toward a model to enhance the applicability of blockchain in maritime shipping: a qualitative study from the Middle East	Propõe um modelo para facilitar a aplicação da blockchain, com base em entrevistas regionais.	Empresas e portos no Médio Oriente	Transporte marítimo e estudos qualitativos regionais.
8	A survey on blockchain technology in the maritime industry: Challenges and future perspectives	Resume o estado da arte, principais benefícios e problemas ainda por resolver.	Não aborda caso específico	Visão global da indústria marítima.
9	Rethinking Blockchain Technologies for the Maritime Industry: An Overview of the Current Landscape	Avalia o papel da tecnologia blockchain no setor e identifica tendências emergentes.	Não aborda caso específico	Estado atual da blockchain na indústria marítima.
10	Leveraging Blockchain for Maritime Port Supply Chain Management through Multicriteria Decision Making	Avalia, com métodos de decisão multicritério, como com a adoção da blockchain pode melhorar a gestão portuária.	Operações portuárias (sem porto específico)	Gestão de cadeias portuárias e operações logísticas.
11	Stability analysis of maritime logistics alliance based on blockchain	analisa como a tecnologia blockchain pode potenciar eventuais sinergias entre empresas marítimas.	Alianças logísticas nas cadeias marítimas	Cooperação empresarial e logística colaborativa.
12	Blockchain Adoption or Not? Analysis of Demand Information Sharing in Maritime Supply Chain	Estuda a adoção da tecnologia blockchain para melhorar a partilha de informação	Cadeia logística marítima	Partilha de dados e adoção tecnológica.
13	Examining the determinants of blockchain technology-enabled maritime supply chain system adoption intention: Does market turbulence play a moderating role?	Analisa os fatores que podem influenciar a intenção de adoção da tecnologia blockchain	Indústria marítima em geral	Estratégia de adoção em cadeias logísticas.

#	Título	Contribuição	Caso aplicado	Área do estudo
14	The Architectural Design Requirements of a Blockchain-Based Port Community System	Define os requisitos técnicos para criar uma arquitetura suportada em tecnologia blockchain.	Sistemas comunitários portuários (PCS)	Arquitetura de sistemas e gestão portuária.
15	The (non-)application of blockchain technology in the Greek shipping industry	Explica por que a indústria grega não tem aplicado a blockchain, apontando barreiras culturais e institucionais.	Transporte marítimo na Grécia	Indústria marítima regional e resistência tecnológica.
16	Blockchain in Maritime Supply Chain: A Synthesis Analysis of Benefits, Challenges and Limitations	Apresenta um resumo das vantagens, problemas e limitações da adoção da tecnologia blockchain em cadeias marítimas.	Exemplo genérico da cadeia de abastecimento marítima	Revisão crítica das cadeias marítimas.
17	Blockchain Technology's Potential in Supply Chain Management	Explora o potencial da tecnologia blockchain para melhorar a eficiência e a segurança em cadeias globais.	Cadeias de abastecimento internacionais (não apenas marítimas)	Gestão global da cadeia de abastecimento.
18	Blockchain-Based Traceability for Shipping Containers in Unimodal and Multimodal Logistics	Propõe uma solução baseada em blockchain e IPFS para rastreabilidade de contentores em cadeias logísticas unimodais e multimodais. Desenvolve contratos inteligentes em Ethereum e apresenta um modelo de documentação digital, seguro e auditável, melhorando a transparência e reduzindo custos administrativos.	Transporte marítimo e multimodal (exportação, importação, alfândega, armadores)	Logística marítima e rastreabilidade de contentores
19	Blockchain in Maritime: Applications, Architecture and Challenges	Analisa as principais aplicações da blockchain na cadeia de abastecimento marítima, incluindo rastreabilidade, documentação eletrónica e integração com IoT. Aborda os desafios de interoperabilidade, privacidade e padronização nas operações portuárias.	Transporte marítimo e gestão portuária	Arquitetura técnica e aplicações da blockchain no setor marítimo
20	Supply Chain Resilience in Maritime Logistics Networks	Explora a resiliência das cadeias logísticas marítimas através da digitalização e tecnologias emergentes, incluindo blockchain, IoT e IA. Enfatiza o papel da blockchain na transparência e partilha de dados entre operadores portuários e transportadores.	Transporte marítimo e redes logísticas	Gestão e resiliência das cadeias marítimas digitais
21	Blockchain-Enabled Road Vehicle Emissions Monitoring: A Secure, Scalable and Private Framework	Propõe uma arquitetura baseada em Hyperledger Fabric para monitorização descentralizada e segura de emissões de veículos, assegurando escalabilidade, privacidade e conformidade com o RGPD. Demonstra a eficiência de um modelo blockchain permissionado para monitorização em larga escala na UE.	Transporte rodoviário (monitorização de emissões)	Arquitetura técnica e escalabilidade de blockchains permissionadas (Hyperledger Fabric)
22	A Comprehensive Hyperledger Fabric Performance Evaluation Based on Resources Capacity Planning	Desenvolve um modelo analítico com Petri Nets estocásticas para otimizar o desempenho de redes Hyperledger Fabric. Avalia parâmetros como tamanho de blocos, tempos de resposta e taxa de transações, fornecendo orientações práticas para a configuração de blockchains empresariais.	Casos de simulação e modelação	Desempenho e otimização de redes Hyperledger Fabric
23	Blockchain Privacy and Scalability in a Decentralized Validated Energy Trading Context with Hyperledger Fabric	Propõe um modelo de mercado descentralizado de energia limpa, baseado em Hyperledger Fabric, com mecanismos de anonimização e validação de transações. Demonstra a viabilidade de soluções blockchain permissionadas com elevado throughput e privacidade.	Mercado energético descentralizado (energia renovável)	Privacidade e escalabilidade em redes permissionadas (Hyperledger Fabric)

2.2.2. Pesquisa

A pesquisa foi efetuada com o objetivo de identificar literatura académica e técnica relevante sobre a aplicação da tecnologia blockchain no contexto marítimo e portuário, com especial enfoque na gestão da cadeia de abastecimento.

Os termos de pesquisa foram selecionados de forma rigorosa, incluindo palavras-chave relacionadas blockchain, logística, cadeia de abastecimento, transações seguras, eficiência operacional e privacidade de dados.

A população-alvo da análise bibliográfica centrou-se no setor marítimo e portuário, com base nos princípios da logística inteligente, da digitalização de processos, da segurança transacional e da eficiência sustentada por tecnologias emergentes. O principal objetivo desta abordagem foi reunir um corpo diversificado de publicações recentes explorando a sua aplicabilidade e impacto na gestão e rastreabilidade das cadeias logísticas marítimas.

2.2.3. Critérios de inclusão e exclusão.

Para assegurar a qualidade e a relevância dos estudos analisados, foram definidos critérios de inclusão e exclusão de artigos científicos e técnicos:

i. Critérios de Inclusão:
    a. Estudos que abordam a aplicação da tecnologia blockchain em cadeias de abastecimento marítimas ou logísticas;
    b. Artigos que discutem temas relacionados com privacidade, segurança, escalabilidade ou eficiência na gestão logística;
    c. Publicações em língua inglesa com revisão por pares ou relatórios técnicos de reconhecido prestígio emitidos por entidades da indústria.

ii. Critérios de Exclusão:
    a. Estudos que não apresentavam aplicabilidade direta ao setor marítimo ou logístico;
    b. Artigos não redigidos originalmente em inglês, com exceção de documentos traduzidos oficialmente;
    c. Trabalhos que careciam de fundamentação metodológica, nomeadamente ausência de delineamento claro ou dados empíricos verificáveis;
    d. Publicações que tratavam exclusivamente da tecnologia blockchain, sem relação explícita com privacidade, logística ou cadeias de abastecimento.

A aplicação destes critérios permitiu uma seleção seletiva e metodologicamente robusta das fontes incluídas na revisão sistemática, assegurando a pertinência temática, a qualidade científica e a adequação ao contexto marítimo-logístico em análise.

2.2.4. Principais conclusões da revisão sistemática

A análise dos vinte e três artigos selecionados, evidencia que a implementação da tecnologia blockchain no setor marítimo constitui um tema em clara expansão, com contributos relevantes tanto do ponto de vista teórico como prático. Em seguida são apresentadas as conclusões dos artigos selecionados, agrupadas em categorias temáticas:

i. Adoção da tecnologia blockchain

A tecnologia blockchain tem vindo a despertar crescente interesse no setor marítimo por proporcionar maior transparência e confiança [12] entre os diversos intervenientes das cadeias logísticas. A possibilidade de monitorizar os ativos em tempo real e de substituir a documentação física por registos digitais imutáveis [13] representa um fator de atração significativo. Paralelamente, a necessidade de aumentar a eficiência operacional, reduzir atrasos processuais e responder a exigências regulatórias e de sustentabilidade[14]tem conduzido empresas e portos [15] à consideração desta tecnologia como uma solução estratégica. Acresce ainda que a integração com outras tecnologias digitais, como a Internet of Things (IoT), tem sido apontada como um elemento catalisador para acelerar a sua adoção.

Entre 2020 e 2025 observa-se um aumento expressivo da adoção de blockchain em contextos marítimos e logísticos, motivado pela necessidade de maior transparência, rastreabilidade e interoperabilidade digital. A tendência mais recente consiste na integração de IA e analítica preditiva, permitindo a monitorização em tempo real de contentores, portos e emissões.

As soluções emergentes, como a GSBN e a VesselChain, ilustram esta convergência tecnológica, onde a blockchain fornece a camada de confiança e imutabilidade dos dados, e a IA atua sobre esses registos para gerar previsões operacionais e ambientais. Esta combinação tem contribuído para uma gestão mais inteligente e sustentável das cadeias logísticas marítimas.

ii. Barreiras à adoção da tecnologia blockchain

Apesar do seu elevado potencial, a adoção da tecnologia blockchain enfrenta ainda obstáculos consideráveis [16]. Entre os principais desafios encontram-se a falta de interoperabilidade [16] entre sistemas distintos, a resistência organizacional à mudança, os custos iniciais de implementação e a ausência de um enquadramento legal claro [17] quanto à validade jurídica dos documentos digitais.

A literatura académica também destaca as dificuldades em promover uma cooperação multilateral efetiva entre transportadoras, portos, autoridades e clientes — um fator que tem limitado a eficácia de iniciativas como a plataforma TradeLens [6]. Adicionalmente, questões técnicas relacionadas com a escalabilidade e o desempenho das redes blockchain são frequentemente referidas como entraves à sua adoção generalizada.

O elevado consumo energético associado a alguns modelos de consenso (mesmo em versões otimizadas de Proof-of-Authority ou Proof-of-Stake), desafia as metas de neutralidade carbónica.

Adicionalmente, as incertezas legais e regulatórias nos países BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul), que dificultam a uniformização de políticas de dados, contratos inteligentes e validade jurídica de documentos eletrónicos constituem fortes barreiras à adoção da tecnologia blockchain no contexto do transporte marítimo, bem como a falta de padronização internacional, especialmente no reconhecimento legal do conhecimento de embarque eletrónico (eBL) e na partilha transfronteiriça de dados logísticos.

iii. Vantagens e benefícios

Os estudos analisados evidenciam um conjunto consistente de vantagens associadas à implementação da blockchain [18]. Entre os principais benefícios destacam-se a redução de custos administrativos [19], a diminuição de fraudes e erros documentais [20], bem como a automação de processos — como transferências de titularidade, pagamentos e procedimentos aduaneiros — através da utilização de contratos inteligentes (smart contracts). Para além disso, a blockchain reforça a confiança entre os diferentes parceiros comerciais, melhora a coordenação logística e fomenta a criação de alianças mais estáveis e duradouras entre operadores. Em síntese, esta tecnologia contribui para a consolidação de um setor marítimo mais ágil, eficiente e seguro.

iv. Perspetiva global e tendências emergentes

A análise revela que a tecnologia blockchain se potencia como uma ferramenta estratégica de transformação digital nas cadeias de abastecimento marítimas [21]. Observa-se uma tendência crescente para a adoção de modelos permissionados e de consórcio, que conciliam a partilha de informação com elevados níveis de segurança e privacidade. Paralelamente, começam a emergir iniciativas que integra a blockchain com outras tecnologias, como IoT e NFTs, ampliando as suas funcionalidades e possibilidades de aplicação.

A análise efetuada, [15], [22] sugere que o futuro da blockchain no setor marítimo dependerá do reforço da colaboração internacional, da padronização de práticas e da definição de uma governança equitativa das plataformas — fatores determinantes para a transição de projetos piloto para soluções amplamente implementadas.

A evolução da literatura entre 2020 e 2025 demonstra uma transformação relevante na adoção da tecnologia blockchain nas cadeias de abastecimento marítimas. Inicialmente aplicada a processos de digitalização documental e rastreabilidade, a tecnologia passou a integrar-se com IA e IoT, permitindo uma monitorização em tempo real e maior eficiência operacional. Em paralelo, as barreiras à adoção tornaram-se mais complexas, passando de desafios técnicos para questões energéticas, legais e de padronização internacional, enquanto as vantagens se tornaram mais concretas e mensuráveis, com reduções significativas em tempos de disputa e emissão documental.

As tendências emergentes apontam para uma nova fase de maturidade da tecnologia blockchain no setor marítimo, associada a objetivos de descarbonização e sustentabilidade ambiental. Os estudos recentes publicados em 2025 destacam o potencial da blockchain como instrumento de verificação e certificação das emissões de carbono de navios, integrando-se em sistemas de reporte automático e auditoria ambiental. Esta convergência entre blockchain e políticas de neutralidade carbónica representa um avanço decisivo na transição ecológica do transporte marítimo.

A Tabela *2* sintetiza esta evolução, comparando as principais tendências observadas entre 2020 e 2025 quanto à adoção, barreiras, vantagens e perspetiva global da blockchain no setor marítimo.

Tabela 2: Evolução tendências observadas entre 2020 e 2025

Categoria	Tendências 2020	Tendências 2025	Evolução
Adoção	Adoção incipiente centrada na digitalização documental (e.g., TradeLens, CargoX) e em projetos-piloto focados em rastreabilidade básica. Integração limitada com outras tecnologias e baixa interoperabilidade entre sistemas.	Expansão significativa da adoção em portos e cadeias logísticas globais, impulsionada pela necessidade de transparência, rastreabilidade e sustentabilidade. Integração crescente com IA, IoT e analítica preditiva, permitindo monitorização em tempo real e gestão inteligente de emissões e ativos.	Transição de soluções isoladas para ecossistemas digitais integrados, com uso estratégico da blockchain como infraestrutura de confiança e base para a automação e interoperabilidade.
Barreiras	Dificuldades de interoperabilidade, custos iniciais elevados, resistência organizacional à mudança e ausência de enquadramento jurídico para documentos digitais. Limitações técnicas de escalabilidade e desempenho das redes.	Desafios mais complexos de natureza energética e regulatória: elevado consumo energético de certos mecanismos de consenso; incertezas legais nos países BRICS quanto à validade de contratos e eBL; e falta de padronização internacional na partilha transfronteiriça de dados logísticos.	As barreiras evoluem de problemas técnicos para questões estruturais, legais e ambientais, exigindo harmonização regulatória e políticas de sustentabilidade energética.
Vantagens	Redução de fraudes e erros documentais, diminuição de custos administrativos e simplificação de processos via contratos inteligentes. Melhoria da transparência e confiança entre stakeholders.	Benefícios quantificados e alargados: redução média de 81% nos tempos de resolução de disputas, 60% menos tempo na emissão documental portuária e melhor rastreio ambiental. Adoção de modelos de consórcio que reforçam a confiança e a colaboração interorganizacional.	Consolidação de ganhos mensuráveis e evolução da blockchain como ferramenta estratégica para eficiência, sustentabilidade e integração digital.
Perspetiva global e tendências emergentes	Adoção fragmentada, centrada em iniciativas regionais e pilotos isolados. Foco nas transações e partilha básica de informação entre poucos parceiros.	Emergência de modelos permissionados e consorciais, integrando blockchain com IoT, IA e NFTs. Aumento da cooperação internacional e do foco em governação equitativa e padronização global.	Evolução para plataformas globais interoperáveis que combinam confiança, segurança e privacidade, potenciando a transformação digital sustentável das cadeias marítimas.

A análise evolutiva apresentada na Tabela *2* evidencia uma transformação progressiva e estrutural na forma como a tecnologia blockchain tem vindo a ser considerada e aplicada no contexto das cadeias de abastecimento marítimas. No período inicial, em torno de 2020, observa-se uma fase predominantemente exploratória, caracterizada por iniciativas-piloto, com foco na digitalização documental e em casos de uso isolados, frequentemente limitados a contextos específicos e com reduzida interoperabilidade entre sistemas. Nesta fase, a adoção da tecnologia encontrava-se ainda condicionada por limitações técnicas, ausência de padrões e incertezas quanto ao enquadramento regulatório.

Em contraste, a realidade observada em 2025 reflete uma evolução significativa no grau de maturidade da tecnologia e na sua integração nos ecossistemas logísticos. A blockchain deixa de ser encarada apenas como uma solução tecnológica emergente e passa a assumir um papel mais estruturante, funcionando como uma camada de confiança e interoperabilidade que suporta a integração com outras tecnologias digitais, nomeadamente Internet of Things (IoT), inteligência artificial e analítica avançada. Esta convergência tecnológica permite não só a rastreabilidade em tempo real, mas também a otimização de processos e a introdução de mecanismos preditivos na gestão logística.

Paralelamente, verifica-se uma alteração qualitativa na natureza das barreiras à adoção. Se, numa fase inicial, os desafios eram maioritariamente de natureza técnica — como a escalabilidade e a interoperabilidade —, em 2025 estes evoluem para dimensões mais complexas, de carácter institucional, regulatório e ambiental. A necessidade de harmonização legal, a definição de modelos de governação claros e a gestão da privacidade e partilha de dados entre múltiplos stakeholders emergem como fatores críticos, reforçando a ideia de que a adoção da blockchain depende, sobretudo, de mecanismos de coordenação interorganizacional e não exclusivamente de avanços tecnológicos.

Adicionalmente, os benefícios associados à tecnologia tornam-se progressivamente mais tangíveis e mensuráveis. A literatura recente evidencia ganhos concretos ao nível da redução de tempos processuais, diminuição de erros documentais e reforço da transparência e confiança entre entidades. Esta evolução contribui para a transição da blockchain de um conceito promissor para uma ferramenta estratégica, com impacto real na eficiência e sustentabilidade das cadeias logísticas marítimas.

Em síntese, a evolução entre 2020 e 2025 demonstra uma clara passagem de uma fase experimental para um estágio de maior consolidação e maturidade, em que a tecnologia blockchain começa a ser integrada em ecossistemas digitais mais amplos e colaborativos. Contudo, esta transição reforça igualmente que o sucesso da sua adoção dependerá, em larga medida, da capacidade de alinhar interesses, definir modelos de governação equilibrados e assegurar um enquadramento regulatório adequado, fatores estes determinantes para a sua implementação em escala no setor marítimo.

CAPÍTULO 3

Implementação de solução tecnológica em blockchain

A implementação de uma solução tecnológica baseada em blockchain para a gestão da cadeia de abastecimento marítima requer uma abordagem estruturada. Neste contexto, todo o ciclo para a conceção e validação de uma solução tecnológica em blockchain é suportado na metodologia Design Science Research Methodology (DSRM) [23].

A abordagem subjacente à metodologia DSRM permite que o desenvolvimento da solução em blockchain seja conduzido de forma sistemática e fundamentada, garantindo que cada etapa — desde a análise do problema até à avaliação do artefacto — contribua para a obtenção de resultados consistentes e que possam ser verificados.

O ciclo inicia-se com a identificação dos requisitos técnicos e funcionais da solução, definidos a partir dos desafios e necessidades específicos das cadeias logísticas marítimas. Seguidamente, procede-se à conceção da arquitetura tecnológica, onde são delineados os componentes estruturais do sistema, as interações entre os diferentes intervenientes, os mecanismos de segurança e a interoperabilidade e controlo de acesso que asseguram a integridade e transparência das operações.

Posteriormente, é apresentada uma descrição detalhada da solução, com destaque para o papel da blockchain permissionada, dos contratos inteligentes (smart contracts) e da integração com tecnologias complementares, como a IoT, no reforço da rastreabilidade [24] e na prevenção de fraudes.

Por fim, o capítulo contempla a validação conceptual da solução, etapa em que se avalia a adequação da arquitetura proposta face aos objetivos definidos, analisando a sua capacidade para melhorar a eficiência, segurança e confiança nas operações marítimas.

O fluxograma da Figura *3* representa a aplicação da metodologia DSRM ao desenvolvimento de uma solução tecnológica em blockchain para a cadeia de abastecimento marítima. O modelo segue uma sequência estruturada de etapas — desde a identificação do problema e definição de requisitos funcionais até fase de validação e comunicação dos resultados.

A versão atualizada de 2025 integra um módulo de analítica preditiva com XGBoost [25], responsável por prever atrasos, riscos operacionais e anomalias a partir de dados IoT, AIS e sistemas portuários, promovendo eficiência e transparência das operações [24].

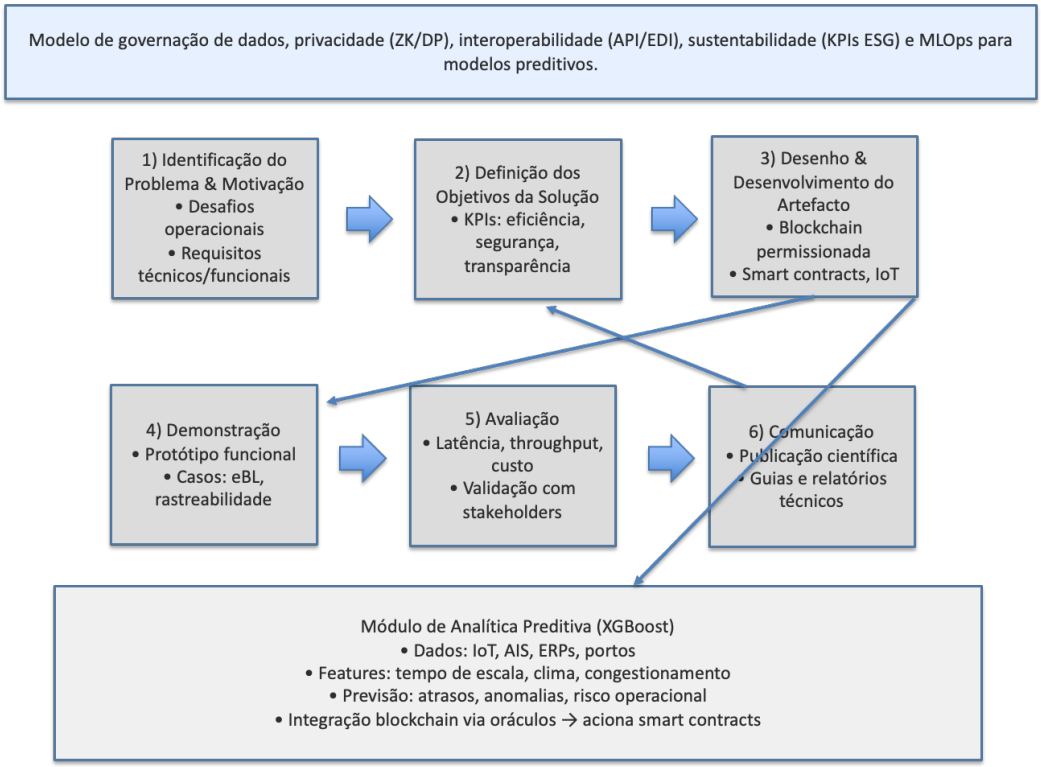


Figura 3 : Fluxograma da metodologia DSRM com integração de analítica preditiva baseada em XGBoost

A definição dos requisitos técnicos que suportam a solução proposta resultou de uma abordagem de natureza qualitativa e exploratória, combinando contributos provenientes de entrevistas informais com profissionais do setor marítimo-logístico — com a experiência acumulada do autor na área das tecnologias de informação. Esta perspetiva integrada permitiu identificar, de forma macro, os principais constrangimentos operacionais e tecnológicos atualmente existentes nas cadeias de abastecimento marítimas. A experiência adquirida possibilitou a estruturação de um conjunto de requisitos técnicos ainda que de natureza macro, consubstanciados na Figura *4*.

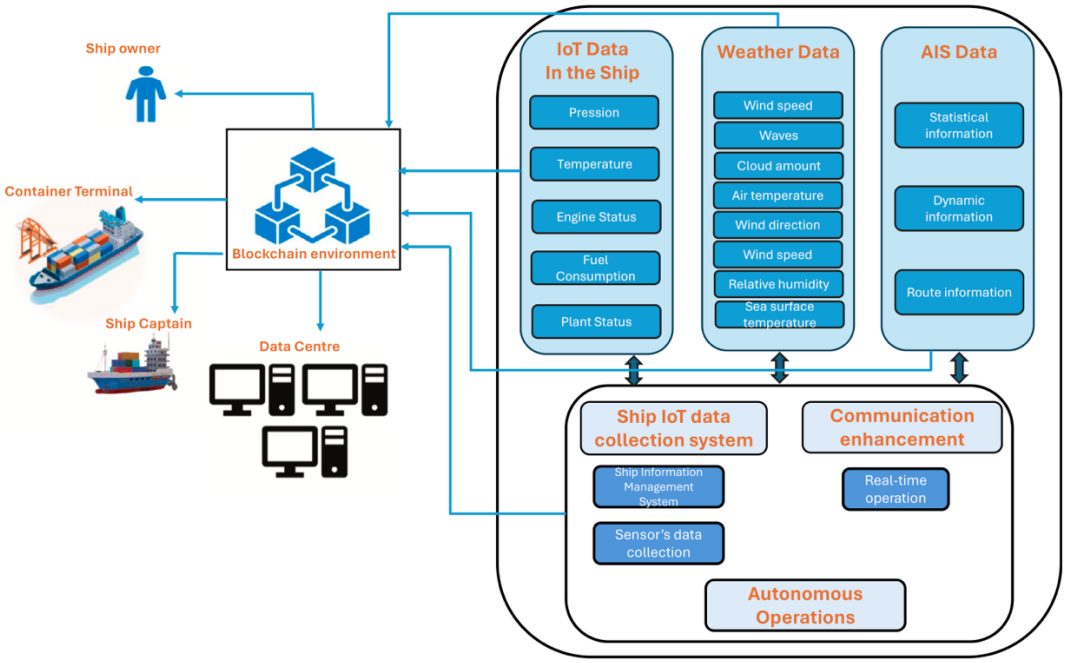


Figura 4: Diagrama macro da arquitetura técnica [9]

3.1 Requisitos Técnicos

A definição dos requisitos técnicos resultou de um processo de recolha de contributos junto de profissionais do setor marítimo-logístico, através da realização de entrevistas exploratórias e de pesquisa direcionada, envolvendo diversos stakeholders, como autoridades portuárias e operadores logísticos. Este processo teve como objetivo compreender, de forma aprofundada, as necessidades operacionais, os desafios existentes e as limitações dos modelos atualmente utilizados, permitindo assegurar que os requisitos técnicos definidos refletem a realidade do setor e respondem de forma adequada às oportunidades de melhoria identificadas no transporte marítimo.

A Tabela 3 infra resume os requisitos técnicos em quatro grandes dimensões, nomeadamente, infraestrutura, segurança e dados, funcionais e integração.

Tabela 3: Requisitos Técnicos

Tipologia Requisitos Técnicos	**Descrição**
Requisitos de Infraestrutura	i. Rede permissionada: a solução deve operar numa blockchain permissionada, ou seja, apenas entidades autorizadas podem participar. Isto assegura que apenas transportadoras, portos, autoridades aduaneiras, seguradoras e outros parceiros legítimos possam registar ou consultar dados; ii. Nós distribuídos: cada interveniente relevante deve operar o seu próprio nó da rede. Assim, todos mantêm uma cópia do registo partilhado, o que aumenta a confiança e elimina a dependência de uma entidade central; iii. Escalabilidade: a arquitetura deve ser capaz de lidar com milhares de transações por dia, como a movimentação de contentores ou a emissão de documentos, sem comprometer o desempenho; iv. Resiliência: a rede deve continuar a funcionar mesmo que alguns nós possam ficar inativos. Para isso, é essencial que o sistema seja distribuído, garantindo redundância e tolerância a possíveis falhas; v. Plataforma modular e flexível: deve-se adotar uma tecnologia que permita adaptar e expandir a rede ao longo do tempo; vi. Integração com Inteligência Artificial: para permitir a recolha e análise de dados em tempo real para detetar fraudes e anomalias nas cadeias de abastecimento marítimas. H5
Requisitos de Segurança e Dados	i. Imutabilidade: todas as transações e documentos devem ser registados de forma permanente, sem possibilidade de alteração retroativa; ii. Integridade documental: documentos críticos, como cartas de embarque ou certificados de origem, devem ser protegidos através de hashes e assinaturas digitais; iii. Gestão de identidades digitais: cada participante na rede deve possuir uma identidade digital única, validada por certificados criptográficos. Todas as ações ficam assim associadas a um responsável concreto; iv. Controlo de acessos diferenciado: diferentes participantes devem ter diferentes níveis de acesso; v. Privacidade seletiva: o sistema deve permitir que certos dados sejam partilhados apenas entre partes interessadas, mantendo-os invisíveis para o resto da rede; vi. Conformidade legal: o desenho deve respeitar o enquadramento jurídico e de proteção de dados, como o regulamento geral sobre a proteção de dados (RGPD).
Requisitos Funcionais	i. Smart Contracts para automatização de processos (despacho aduaneiro, verificação documental, pagamentos condicionados); ii. Rastreabilidade ponta-a-ponta, com histórico digital desde a origem ao destino; iii. Capacidade para monitorização em tempo real com dados de IoT (GPS, temperatura, humidade, entre outos); iv. Notificações automáticas sempre que houver uma ocorrência relevante; v. Auditoria e conformidade baseadas em relatórios extraídos da blockchain.
Requisitos de Integração	i. Integração com os diferentes sistemas portuários existentes; ii. Compatibilidade com sistemas logísticos e aduaneiros existentes; iii. Interface de programação de aplicações (API's) abertas para comunicação com outras aplicações; iv. Interoperabilidade com outras plataformas blockchains; v. Adequação futura para integrar novas tecnologias, nomeadamente Zero-Knowledge Proofs (ZKPs) ou soluções layer 2.

Atendendo à análise e definição dos requisitos técnicos, das plataformas de blockchain disponíveis, a Hyperledger Fabric apresenta-se como a mais adequada para suportar a implementação de uma plataforma tecnológica para a gestão da cadeia de abastecimento marítima [26], existindo diversas premissas que sustentam a sua adequação:

i. Plataforma permissionada, desenhada para contextos empresariais e consórcios, alinhando-se com a realidade do transporte marítimo, onde apenas entidades autorizadas podem aceder e validar as transações. Dotada de uma arquitetura modular, que permite personalizar mecanismos de consenso, modelos de identidade e gestão de acessos, facilitando a adaptação a diferentes portos e operadores. Suporta canais privados, o que possibilita que determinados dados sejam partilhados apenas entre subconjuntos de participantes — essencial quando há necessidade de confidencialidade entre concorrentes no mesmo ecossistema;
ii. Orientada para o desempenho e escalabilidade, conseguindo processar um elevado número de transações sem comprometer a eficiência da rede;
iii. Possui um forte ecossistema de apoio (empresas, fundações e comunidade open source), o que garante estabilidade, segurança e suporte técnico contínuo;
iv. Utilizada em projetos logísticos e marítimos internacionais (como o TradeLens e outras provas de conceito), o que reforça a sua maturidade e credibilidade no setor.

A Hyperledger Fabric demonstra elevada capacidade de processamento em contextos empresariais permissionados [27], podendo alcançar milhares de transações por segundo [28], dependendo da configuração de rede e mecanismos de consenso [29]. Esta performance garante, em cenários de cadeia de abastecimento marítima, a gestão eficiente de mais de milhares de transações diárias [28], assegurando integridade, segurança e fluidez operacional entre portos e operadores logísticos. A sua escalabilidade, modularidade e controlo de acesso reforçam-na como a plataforma tecnicamente mais viável e robusta para suportar soluções blockchain no setor marítimo [30].

3.2 Arquitetura Técnica

Como abordado na secção dos requisitos técnicos a proposta tecnológica é baseada na tecnologia blockchain Hyperledger Fabric para conectar todos os intervenientes da cadeia logística marítima – exportadores, operadores logísticos, portos, autoridades alfandegárias, transportadoras marítimas, importadores e reguladores – numa rede de confiança partilhada.

Cada movimentação do contentor e cada troca de documentação é registada num repositório imutável, melhorando a transparência e rastreabilidade de ponta a ponta. O sistema elimina processos baseados em papel, substituindo-os por documentação digital segura e aditável, como cartas de porte de embarque digitais (e-BL) e certificados alfandegários, acessíveis apenas às partes autorizadas.

Desta forma, todas as entidades podem acompanhar em tempo real o status dos contentores e verificar a autenticidade dos documentos comerciais, reduzindo fraudes e atrasos [31], [32]. A arquitetura proposta é composta por múltiplos componentes técnicos e camadas de serviço, integrando blockchain com IoT, RFID e APIs de sistemas legados, para criar um ecossistema unificado, como se pode ler na Figura *5* que apresenta a arquitetura geral da solução.

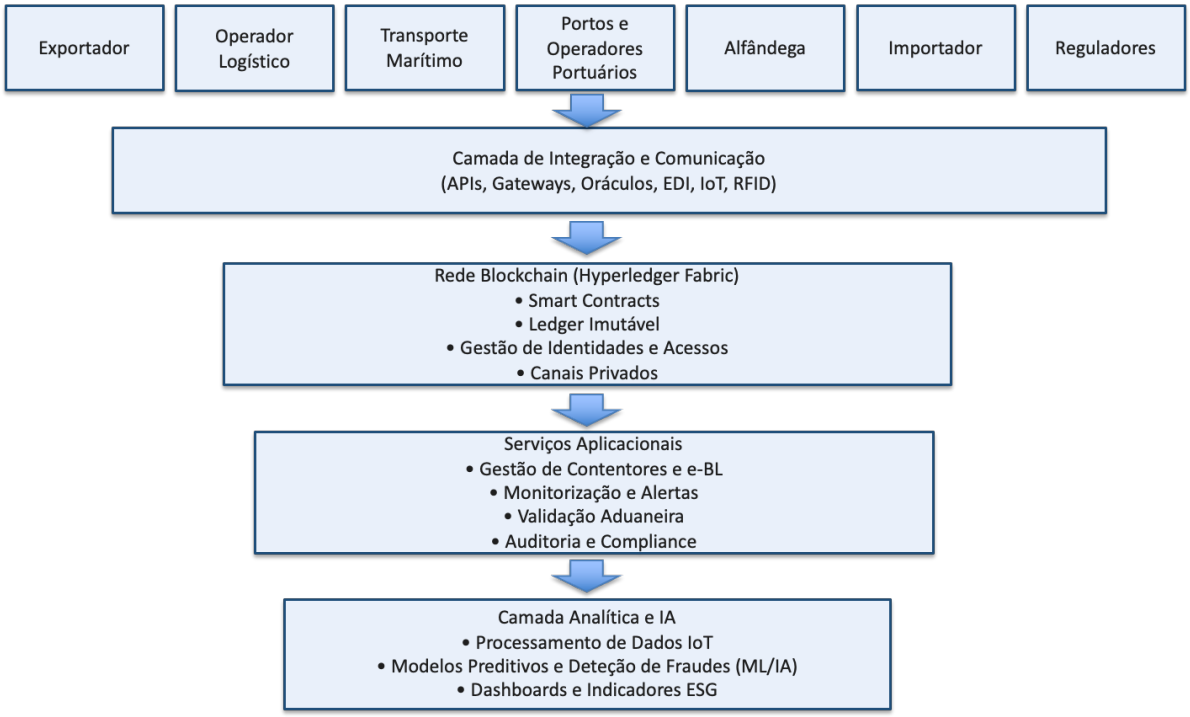


Figura 5: Arquitetura técnica

3.2.1 Stakeholders na Cadeia Logística Marítima

Na abordadem da arquitetura tecnológica, é importante definir os diferentes stakeholders envolvidos [24], tendo-se na Tabela *4*, de forma resumida, identificado os Stakeholders e suas respetivas funções.

Tabela 4: Identificação Stakeholders e suas funções

Stakeholder	Função
Exportador	Origina o envio da carga. Regista no blockchain os detalhes do contentor e da expedição e insere a documentação comercial inicial (fatura, packing list). Autoriza o operador logístico a proceder com o transporte
Operador logístico/transitário	Planeia e coordena o transporte door-to-door. Interage com exportador, transportadoras e autoridades para assegurar que o contentor chegue ao destino. No sistema, cria o registo digital da expedição, valida os documentos submetidos pelo exportador e desencadeia a emissão da carta de porte de embarque digital (e-BL) através de um smart contract
Transportadora Marítima	Responsável pelo transporte marítimo do contentor. Regista no blockchain os eventos de embarque no navio, partida e chegada. Emite a carta de porte de embarque digital ou confirma a sua emissão no sistema, garantindo que os detalhes (como número do contentor, navio, porto de destino) estejam corretos e assinados digitalmente.
Portos e Operadores Portuários	Envolvem tanto o porto de origem quanto o de destino. Utilizam sensores (ex: RFID nas portas de entrada/saída ou leitores OCR de contentores) integrados no sistema para registar automaticamente a entrada do contentor no terminal, a colocação a bordo e posteriormente a descarga no porto de destino. Estes eventos são enviados para a blockchain via APIs ou IoT, garantindo registos em tempo real da posição do contentor
Alfândegas (Exportação e Importação)	Autoridades aduaneiras que validam e aprovam eletronicamente documentação como declarações de exportação, certificados sanitários ou de origem e autorizam a saída/entrada da mercadoria. No sistema, possuem permissões especiais para ler dados necessários à conformidade regulamentar (por ex., verificar se os documentos foram submetidos e se os impostos foram pagos) e para escrever transações de libertação alfandegária na blockchain assim que a inspeção seja concluída. A blockchain garante que apenas os dados estritamente necessários são revelados às alfândegas, preservando segredos comerciais quando aplicável.
Importador	Recebe a carga no destino. Acede ao blockchain para acompanhar o progresso do envio e verificar os documentos de embarque endossados a seu favor. Após a chegada, confirma digitalmente a receção do contentor, concluindo o ciclo da expedição. Pode também consultar o histórico do contentor (por ex., rota, condições de transporte) para assegurar a qualidade e autenticidade do produto entregue.
Autoridades Reguladoras e Outros Órgãos	Inclui entidades como autoridades portuárias, órgãos de fiscalização (sanitária, ambiental) ou mesmo seguradoras. Estas partes podem aceder a uma vista agregada dos dados para auditoria e compliance. Por exemplo, um regulador pode inspecionar remotamente o registo de temperatura de um contentor frigorífico ou verificar se determinado contentor teve todas as aprovações necessárias antes de ser entregue, tudo através do histórico imutável registado na blockchain
Reguladores Ambientais	Intervenientes responsáveis pela monitorização das emissões e impactos ambientais associados ao transporte marítimo. Através da integração de sensores IoT, podem aceder e validar registos de emissões de CO_2, consumo energético e dados de combustível diretamente na blockchain. Estes dados permitem avaliar o cumprimento de metas ESG (environmental, social anda governance) e regulamentos internacionais (como o EU - Emissions Trading System), assegurando maior transparência e sustentabilidade no setor.

A Figura *6*, ilustra a arquitetura técnica preconizada com a envolvência dos diferentes Stakeholders.

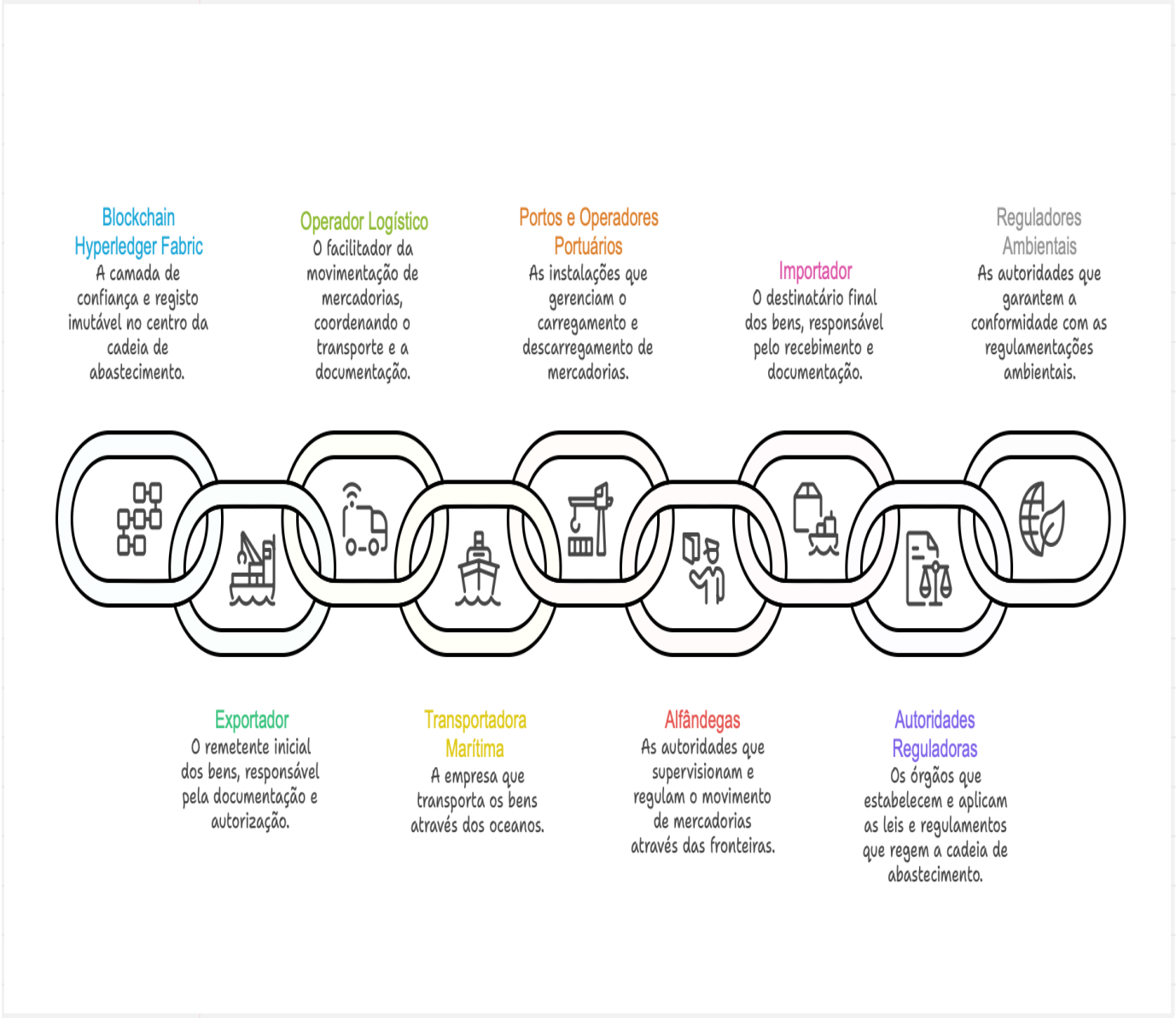


Figura 6: Arquitetura técnica - Stakeholders na Cadeia Logística Marítima

3.2.1 Componentes Técnicos da Arquitetura

A arquitetura, suportada numa rede permissionada Hyperledger Fabric será estruturada pelos componentes técnicos, ilustrados na Figura 7, que a seguir se detalha.

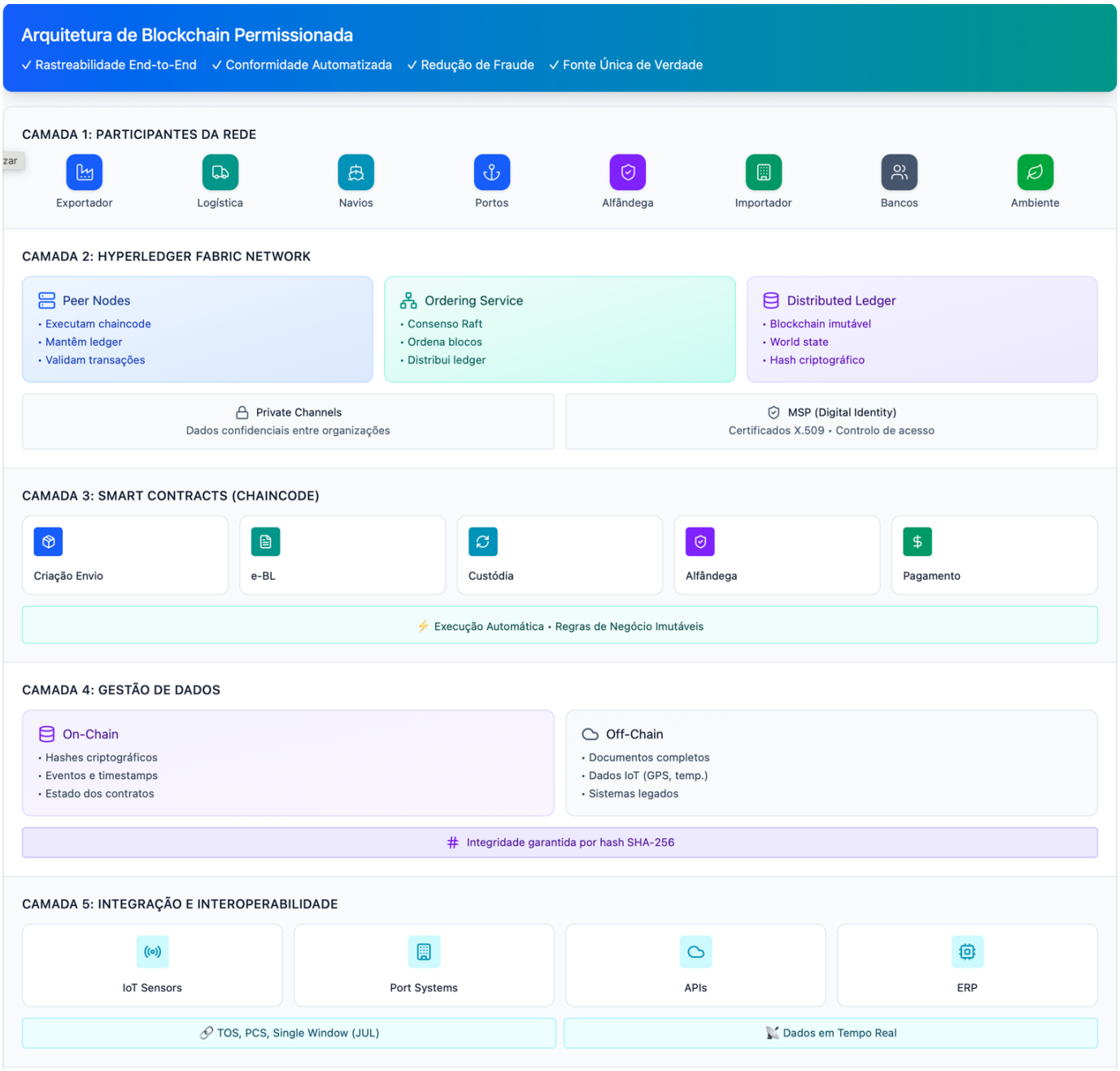


Figura 7: Componentes técnicos da Hyperledger Fabric

Rede Blockchain e Nós Participantes

A rede blockchain é formada por nós ("peers") pertencentes às organizações que integram a cadeia logística, bem como por nós especializados ("ordering service") que tratam do consenso. Cada organização membro dispõe de pelo menos um *peer* que mantém uma cópia sincronizada do *ledger* (registo de transações) imutável do sistema. O ledger consiste em dois elementos: a blockchain (histórico encadeado de transações) e a base de dados atualizada com os últimos valores dos ativos [26].

Para alcançar o acordo nas transações, o Hyperledger Fabric utiliza um mecanismo de consenso, em que um conjunto de validadores pré-definidos ordena os blocos [26], mecanismo que permite garantir alto rendimento e baixa latência, o que se adequa ao ambiente de cadeia de abastecimento, no qual se perspetiva um elevado número de eventos por dia.

A plataforma suporta a segmentação de dados por meio de canais. Cada canal funciona como um repositório isolado que um subconjunto de participantes pode ter acesso. Na arquitetura preconizada, utiliza-se canais privados para partilha de informações confidenciais (pode existir um canal restrito entre um exportador, o importador e a transportadora marítima apenas para partilhar os detalhes comerciais sensíveis) enquanto os outros canais englobam todos os intervenientes para registar eventos gerais do contentor. Assim, dados críticos são partilhados somente com as partes que deles necessitam, garantindo privacidade sem perder a transparência nos aspetos operacionais [13] [14].

Todos os nós da rede irão executar um software de peer Fabric [26]que valida as transações e armazena o ledger. Os referidos nós comunicam de forma segura (conexões TLS) e cada transação é assinada criptograficamente por quem a submeteu [26], impedindo adulterações e mantendo a imutabilidade. Caso algum nó tente introduzir dados inválidos os mecanismos de validação e consenso impedirão a sua inclusão no ledger.

Smart Contracts

No Hyperledger Fabric, a lógica de negócio da aplicação reside em smart contracts. Os smart contracts definem as regras e fluxos operacionais para monitoriar contentores e gerir documentos na blockchain. Neste contecto, serão desenvolvidos smart contracts para:

i. Registo e atualização de contentores: para registar um novo envio (criando um ativo digital para o contentor ou lote de contentores a enviar) associando-lhe um identificador único. Este identificador funciona como um código único ou um identificador descentralizado atribuído ao contentor. O smart contract garante que apenas entidades autorizadas (p.ex. o exportador ou transitário responsável) possam criar este registo inicial. A partir daí, cada evento da cadeia logística – carregamento, saída do porto, chegada, etc. – é modelado como uma transação invocando o smart contract para atualizar o estado do contentor;

ii. Gestão de documentação eletrónica: O smart contract facilita a emissão e verificação de documentos. Cada documento é ligado ao identificador do contentor e só pode ser enviado/validado pelas entidades competentes (p.ex., apenas a alfândega pode aprovar um certificado de exportação);

iii. Transferência de custódia e propriedade: O smart contract implementa a lógica de mudança de custódia, nomeadamente ao sair do armazém do exportador, a custódia passa para o transportador terrestre; quando é carregado no navio, passa para a transportadora marítima, e assim sucessivamente, até a entrega ao importador. Cada transferência é registada por uma função específica e assinada por quem está a entregar e por quem está a receber, servindo como recibo digital da troca;

iv. Regras de negócio e validação: Os smart contracts aplicam regras automáticas para garantir conformidade. Por exemplo, podem impedir que um contentor seja marcado como "embarque autorizado" sem que a alfândega de saída tenha registado a liberação. Essas validações reduzem os erros e evitam progressão indevida do processo sem aprovações necessárias.

A execução de smart contract resulta em transações que, após aprovadas, são registadas no ledger [26]. O ledger armazena assim os dados essenciais de rastreio e documentação, tais como: identificador do contentor, status atual, carimbo de data/hora de eventos, referência a documentos partes envolvidas e suas assinaturas. Não é necessário armazenar grandes ficheiros ou dados volumosos na plataforma – apenas referências e verificadores de integridade.

Armazenamento de dados

Para equilibrar desempenho, custo e privacidade, a solução faz uso combinado do ledger on-chain e de armazenamento off-chain. Dados críticos e de pequeno tamanho são armazenados na blockchain (on-chain) [33], ao passo que dados volumosos ou confidenciais são armazenados fora da blockchain (off-chain) [33], com integração segura, cujo resumo é apresentado na Tabela *5* abaixo.

Tabela 5: Distribuição dos dados entre a blockchain e armazenamentos externos

Tipo de Informação	Na Blockchain (On-Chain)	Fora da Blockchain (Off-Chain)
Identificação do Contentor	ID único do contentor.	Detalhes extensos da carga (descrição completa, peso, valor) – podem residir no sistema do exportador ou em base de dados externas integradas com a blockchain.
Eventos e Localização	Estado atual de cada evento.	Logs detalhados de sensores IoT (posições GPS frequentes, históricos de temperatura).
Documentos Eletrónicos	Hash criptográfico de cada documento (e-BL, certificados, faturas) e referência. Também registra quem/quando aprovou.	Conteúdo completo dos documentos eletrónicos.
Participantes e Credenciais	Identidades (ID) dos intervenientes em cada transação; papéis/atribuições ligados a certificados.	Detalhes pessoais/sensíveis de utilizadores (nomes completos, contactos) são armazenados em sistemas de gestão de identidade off-chain – na blockchain fica apenas a chave pública ou ID de certificado.
Lógica de Contratos Inteligentes	Regras implementadas são determinísticas e executadas pelos nós. O resultado (aprovação ou erro) de cada transação é imutavelmente registado.	Código fonte do *smart contract*. Logs da aplicação detalhados podem ser mantidos off-chain para posteriormente poderem ser auditados.
Auditabilidade e Prova	Toda transação recebe um identificador e é encadeada no bloco com hash anterior, fornecendo trilha de auditoria à prova de qualquer adulteração a informação.	Relatórios analíticos ou dashboards agregados gerados a partir dos dados on-chain podem ser armazenados off-chain.

Identidade, Segurança e Autenticação

Uma característica importante do Hyperledger Fabric é o seu modelo de identidade e segurança [26]. Cada utilizador ou sistema cliente na rede (seja um funcionário da alfândega, seja um sensor IoT reportando dados) possui uma identidade digital única, emitida por uma autoridade certificadora do consórcio. Essas identidades assumem a forma de certificados digitais que contêm chaves criptográficas. Ao submeter transações, os participantes assinam-nas com a sua chave privada, o que permite aos peers verificar a autenticidade e integridade de cada operação [31]

No que toca à confidencialidade dos dados, além do mecanismo de canais privados já anteriormente citado, todas as transações e dados em trânsito são cifrados, sendo que os dados sensíveis armazenados off-chain são igualmente cifrados, permitindo apenas a utilizadores com as permissões na blockchain recuperá-los.

Integração com IoT, Sensores e Sistemas Externos

Um dos pontos fortes da arquitetura preconizada é a capacidade de integrar dados em tempo real através de IoT e sistemas middleware e APIs. No contexto da cadeia de abastecimento marítima, podem ser destacados [5], [21]:

i. Sensores IoT em contentores;
ii. RFID e dispositivos de identificação;
iii. APIs de sistemas legacy (ERP, TOS, PCS) [26]; e
iv. Base de dados externas[26].

Em suma, a camada de integração permite uma maior fluidez dos sistemas de informação entre a blockchain e o ecossistema logístico. Os sensores IoT [34]e sistemas externos alimentam a blockchain com dados em tempo real, enquanto a blockchain disponibiliza aos sistemas externos dados consolidados e verificados para melhorar a tomada de decisão e a eficiência operacional [24], [35]



Figura 8: Processo de transporte com utilização de IoT, blockchain e smartcontracts

Aplicações e Interfaces os utilizadores

Não obstante de todas camadas tecnológicas anteriormente referidas e explicadas, reside na camada aplicacional a responsabilidade de interagir com os utilizadores finais. Na realidade a larga maioria dos intervenientes não irá interagir diretamente com a blockchain, mas em substituição irão utilizar interfaces web ou aplicações móveis fornecidas pelo sistema, nomeadamente, mas não exaustivamente, destacando-se:

i. Portal Web: Uma aplicação web acessível a diferentes perfis de utilizador. Após login seguro, apresenta um dashboard adaptado ao perfil de cada utilizador;

ii. Módulo de documentação: Módulo da aplicação dedicado à gestão de documentos e compliance. Os utilizadores podem exportar e visualizar os documentos eletrónicos correlacionados com o envio do contentor. Este módulo implementa também assinaturas digitais nos documentos, tudo integrado na blockchain para ser auditado e com validade jurídica. Para os reguladores, existe uma vista consolidada que lhes permite, por exemplo, extrair um relatório de conformidade de uma remessa. Assim, auditorias tornam-se mais ágeis e simples pela imutabilidade da transação.

iii. Aplicação móvel/scanner: Um aplicativo móvel com funcionalidades diversas, designadamente, leitura de código QR/NFC associados ao contentor [24].

iv. Notificações e alertas: O sistema gera alertas de notificações para os intervenientes.

v. Relatórios: Com todos os dados consolidados no ledger, a camada de aplicação pode incluir ferramentas analíticas. Indicadores-chave podem ser acompanhados – tempos médios de despacho, ocorrências de não conformidade, desempenho de transportadoras – permitindo melhoria contínua da cadeia logística. A aplicação e desenvolvimento de algoritimos de machine learning podem ser aplicados sobre dados históricos para prever atrasos ou otimizar rotas. A blockchain fornece dados de qualidade para essas análises, pois cada evento é auditado e não manipulado [13], [24].

A arquitetura desenhada demonstra uma abordagem integrada para rastreabilidade de contentores e documentação eletrónica na cadeia de abastecimento marítima [31]. A adoção do Hyperledger Fabric, permite registos imutáveis e transparentes (reduzindo fraude e discrepâncias), acesso seletivo à informação (proteção de dados comerciais sensíveis), automação de processos via smart contracts e integração de IoT para visibilidade acompanhamento em tempo real do envio dos contentores. Em resumo, todos os intervenientes beneficiam – exportadores e importadores ganham confiança e eficiência documental, transportadores e operadores reduzem disputas sobre entregas ou avarias, autoridades alfandegárias têm acesso a dados confiáveis, e os reguladores dispõem de uma trilha auditável de toda a cadeia. Esta arquitetura mostra-se assim adequada para uma implementação prática num consórcio marítimo [26], podendo ser complementada com evoluções adicionais, nomeadamente com a integração de pagamentos eletrónicos seguros.

CAPÍTULO 4

Caso de implementação da solução Hyperledger Fabric aplicada aos Portos de Leixões, Lisboa e Sines

Os portos de Leixões, Lisboa e Sines constituem pilares essenciais do comércio marítimo português, concentrando a maioria do volume nacional de carga contentorizada. O Porto de Sines destaca-se como principal hub nacional, movimentando mais de 2 milhões de TEU (unidade de medida padrão na logística marítima que representa a capacidade de um contentor de 20 pés de comprimento) por ano, cerca de metade do total do país, enquanto Leixões e Lisboa manuseiam aproximadamente 700 mil e 600 mil TEU anuais, respetivamente [36]. A elevada complexidade operacional destes portos — marcada pela multiplicidade de intervenientes, sistemas heterogéneos e processos documentais extensos — evidencia problemas persistentes, como burocracia excessiva, falta de interoperabilidade entre plataformas e vulnerabilidades associadas à troca e validação de documentos.

Atualmente, cada autoridade portuária opera a sua própria versão da Janela Única Logística, o que reforça a fragmentação dos sistemas de informação e limita a transparência e rastreabilidade ao longo das cadeias logísticas marítimas. Estes constrangimentos têm sido reconhecidos publicamente pela comunidade portuária nacional [36], que sublinha a necessidade de soluções digitais colaborativas com capacidade para modernizar os processos e reduzir riscos operacionais, incluindo fraude e erro humano. Entre as opções tecnológicas discutidas, a blockchain tem sido apontada como uma das mais promissoras, tendo inclusive emergido o debate sobre a criação de uma rede blockchain nacional que interligue os principais portos portugueses.

Neste contexto, propõe-se a adoção de uma solução baseada no Hyperledger Fabric [27], criando uma rede blockchain permissionada que conecte Leixões, Lisboa, Sines e os seus respetivos parceiros logísticos. Esta abordagem permitiria reforçar a integridade e auditabilidade dos documentos comerciais, melhorar a verificação da conformidade regulamentar e otimizar a partilha de informação entre os diversos intervenientes, contribuindo para operações portuárias mais eficientes, fiáveis e sustentáveis.

4.1. Identificação do problema e motivação

As cadeias de abastecimento marítimas em Portugal enfrentam desafios significativos de natureza operacional e tecnológica, que reduzem a eficiência e comprometem a confiança entre os intervenientes. Persistem ineficiências na gestão documental, uma vez que os documentos necessários ao transporte marítimo — como conhecimentos de embarque, faturas e certificados aduaneiros — são processados em sistemas eletrónicos distintos e não interoperáveis. A falta de integração entre os portos de Leixões, Lisboa e Sines conduz à duplicação de tarefas, atrasos e maior risco de erros ou manipulações indevidas de documentos ao longo do percurso logístico.

A rastreabilidade das cargas revela-se igualmente fragmentada, dado que cada entidade mantém registos próprios, dificultando a visibilidade ponta a ponta e a coordenação entre exportadores, transportadores, operadores portuários e importadores. Esta fragmentação impacta o planeamento e pode originar descoordenação operacional, sobretudo em remessas que atravessam múltiplos portos ou fronteiras.

Adicionalmente, subsistem fragilidades de segurança e confiança nos processos transacionais. A dependência de comunicações por e-mail e de portais fechados, aliada à inexistência de um registo imutável das interações, pode gerar conflitos de versões, problemas na validação de contratos ou até casos de duplicação fraudulenta de documentos, como títulos de carga. Sem um mecanismo independente de verificação, a autenticidade e unicidade dos documentos digitais nem sempre são asseguradas.

A conformidade regulamentar e aduaneira constitui outro ponto crítico. A necessidade de cumprir formalidades em cada etapa, desde a saída ao desalfandegamento no destino, exige coordenação eficaz entre múltiplos agentes. Processos manuais ou não sincronizados aumentam o risco de incumprimento e atrasos na libertação das cargas.

Face a este conjunto de limitações, torna-se evidente a oportunidade de uma solução baseada em tecnologia blockchain. A sua adoção surge como meio para reduzir burocracia, aumentar a transparência, fortalecer a confiança entre os intervenientes e alinhar os portos portugueses com as tendências internacionais de digitalização. Uma rede blockchain permissionada permitiria integrar Leixões, Lisboa e Sines num ecossistema digital unificado, garantindo a integridade e privacidade dos dados e reforçando a competitividade logística do país.

4.2. Solução proposta com Hyperledger Fabric

A solução proposta assenta na criação de uma rede blockchain permissionada baseada no Hyperledger Fabric, especificamente adaptada às necessidades dos portos marítimos portugueses. A escolha desta tecnologia justifica-se pelas suas características orientadas ao contexto empresarial, nomeadamente a arquitetura modular, os mecanismos avançados de privacidade e um modelo de consenso adequado a redes fechadas, onde apenas entidades autorizadas podem participar [37] [38]. Esta abordagem garante controlo de acesso, confidencialidade dos dados e elevada robustez na validação das transações.

A rede blockchain funcionaria como um sistema unificador de processos e registos, permitindo que portos, autoridades e operadores logísticos partilhassem uma fonte de verdade comum, imutável e aditável. As funcionalidades a desenvolver visam responder diretamente às principais limitações atuais, abrangendo a autenticação segura de documentos comerciais, o rastreamento contínuo de contentores e a automação de processos críticos através de contratos inteligentes, como validações aduaneiras, confirmações de embarque e instruções de pagamento. Cada etapa relevante da cadeia logística — desde a emissão do conhecimento de embarque até à confirmação da entrega final — seria registada de forma criptograficamente protegida, transparente para os participantes e resistente a manipulações.

Espera-se que este modelo gere ganhos significativos em eficiência, ao reduzir redundâncias e tempos de processamento; em confiança, ao assegurar a integridade e audibilidade da informação; e em conformidade, ao disponibilizar registos automaticamente acessíveis para verificações regulatórias e auditorias internas ou externas.

A rede envolveria vários tipos de participantes:

i. Autoridades portuárias de Leixões, Lisboa e Sines, atuando como nós validadores responsáveis pelo registo de eventos portuários.
ii. Companhias de navegação, operadores de terminais e transitários, que utilizariam a rede para submeter manifestos, instruções logísticas e consultar atualizações de estado.
iii. Alfândega e demais entidades reguladoras, com acesso a dados essenciais para validar documentação e inserir aprovações ou retenções diretamente na blockchain.
iv. Importadores e exportadores, que poderiam monitorizar o estado das suas expedições e obter confirmações fiáveis sobre o progresso das cargas.
v. Instituições financeiras e seguradoras, que teriam capacidade para verificar condições transacionais, como confirmações de embarque ou entrega, preservando simultaneamente a confidencialidade dos dados comerciais.

vi. Parceiros tecnológicos e integradores, responsáveis pela implementação e manutenção da infraestrutura Hyperledger Fabric, bem como pela integração com sistemas existentes e dispositivos IoT.

Em síntese, como se pode visualizar na Figura *9*, esta solução baseada no Hyperledger Fabric proporciona uma base sólida para promover a interoperabilidade entre portos e entidades logísticas, reforçando a digitalização, a confiança e a competitividade das cadeias de abastecimento marítimas em Portugal. Consequentemente, na Figura *10*, Figura *11* e Figura 12, projetou-se um mockup-up que permite a modelação de uma view para cada um dos intervenientes (operador logístico, autoridade portuária e alfândega).

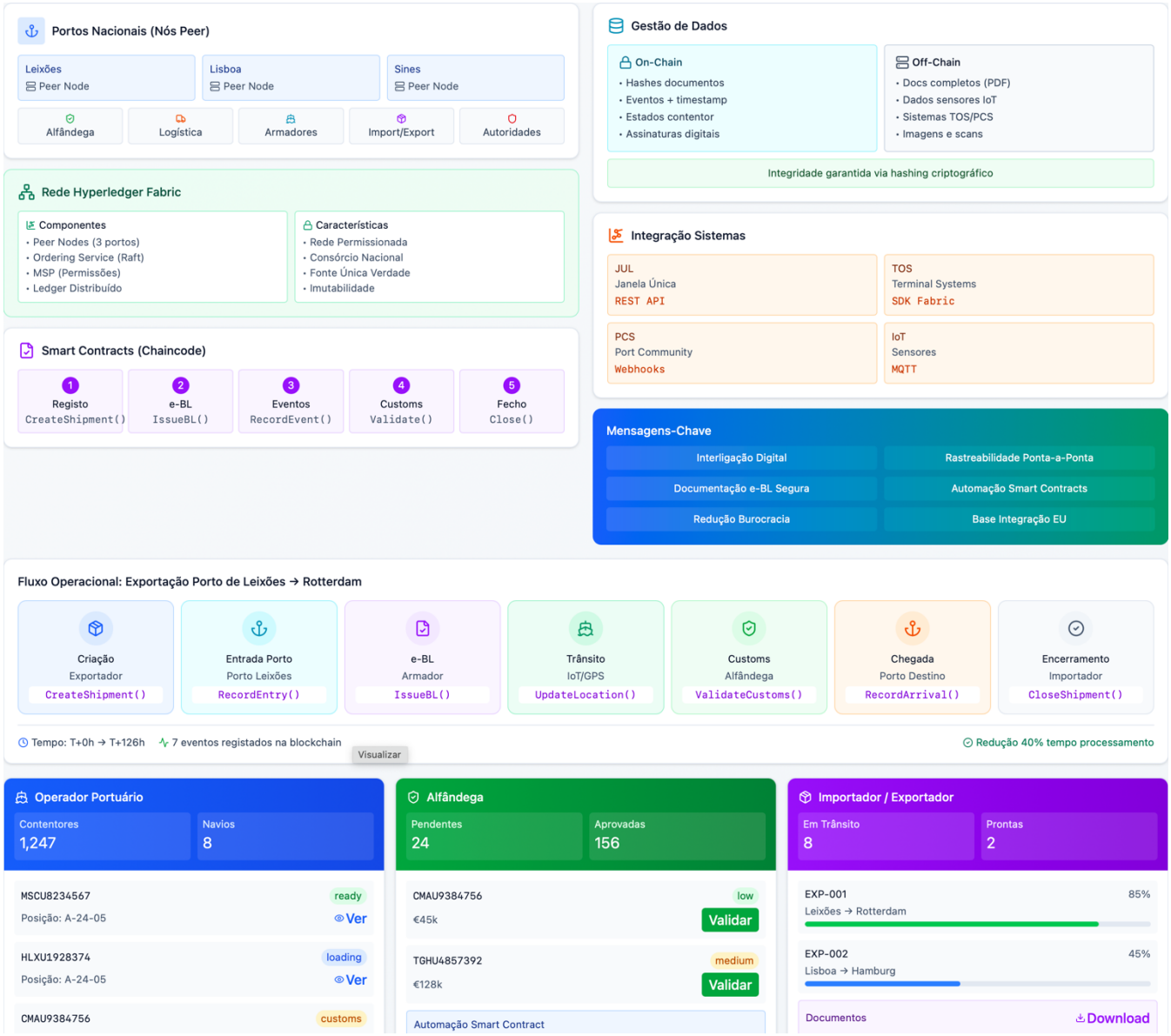


Figura 9: Ilustração da solução em Hyperledger Fabric

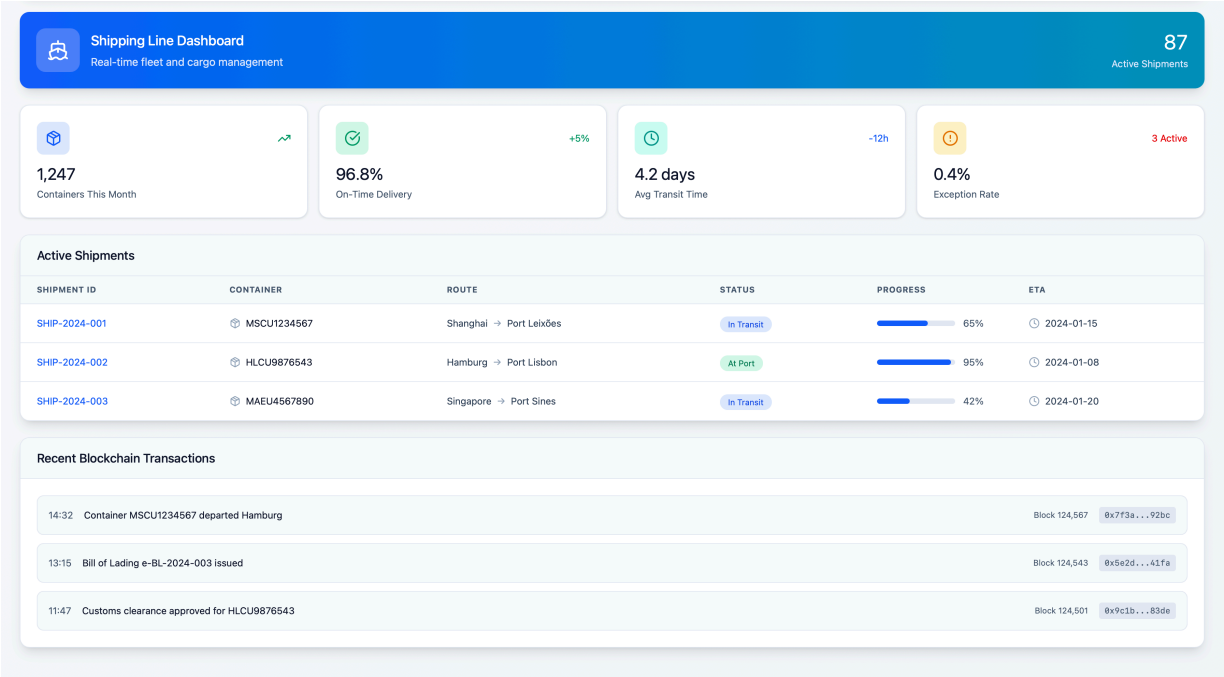


Figura 10: View dashboard Operador Logístico

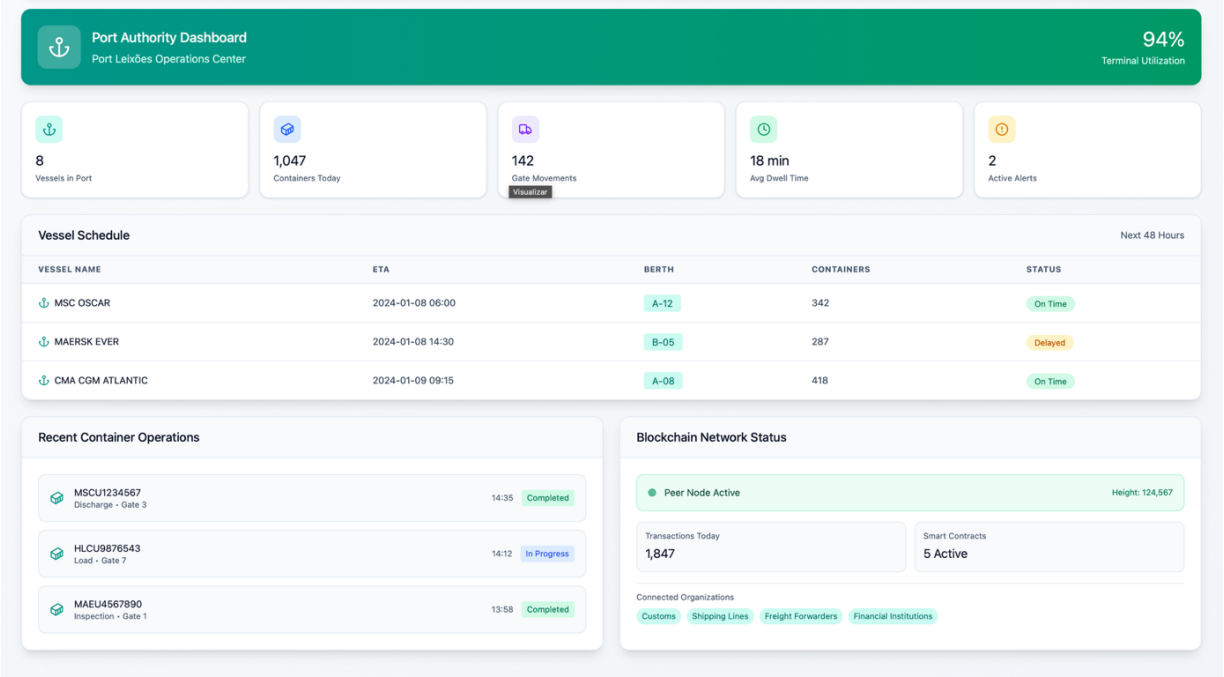


Figura 11: View dashboard Autoridade Portuária

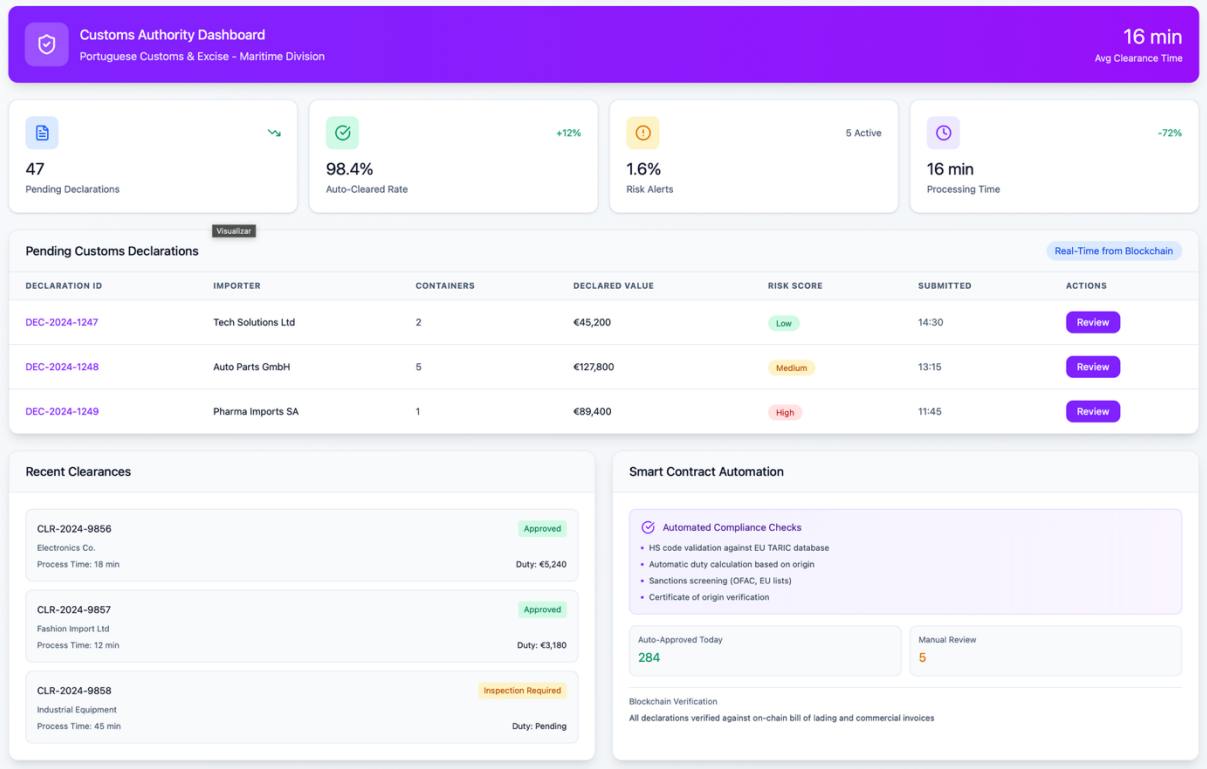


Figura 12: View dashboard Alfândega

4.3. Concepção e desenvolvimento da solução

A solução proposta, como referida anteriormente, assenta numa arquitetura de consórcio baseada no Hyperledger Fabric, onde cada entidade relevante da cadeia logística — autoridades portuárias, alfândega, operadores logísticos e outros intervenientes.

Os smart contracts constituem o núcleo importante da plataforma, automatizando regras de negócio que atualmente dependem de intervenção humana. Estes contratos permitem, por exemplo, libertar automaticamente um contentor após validação aduaneira, conciliar documentos comerciais, acionar seguros mediante dados IoT ou efetuar liquidações financeiras associadas a títulos de carga. As ações são executadas segundo políticas de endosso, garantindo que determinadas operações só avançam com a aprovação de várias entidades envolvidas no processo logístico.

Do ponto de vista estrutural, a rede é composta por múltiplos nós validadores operados pelos portos de Leixões, Lisboa e Sines, bem como por entidades reguladoras e grandes operadores logísticos. O serviço de ordenação distribuído valida transações de forma resistente a falhas, enquanto utilizadores finais interagem através de interfaces web ou APIs integradas nos sistemas portuários existentes. Módulos externos, como gateways IoT e conectores API, garantem a incorporação automática de dados operacionais e administrativos no ledger, reforçando a coerência e a interoperabilidade entre plataformas.

4.4. Modelo de dados mínimo

Embora a solução seja conceptual, a sua aplicabilidade em contexto real beneficia da definição de um modelo de dados mínimo, identificando os principais ativos (assets) e o respetivo ciclo de vida (lifecycle). A Tabela *6* apresenta uma proposta mínima para representar fluxos operacionais e documentais típicos do transporte marítimo-portuário, com enfoque em contentores e documentação crítica.

Tabela 6: Modelo de dados mínimo - ativos, campos e estados (lifecycle)

Ativo (Asset)	Finalidade	Campos mínimos (exemplos)	Estados (lifecycle) (exemplos)
Container (Contentor)	Rastrear o contentor e os seus eventos operacionais ao longo da cadeia.	container_id (ISO 6346); owner_id; current_location; timestamp_ultima_atualizacao; status; shipment_id.	Created; GateIn; InYard; Loaded; InTransit; ArrivedPort; Unloaded; Released; Delivered.
Shipment Expedição/Envio)	Agregar um envio (rota, intervenientes e contentores associados).	shipment_id; origin; destination; carrier_id; etd/eta; incoterm; containers[]; status.	Planned; Dispatched; InTransit; Arrived; Closed.
eBL Electronic Bill of Lading)	Suportar emissão, verificação e transferência do conhecimento de embarque eletrónico.	ebl_id; issuer_id; consignor_id; consignee_id; issue_date; hash_documento; offchain_uri; status; transfer_history[].	Issued; Verified; Transferred; Surrendered; Archived.
Customs Clearance (Desembaraço/Aprovação)	Registar o estado e decisão de conformidade/regime aduaneiro.	clearance_id; shipment_id; authority_id; inspection_required; decision; decision_timestamp; status.	Pending; UnderReview; Approved; Rejected; Expired.
Event Log (Evento)	Normalizar eventos auditáveis (operacionais/documentais) associados a qualquer ativo.	event_id; asset_type; asset_id; event_type; actor_id; location; timestamp; signature/hash.	Dependente do tipo de evento; por exemplo: Recorded; Validated; Disputed; Resolved.

4.5. Mecanismo de governo

Em redes permissionadas , com a Hyperledger Fabric, o modelo de governo [37] é determinante para assegurar confiança entre entidades e conformidade legal. Para reforçar a exequibilidade da proposta, recomenda-se explicitar: i) o modelo de emissão e gestão de identidades (CA/MSP), ii) a segmentação de informação através de canais, e iii) as políticas de *endorsement* para validação de transações críticas.

4.6. Interoperabilidade com PCS, TOS e sistemas aduaneiros (exemplos conceptuais)

A adoção da solução depende fortemente da integração com sistemas existentes [38], nomeadamente PCS (Port Community System), TOS (Terminal Operating System) e sistemas aduaneiros/regulatórios.

Recomenda-se uma abordagem híbrida on-chain/off-chain, em que a blockchain regista estados e provas de integridade (hashes/metadata), enquanto documentos completos e dados sensíveis permanecem em repositórios externos controlados, com conectores API para sincronização da informação [33].

4.7. Blocos funcionais da solução Hyperledger Fabric

A Figura *13* abaixo apresenta a arquitetura funcional da solução blockchain proposta para os portos de Leixões, Lisboa e Sines, organizada em seis blocos operacionais que representam as etapas essenciais do fluxo comercial e logístico. Este modelo reflete um ciclo digital contínuo, em que cada fase da expedição é registada na rede Hyperledger Fabric de forma segura, transparente e imutável.

O primeiro bloco corresponde ao início da expedição e criação do contrato inteligente, momento em que o exportador submete os detalhes da carga e é instanciado um smart contract que define regras, participantes autorizados e eventos que atualizam o estado da remessa. O hash gerado constitui o identificador imutável da expedição e sincroniza todas as operações entre os portos envolvidos.

O segundo bloco centra-se na autenticação e verificação dos documentos comerciais, onde documentos essenciais, são registados na blockchain na forma de hashes. Este mecanismo assegura a integridade documental e permite validação imediata pelas entidades autorizadas, preservando simultaneamente a confidencialidade através de canais privados.

O terceiro bloco refere-se à monitorização da carga em tempo real, incorporando dados provenientes de sensores IoT e RFID instalados nos contentores. Cada atualização é registada no ledger com timestamp, permitindo rastreabilidade contínua e deteção imediata de incidentes.

No quarto bloco, dedicado à conformidade regulamentar automatizada, as autoridades aduaneiras verificam digitalmente todos os requisitos legais, com os smart contracts a executarem verificações automáticas relativas a tributos, licenças e certificados. Irregularidades geram alertas instantâneos, enquanto expedições conformes avançam sem necessidade de processos manuais, reduzindo tempos de desalfandegamento.

O quinto bloco aborda a liquidação financeira e finalização da expedição, onde o contrato inteligente aciona automaticamente a libertação de pagamentos e encerra formalmente a transação no ledger, garantindo segurança e reduzindo riscos de fraude. A digitalização desta etapa facilita auditorias financeiras e mecanismos de pagamento como escrow digital.

Por fim, o sexto bloco diz respeito à auditoria e modelo de governo da rede, assegurando a integridade contínua do sistema. Todos os nós validadores mantêm cópias sincronizadas do ledger, sendo possível gerar relatórios descentralizados de desempenho, segurança e execução de contratos inteligentes. Este bloco define ainda regras de consenso, gestão de atualizações e inclusão de novos participantes, garantindo a sustentabilidade e escalabilidade da rede.



Figura 13: Blocos funcionais da solução Hyperledger Fabric

4.8. Benefícios esperados e principais desafios

A adoção de uma solução blockchain baseada no Hyperledger Fabric nos portos de Leixões, Lisboa e Sines apresenta benefícios significativos, mas também desafios relevantes que devem ser cuidadosamente geridos para garantir uma implementação bem-sucedida. Entre os benefícios mais expressivos destaca-se a eficiência operacional, resultante da digitalização integrada e da eliminação da documentação física, que representa até 20% dos custos totais de uma expedição marítima. A automatização dos fluxos documentais e a substituição de processos manuais por contratos inteligentes reduzem a burocracia, aceleram tramitações e alinham os portos portugueses com iniciativas europeias como a eFTI (Electronic Freight Transport Information).

Outro benefício crítico é a transparência e rastreabilidade de ponta a ponta, proporcionada por um registo partilhado e inalterável de todas as etapas logísticas. Os participantes autorizados passam a monitorizar, em tempo real, a localização e o estado documental das cargas, permitindo respostas rápidas a incidentes e facilitando auditorias e conformidade regulatória. A segurança e confiança entre as partes é reforçada pela natureza imutável do ledger, pela encriptação dos dados e pelo controlo rigoroso de permissões, reduzindo riscos de fraude e manipulação. A automação via contratos inteligentes introduz maior rapidez nas validações, autorizações e pagamentos transfronteiriços, encurtando os tempos de ciclo e aumentando a previsibilidade das operações.

Contudo, a implementação enfrenta obstáculos substanciais. A integração com sistemas legacy surge como um desafio técnico central, dada a coexistência de plataformas consolidadas como a Janela Única Logística e sistemas de gestão portuária. A interoperabilidade entre redes nacionais e internacionais permanece complexa devido à heterogeneidade de padrões tecnológicos. A resistência organizacional e a gestão da mudança constituem um segundo desafio relevante, muitas vezes motivado por receios quanto à partilha de dados ou pela falta de familiaridade com a tecnologia blockchain. A superação destas barreiras exige formação específica, clareza na governação da rede e envolvimento ativo dos utilizadores-chave desde as fases iniciais.

Adicionalmente, persistem questões legais e regulamentares associadas à validade jurídica de documentos digitais e à execução automática de contratos, bem como à compatibilidade com o RGPD, nomeadamente no que respeita à gestão de dados pessoais num ledger imutável. A privacidade e confidencialidade de informações comerciais sensíveis também exigem mecanismos robustos — como canais privados e criptografia granular — para evitar a exposição de dados estratégicos a terceiros.

Em síntese, os benefícios esperados da implementação da blockchain incluem maior eficiência, transparência, segurança e redução de fraudes, respondendo às necessidades de modernização das cadeias logísticas marítimas portuguesas. Contudo, para materializar plenamente este potencial, é essencial gerir com rigor os desafios técnicos, regulatórios e organizacionais identificados.

4.9. Demonstração e avaliação

A avaliação da solução proposta baseada no Hyperledger Fabric não foi realizada através de testes-piloto nos portos portugueses, mas sim concebida como uma projeção teórica dos resultados esperados, fundamentada na análise comparativa de iniciativas semelhantes implementadas internacionalmente. Esta abordagem prospetiva permite inferir de forma fundamentada como a tecnologia poderia comportar-se no contexto dos portos de Leixões, Lisboa e Sines, sem implicar qualquer interrupção operacional ou necessidade de intervenção direta nas infraestruturas nacionais.

Numa perspetiva conceptual, a integração da blockchain seria avaliada quanto à compatibilidade com sistemas legados, à eficiência dos contratos inteligentes e à fiabilidade da transmissão de dados entre os vários nós. Esta análise, embora teórica, baseia-se em lições extraídas de projetos já realizados em portos internacionais — como Singapura, Roterdão ou Antuérpia — onde redes blockchain permissionadas foram utilizadas para testar rastreabilidade, digitalização documental e automatização aduaneira.

Para estimar o impacto potencial em Portugal, teria de se analisar indicadores-chave de desempenho (KPI) habitualmente aplicados em projetos semelhantes internacionais, nomeadamente:

I. Redução do tempo de processamento, inferida através da aceleração observada em outros sistemas blockchain comparáveis no tratamento documental e no desalfandegamento;
II. Precisão da conformidade, baseada na percentagem de validações automáticas sem erros obtidas em redes blockchain já operacionais;
III. Adoção pelas partes interessadas, analisando o grau de participação registado nos pilotos internacionais entre autoridades, operadores logísticos e agentes económicos.

CAPÍTULO 5

Validação Conceptual da Solução

No âmbito da Metodologia de Investigação em DSRM [23], a validação da solução tecnológica proposta constitui uma etapa fundamental para avaliar a sua relevância, utilidade percebida, viabilidade e potencial de aceitação organizacional, mesmo na ausência de uma implementação técnica ou de uma prova de conceito em ambiente produtivo. De acordo com Peffers et al. [11], a avaliação de artefactos em Design Science pode assumir uma natureza conceptual, analítica ou perceptual, sendo particularmente adequada em fases iniciais de desenvolvimento, quando o objetivo principal consiste em verificar o alinhamento da solução com as necessidades reais dos utilizadores finais.

Neste contexto, o presente estudo procede à validação conceptual de uma solução baseada em tecnologia blockchain, suportada no framework Hyperledger Fabric, direcionada às cadeias de abastecimento marítimas. A validação adotou uma abordagem conceptual e empírica de natureza exploratória, sem a realização de uma implementação prática do sistema, privilegiando a recolha estruturada de perceções de profissionais do setor marítimo-portuário e da logística associada, enquanto principais stakeholders da solução proposta.

Importa clarificar, desde o início, o alcance desta validação. A avaliação realizada neste estudo é de natureza conceptual e exploratória, baseada na perceção de profissionais do setor relativamente ao valor, viabilidade e barreiras associadas à solução proposta. Assim, os resultados devem ser interpretados como evidência de valor percebido (perceived value) e de aceitabilidade inicial da arquitetura, e não como comprovação empírica de impacto operacional (ex.: redução efetiva de tempos, custos ou fraude), uma vez que não foi implementada uma prova de conceito (PoC) nem recolhidos dados operacionais em ambiente real.

Adicionalmente, a amostra foi obtida por amostragem por julgamento, o que limita a generalização estatística dos resultados. Ainda assim, esta abordagem é adequada para uma primeira validação em contextos onde o acesso a stakeholders é restrito e o objetivo é recolher indícios preliminares sobre a relevância e viabilidade do artefacto, servindo de base para estudos futuros com amostras mais amplas e/ou métodos mistos.

Face à inexistência de uma prova de conceito técnica, optou-se por uma estratégia de validação assente na aplicação de um questionário estruturado, metodologia amplamente reconhecida na literatura científica como adequada para a avaliação de artefactos tecnológicos em fases iniciais de conceção [23], permitindo aferir a aceitação potencial, a clareza funcional, a viabilidade percebida e o valor operacional da solução [39].

5.1. Estrutura do questionário e tipologia de itens

O instrumento de recolha de dados foi especificamente concebido para esta investigação e encontra-se apresentado na íntegra no Anexo A: Avaliação de uma Plataforma Digital Baseada em Blockchain para a Cadeia de Abastecimento Marítima. O questionário foi organizado em três grandes grupos:

i. Itens de caracterização dos participantes, destinados à recolha de informação sobre perfil profissional, função desempenhada, experiência no setor e tipo de organização representada;
ii. Itens quantitativos, formulados sob a forma de afirmações avaliadas através de escalas de Likert de cinco pontos;
iii. Perguntas abertas, orientadas para a recolha de contributos qualitativos, recomendações e identificação de fatores contextuais relevantes.

A escala de Likert utilizada varia entre: 1 — Discordo totalmente, 2 — Discordo, 3 — Nem concordo nem discordo, 4 — Concordo, 5 — Concordo totalmente.

A opção por uma escala de cinco pontos deveu-se à sua ampla utilização em estudos de adoção tecnológica e avaliação de sistemas de informação, oferecendo um equilíbrio adequado entre simplicidade de resposta, redução da carga cognitiva para os inquiridos e capacidade de discriminação das perceções individuais [40]. Este tipo de escala revela-se particularmente apropriado para a avaliação de atitudes, perceções e intenções em contextos organizacionais caracterizados por elevada complexidade e heterogeneidade de stakeholders.

O questionário foi elaborado recorrendo a uma linguagem acessível a profissionais não especializados em tecnologias da informação, com o objetivo de mitigar enviesamentos associados à literacia tecnológica, assegurando simultaneamente o rigor conceptual necessário à avaliação de uma solução baseada em blockchain [41].

5.2. Dimensões avaliadas e fundamentações teóricas do inquérito

A construção do questionário foi orientada por modelos teóricos consolidados na literatura sobre adoção tecnológica e transformação digital, nomeadamente o Technology Acceptance Model (TAM) [40], o Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT) [39] e o modelo Technology–Organization–Environment (TOE) [40].

O TAM foi utilizado como referência para a avaliação da utilidade percebida e da viabilidade ou facilidade percebida da solução; o UTAUT contribuiu para a análise da intenção de adoção e dos fatores facilitadores; e o modelo TOE permitiu enquadrar barreiras organizacionais, técnicas e ambientais, incluindo aspetos regulatórios, interoperabilidade e maturidade do ecossistema.

Com base nestes referenciais, o instrumento foi organizado em seis dimensões analíticas, consideradas críticas para a adoção de soluções de blockchain em cadeias de abastecimento marítimas:

i. Utilidade percebida e valor operacional (Perceived Usefulness / Performance Expectancy);
ii. Viabilidade técnica e integração (Technical Feasibility / Compatibility);
iii. Confiança, transparência e integridade da informação (Trust & Transparency);
iv. Interoperabilidade e colaboração interorganizacional (Interoperability & Collaboration);
v. Intenção de adoção e aplicabilidade organizacional (Adoption Intention / Behavioral Intention);
vi. Barreiras e fatores de risco organizacionais e regulatórios (Organizational & Environmental Barriers).

As questões foram parcialmente adaptadas de construtos existentes na literatura (TAM, UTAUT e TOE) [39], [40], [42]e complementadas com questões construídas em resultado da análise do contexto marítimo-portuário, considerando desafios como a diversidade e multiplicidade de stakeholders, a necessidade de rastreabilidade documental, a interoperabilidade entre os diferentes sistemas e as exigências regulamentares.

5.3. Perguntas por dimensão

De forma a assegurar transparência metodológica, rastreabilidade teórica e possibilidade de replicação do estudo, apresentam-se de seguida as questões efetivamente utilizadas no questionário, organizadas de acordo com as dimensões analíticas definidas:

i. Dimensão 1 — Utilidade percebida e valor operacional (TAM – Perceived Usefulness; UTAUT – Performance Expectancy)

Esta dimensão avalia a perceção dos participantes relativamente aos benefícios funcionais e operacionais da solução proposta no contexto das cadeias de abastecimento marítimas.

Questões incluídas no questionário:

- D1.1 – Rastrear contentores ao longo da cadeia logística;
- D1.2 – Digitalizar e substituir documentos em papel;
- D1.3 – Partilhar informação de forma segura;
- D1.4 – Melhorar a eficiência das operações;
- D2 – Adequação geral da solução ao setor marítimo.

Estas questões permitem avaliar de forma direta o valor operacional percebido e a relevância prática da solução para os processos logísticos e portuários.

ii. Dimensão 2 — Viabilidade técnica e integração (TAM – Ease of Use; TOE – Compatibilidade tecnológica)

A viabilidade técnica é avaliada de forma indireta através da perceção dos participantes quanto à adequação da solução ao setor e à integração com o ecossistema existente.

Questões incluídas no questionário:

- D2 – Adequação geral da solução ao setor marítimo;
- F1.2 – Integração com sistemas existentes.

A combinação destas questões permite captar os desafios existentes associados à integração com sistemas legacy em utilização no setor marítimo-portuário.

iii. Dimensão 3 — Confiança, transparência e integridade da informação (Extensões do TAM; TOE – Redução de risco e confiança interorganizacional)

Esta dimensão avalia o potencial da tecnologia blockchain para reforçar a confiança entre stakeholders, melhorar a transparência e assegurar a integridade da informação.

Questões incluídas no questionário:

- C2.2 – A blockchain pode aumentar a confiança entre parceiros da cadeia logística;
- E1.2 – Transparência dos processos;
- E1.3 – Redução de erros e fraudes;
- E1.5 – Confiança entre entidades.

Estas questões refletem diretamente os benefícios associados à imutabilidade dos registos e à partilha controlada de informação num ambiente interorganizacional.

iv. Dimensão 4 — Interoperabilidade e colaboração interorganizacional (UTAUT – Facilitating Conditions; TOE – Contexto organizacional)

A interoperabilidade e a colaboração entre entidades são aspetos críticos em cadeias de abastecimento caracterizadas por múltiplos intervenientes.

Questões incluídas no questionário:

- C2.1 – A blockchain pode facilitar a partilha de informação entre entidades;
- B2 – Grau de partilha digital de informação com outras entidades;
- D1.3 – Partilhar informação de forma segura.

Estes itens permitem avaliar a perceção dos participantes quanto à capacidade de a solução promover coordenação e colaboração entre organizações distintas

v. Dimensão 5 — Intenção de adoção e aplicabilidade organizacional (UTAUT – Behavioral Intention)

Esta dimensão mede a predisposição das organizações para considerar a adoção futura da solução proposta.

Questões incluídas no questionário:

- G1 – Probabilidade de a sua organização considerar a adoção de uma solução deste tipo no futuro
- G2 – Principal condição para avançar com a adoção

A combinação destes itens permite avaliar não apenas a intenção declarada de adoção, mas também os fatores considerados determinantes para a decisão organizacional

vi. Dimensão 6 — Barreiras e fatores de risco organizacionais e regulatórios (TOE – Organization & Environment)

Esta dimensão visa identificar os principais obstáculos à adoção da solução no contexto real do setor marítimo-portuário.

Questões incluídas no questionário:

- F1.1 – Custos de implementação;
- F1.2 – Integração com sistemas existentes;
- F1.3 – Resistência à mudança;
- F1.4 – Questões legais e regulamentares;
- F1.5 – Partilha de informação sensível.

Estas questões estão alinhadas com os fatores organizacionais e ambientais do modelo TOE [39], permitindo identificar riscos críticos à adoção da tecnologia.

5.4. Questões qualitativas

Adicionalmente, o questionário incluiu perguntas abertas, com o objetivo de complementar a análise quantitativa e aprofundar a interpretação dos resultados.

5.5. Consistência interna e fiabilidade (Cronbach's alpha)

Para avaliar a consistência interna das dimensões medidas por múltiplas questões, foi calculado o coeficiente de Cronbach's alpha (α) para cada dimensão do questionário.

Apesar de a amostra ser relativamente limitada (n = 17), o cálculo do alpha foi efetuado com o objetivo de fornecer um indicador exploratório de consistência interna e fiabilidade do instrumento.

Os resultados devem ser interpretados como indicativos, e não como confirmação definitiva de validade psicométrica, recomendando-se amostras maiores em trabalhos futuros.

De forma geral, considerou-se como referência:

i. $\alpha \geq 0.70$: consistência interna aceitável
ii. $0.60 \leq \alpha < 0.70$: aceitável em estudos exploratórios
iii. $\alpha < 0.60$: necessidade de revisão dos itens

Caso o cálculo de α não seja estatisticamente robusto, nomeadamente devido ao número reduzido de itens por dimensão ou variação limitada nas respostas, esta limitação é explicitada, mantendo-se a análise como exploratória e recomendando-se validação futura do instrumento com uma amostra maior.

5.6. Síntese metodológica

Em síntese, a validação conceptual baseou-se num instrumento organizado por dimensões diretamente relacionadas com adoção de tecnologia, confiança interorganizacional, viabilidade de integração e impacto operacional. O questionário foi construído com base em frameworks consolidados (TAM/UTAUT/TOE), complementado por itens ajustados ao domínio marítimo-portuário, e reforçado por perguntas abertas para recolha de evidência qualitativa.

5.7. Resultados da Investigação

A análise dos resultados tem como objetivo compreender a perceção dos diferentes stakeholders relativamente à solução conceptual proposta, baseada em tecnologia blockchain. Neste contexto, a avaliação incide sobre o nível atual de digitalização das organizações, as perceções em relação à tecnologia blockchain, a utilidade percebida da solução, os impactos esperados da sua adoção e as principais barreiras à sua implementação.

Os resultados apresentados assentam numa análise quantitativa das respostas fechadas, recolhidas com recurso a escalas de Likert de cinco pontos, complementada por uma análise qualitativa das respostas abertas.

5.8. Perfil da amostra

A amostra do estudo é composta por 17 participantes, provenientes de organizações que intervêm diretamente nas cadeias de abastecimento marítimas, incluindo autoridades portuárias, operadores logísticos, transitários, transportadoras marítimas, agentes de navegação, bem como entidades reguladoras e aduaneiras. São participantes na maioria do sexo masculino, representando 88%, e com idades compreendidas entre os 40 e os 59 anos, correspondendo a 82% do total da amostra.

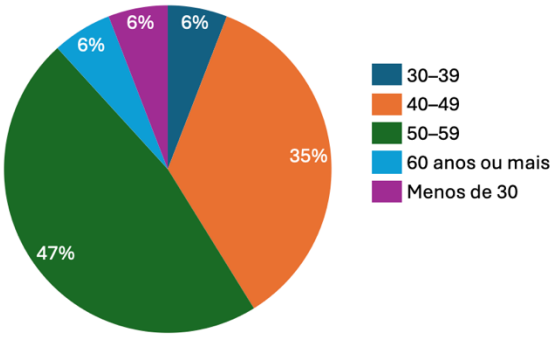


Figura 14: Gráfico com a distribuição etária dos participantes

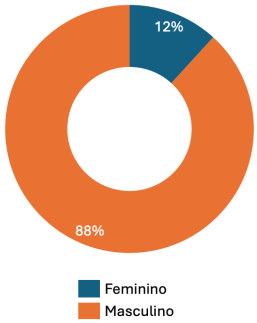


Figura 15: Gráfico com a distribuição do género dos inquiridos

No que concerne à experiência profissional, 35% ocupam posições de direção e 47% de gestão intermédia, o que confere relevância aos resultados obtidos, atendendo ao seu envolvimento em processos de decisão e definição de estratégias organizacionais.

No que respeita à experiência profissional, observa-se uma predominância de participantes com mais de 10 anos de atividade no setor, representando 82% da amostra, o que reforça a maturidade e a credibilidade das perceções recolhidas.

Para o propósito deste estudo, pretendeu-se que existisse uma representação das principais entidades que constituem os diferentes stakeholders.

Assim sendo, 18% dos inquiridos desempenham funções no regulador/autoridade aduaneira, enquanto 24% dos participantes são profissionais da autoridade portuária, sendo relevante por se posicionarem como os principais atores na solução proposta.

O universo da amostra é igualmente representado por operadores logísticos, 35%, e companhias de navegação, que representam 24%, permitindo assim dotar a amostra de uma amplitude representativa das organizações que atuam nos diferentes blocos que constituem a solução de blockchain.

5.9. Análise dos resultados

Em suma e como se pode constatar na Tabela *7*, os resultados obtidos na avaliação da solução proposta permitem concluir que o artefacto conceptual desenvolvido cumpre os objetivos definidos neste estudo. A perceção positiva dos inquiridos relativamente à validade global da solução e à sua adequação ao setor marítimo-logístico confirma a pertinência da aplicação da tecnologia blockchain no contexto analisado, bem como o seu alinhamento com as necessidades operacionais, regulatórias e tecnológicas do setor.

Adicionalmente, o impacto esperado nos processos evidencia o potencial da solução para gerar melhorias significativas ao nível da eficiência operacional, da transparência, da rastreabilidade e da confiança entre os diversos intervenientes da cadeia de abastecimento marítima.

Não obstante, a intenção futura de adoção, embora favorável, revela-se ligeiramente mais moderada, sugerindo que a materialização da adoção da solução poderá depender de fatores complementares, nomeadamente, a maturidade digital das organizações, os custos de implementação e a existência de enquadramentos institucionais adequados.

Tabela 7: Resultados do inquérito

Dimensão de Avaliação	Critério	Descrição do Critério	Média (1 a 5)
Avaliação da Solução Proposta	Validade global	Grau em que a solução proposta responde de forma adequada ao problema identificado e aos objetivos do estudo	4,12
Adequação da Solução ao Setor	Adequação setorial	Alinhamento da solução com a realidade operacional, regulatória e tecnológica do setor marítimo-logístico	4,18
Impacto Esperado	Impacto nos processos	Potencial impacto da solução na eficiência operacional, transparência, rastreabilidade e confiança entre stakeholders	4,2
Intenção de Adoção	Intenção futura de adoção	Probabilidade declarada de adoção da solução caso esta viesse a ser disponibilizada no contexto real	3,94

Para aprofundar a interpretação dos resultados, realizou-se uma análise exploratória por subgrupos, cruzando variáveis de perfil com as dimensões de perceção avaliadas. Em termos gerais, observou-se uma tendência para os participantes com perfil mais tecnológico atribuírem maior viabilidade técnica à implementação (ex.: integração, identidade digital e smart contracts), enquanto participantes mais próximos da operação marítimo-portuária evidenciaram maior sensibilidade a barreiras organizacionais e de governação (ex.: custos iniciais, alinhamento interorganizacional e adoção por múltiplos stakeholders).

Estes padrões não permitem inferir causalidade nem generalizar para o universo do setor, mas constituem indícios relevantes sobre onde poderão existir assimetrias de perceção entre grupos, reforçando a necessidade de estratégias diferenciadas de comunicação e adoção (ex.: casos de uso de impacto imediato para perfis operacionais e clarificação de requisitos de integração para perfis tecnológicos).

5.10. Barreiras à implementação da solução

Na sequência da realização do inquérito, os principais obstáculos à implementação da solução, identificados pelos diferentes inquiridos, estão associados a:

i. questões legais e regulamentares;
ii. dificuldades de integração com sistemas de informação existentes;
iii. partilha de dados comerciais sensíveis entre as várias entidades.

Os custos de implementação e a resistência à mudança organizacional surgem igualmente como fatores relevantes, embora assumam um papel secundário face às preocupações regulamentares e de interoperabilidade.

Estes resultados reforçam a importância de uma abordagem integrada, que envolva desde o início reguladores, autoridades portuárias e operadores, de modo a mitigar riscos e promover uma adoção mais eficaz da solução.

5.11. Limitações do estudo

Apesar da relevância dos resultados obtidos, importa reconhecer algumas limitações inerentes à investigação, que devem ser consideradas na sua interpretação.

A principal limitação prende-se com a dimensão da amostra, constituída por 17 participantes. Embora este número seja adequado no contexto de estudos exploratórios e de validação conceptual, a sua dimensão reflete a elevada especificidade do setor marítimo-portuário, no qual o universo de profissionais com conhecimento direto e aprofundado sobre os processos analisados é, por natureza, restrito.

Adicionalmente, o período temporal disponível para a realização do estudo condicionou a possibilidade de alargar o número de respostas, tendo em conta as exigências operacionais e a limitada disponibilidade dos profissionais envolvidos. Contudo, esta restrição temporal é comum em investigações académicas realizadas em contextos organizacionais altamente especializados.

Não obstante estas limitações, o perfil e a experiência dos participantes — maioritariamente profissionais com responsabilidades de gestão e elevada experiência no setor — conferem robustez conceptual aos resultados. Não obstante, os resultados devem ser interpretados como indicativos e exploratórios, não sendo passíveis de generalização estatística a toda a indústria.

Estas limitações reforçam a pertinência de investigações futuras, nomeadamente através da implementação de projetos-piloto ou provas de conceito em contextos reais, que permitam complementar a validação conceptual com evidência empírica adicional e envolver um conjunto mais alargado de stakeholders.

5.12. Conclusão do estudo

Em síntese, os resultados do estudo revelam uma perceção globalmente positiva relativamente à solução blockchain proposta, reconhecendo o seu potencial para melhorar a eficiência, a transparência e a confiança nas cadeias de abastecimento marítimas.

Contudo, os participantes sublinham de forma consistente a necessidade de um enquadramento legal claro, de um modelo de governação adequado, de interoperabilidade tecnológica e de uma validação progressiva através de projetos-piloto.

Em suma, a validação conceptual realizada permite recolher perceções preliminares sobre valor e barreiras à adoção, úteis para orientar decisões de design e governação do artefacto. Contudo, a transição destes indícios para evidência de impacto requer trabalho futuro, incluindo (i) prova de conceito técnica, (ii) piloto controlado com métricas operacionais (tempo documental, incidentes, retrabalho, disputas), e (iii) avaliação multi-stakeholder longitudinal para capturar efeitos de rede e dinâmica de cooperação interorganizacional.

Estes resultados validam o conceito do artefacto proposto e fornecem orientações relevantes para futuras etapas de investigação e implementação, particularmente no que respeita ao desenvolvimento de provas de conceito e iniciativas piloto em ambientes reais.

CAPÍTULO 6

Discussão

Neste capítulo discute-se os resultados da investigação à luz das questões de investigação definidas, articulando a evidência recolhida através do inquérito com os objetivos do estudo e com os principais contributos identificados na revisão da literatura. Importa salientar que a validação realizada é de natureza conceptual e exploratória, pelo que os resultados devem ser interpretados como perceções e indícios preliminares sobre valor, viabilidade e barreiras, e não como medição objetiva de impacto operacional em contexto real.

6.1. Potenciais benefícios da implementação da tecnologia blockchain

Os resultados obtidos sugerem uma perceção globalmente favorável por parte dos profissionais do setor relativamente ao potencial da tecnologia blockchain para melhorar a eficiência operacional, aumentar a transparência dos processos e reforçar a confiança entre entidades envolvidas no ecossistema marítimo-portuário. Esta leitura é consistente com a evidência apresentada na literatura, que posiciona a blockchain como uma tecnologia facilitadora da desmaterialização documental e da redução de assimetrias de informação em cadeias logísticas complexas.

De forma consistente, os inquiridos atribuem elevada relevância à digitalização da documentação tradicional em papel, à rastreabilidade integral da carga ao longo da cadeia de abastecimento e à partilha segura de informação entre entidades devidamente autorizadas. Estes benefícios encontram-se alinhados com a lógica funcional do artefacto conceptual proposto, em particular com os mecanismos de registo imutável, auditoria e controlo de acesso, discutidos na arquitetura apresentada anteriormente.

A perceção positiva relativamente à redução de erros e fraudes documentais reforça igualmente um argumento recorrente na literatura: a imutabilidade e a auditabilidade dos registos podem contribuir para fortalecer a integridade e a fiabilidade dos processos logísticos e documentais. Ainda assim, importa sublinhar que os dados recolhidos refletem valor percebido e expectativas de benefício, pelo que a quantificação destes ganhos exigiria uma fase posterior de prova de conceito e avaliação com métricas operacionais (ex.: tempos de emissão/validação documental, retrabalho, disputas e incidências).

Em síntese, os resultados fornecem indícios de que os benefícios da blockchain são reconhecidos e valorizados pelos stakeholders, mas a sua concretização dependerá de condições habilitadoras, nomeadamente interoperabilidade com sistemas existentes, alinhamento interorganizacional e enquadramento institucional e regulatório.

6.2. Principais desafios à implementação da tecnologia blockchain

Apesar do reconhecimento das vantagens associadas à blockchain, os resultados obtidos indicam a persistência de desafios relevantes que podem condicionar a implementação efetiva da solução proposta. Entre os principais entraves destacam-se as questões legais e regulamentares, em particular a inexistência de um enquadramento jurídico plenamente claro e harmonizado para o reconhecimento formal de determinados documentos digitais e, em alguns casos, para a operacionalização de mecanismos automatizados associados a smart contracts.

Este tipo de barreira assume particular relevância por funcionar como condição habilitadora: sem reconhecimento jurídico e institucional suficiente, as iniciativas tendem a permanecer em pilotos circunscritos, com limitações na sua escalabilidade para processos core do ecossistema portuário (ex.: libertação de carga, validação documental interorganizacional e procedimentos de conformidade).

A integração com os sistemas de informação existentes é igualmente identificada como um desafio crítico, refletindo a fragmentação tecnológica que caracteriza o setor. Os resultados reforçam a necessidade de evitar abordagens isoladas e sublinham a importância da interoperabilidade para reduzir duplicação de tarefas e fricção operacional. Importa, contudo, entender interoperabilidade não apenas como integração técnica (APIs e conectores), mas também como interoperabilidade organizacional: alinhamento de processos, semântica de dados, regras de partilha e responsabilização entre entidades. Sem este alinhamento, existe risco de a solução reproduzir ou até amplificar silos informacionais, em vez de os mitigar.

Adicionalmente, os inquiridos evidenciam preocupações relativas a custos iniciais de implementação, resistência organizacional à mudança e partilha de informação sensível entre entidades potencialmente concorrentes. Estes fatores remetem para um desafio clássico da adoção em ecossistemas multi-stakeholder: a tecnologia pode ser necessária, mas raramente é suficiente. A adoção depende de incentivos alinhados, confiança interorganizacional e de uma governação percebida como neutra e equilibrada.

Em síntese, os resultados apontam que os entraves mais determinantes tendem a ser institucionais e organizacionais, mais do que estritamente tecnológicos, o que é consistente com a evidência da literatura e com a experiência reportada em iniciativas anteriores no setor.

6.3. Fatores críticos para a implementação da solução

A análise integrada dos resultados permite identificar um conjunto de fatores críticos para uma implementação bem-sucedida da solução, evidenciados tanto nas respostas dos inquiridos como na intenção de adoção manifestada. Em primeiro lugar, destaca-se o envolvimento ativo das autoridades reguladoras desde as fases iniciais do projeto, considerado essencial para garantir legitimidade institucional, confiança no sistema e alinhamento com o enquadramento normativo. Esta tendência é consistente com a literatura que reconhece o papel das entidades reguladoras como catalisadoras da adoção de tecnologias emergentes em setores altamente regulados.

Outro elemento determinante prende-se com a definição de um modelo de governação claro, transparente e imparcial, com regras de acesso bem definidas, responsabilidades atribuídas de forma inequívoca e mecanismos de auditoria eficazes. A perceção de neutralidade da plataforma surge como condição fundamental para mitigar conflitos de interesse e promover adesão multi-stakeholder, sobretudo num contexto em que diferentes entidades partilham processos, mas nem sempre partilham objetivos ou incentivos.

A opção por uma implementação gradual, suportada por projetos-piloto com métricas de desempenho, surge igualmente como fator crítico. Esta abordagem permite reduzir risco percebido, criar evidência progressiva de benefício e ajustar o desenho do artefacto com base em aprendizagem em contexto controlado. Em paralelo, a interoperabilidade é referida como condição estruturante, tanto pela integração com sistemas existentes como pela necessidade de garantir continuidade operacional.

Por último, o compromisso estratégico das lideranças organizacionais, aliado a iniciativas de capacitação e gestão da mudança, é identificado como decisivo para a aceitação e adoção da solução. Em conjunto, estes fatores atuam como mecanismos de redução de incerteza (legal e organizacional), de mitigação de risco (partilha de dados e governação) e de diminuição de custos de transição (integração e mudança), aumentando a probabilidade de adesão sustentada.

6.4. Síntese da Discussão

A análise integrada das três questões de investigação evidencia convergência entre os resultados obtidos e as evidências apresentadas na revisão da literatura. Os benefícios percebidos (RQ1), os obstáculos reconhecidos (RQ2) e os fatores críticos para adoção futura (RQ3) refletem padrões amplamente discutidos em estudos internacionais sobre blockchain em cadeias de abastecimento marítimas, embora influenciados por especificidades institucionais e normativas locais.

De forma sintética, a análise permite concluir que:

- RQ1: os resultados sugerem indícios de valorização dos benefícios potenciais da blockchain, sobretudo ao nível da desmaterialização documental, rastreabilidade, transparência e confiança interorganizacional, reconhecidos como relevantes pelos stakeholders do setor;
- RQ2: os principais entraves à adoção tendem a assumir natureza legal, institucional e organizacional (enquadramento regulatório, governação, partilha de dados e mudança), complementados por desafios técnicos de interoperabilidade e integração com sistemas legados;
- RQ3: a aceitação e adoção futura dependem de fatores críticos como governação neutra e transparente, envolvimento regulatório, estratégia de implementação gradual com pilotos e métricas, interoperabilidade e compromisso das lideranças com capacitação e gestão da mudança.

Esta discussão integrada reforça a robustez conceptual do artefacto proposto e fornece uma base sólida para orientar etapas futuras de prototipagem e validação técnica, com recolha de evidência empírica adicional em ambientes reais, como consubstanciada na análise projetada da Tabela *8*.

Tabela 8: Alinhamento entre as questões de investigação, resultados do estudo e evidência teórica

Questão de Investigação (RQ)	Principais resultados do estudo	Evidência da revisão da literatura	Síntese da discussão
RQ 1: Quais os benefícios potenciais percebidos da adoção da tecnologia blockchain nas cadeias de abastecimento marítimas, em termos de eficiência operacional, transparência, rastreabilidade e reforço da confiança interorganizacional?	Os inquiridos atribuem elevada utilidade à solução proposta, destacando ganhos ao nível da eficiência operacional, transparência dos processos, rastreabilidade da carga, redução de erros documentais e reforço da confiança entre entidades.	A literatura identifica a blockchain como uma tecnologia facilitadora da desmaterialização documental, da rastreabilidade ponta-a-ponta e da criação de confiança em ecossistemas logísticos complexos.	Os resultados confirmam os benefícios teóricos identificados, validando conceptualmente a relevância da solução blockchain para o setor marítimo-portuário.
RQ2: Quais os principais obstáculos à adoção da tecnologia blockchain no contexto marítimo-portuário, incluindo barreiras legais/regulatórias, interoperabilidade com sistemas legados, custos de implementação, partilha de informação sensível e resistência organizacional à mudança?	As principais barreiras identificadas relacionam-se com o enquadramento legal e regulamentar, a integração com sistemas de informação existentes, a partilha de informação sensível, os custos de implementação e a resistência à mudança organizacional.	Estudos prévios apontam a ausência de enquadramento jurídico harmonizado, a interoperabilidade limitada e os desafios organizacionais como obstáculos recorrentes à adoção da blockchain.	Os resultados evidenciam que os principais entraves à adoção são de natureza institucional e organizacional, mais do que tecnológica, em linha com a evidência científica existente.
RQ3: Quais os fatores determinantes para a aceitação e adoção futura de soluções blockchain no setor marítimo, nomeadamente ao nível do modelo de governação, envolvimento regulatório, interoperabilidade, implementação gradual, capacitação e compromisso da liderança?	Os inquiridos destacam como fatores críticos o envolvimento das autoridades reguladoras, a definição de um modelo de governação claro e neutro, a realização de projetos-piloto, a interoperabilidade, a implementação gradual, a formação dos utilizadores e o compromisso da liderança.	A literatura enfatiza a importância da governação, do alinhamento institucional e da experimentação controlada como fatores críticos de sucesso em setores altamente regulados.	A adoção da blockchain depende de um conjunto integrado de fatores técnicos, organizacionais e institucionais, sendo a governação e o alinhamento entre stakeholders determinantes para o sucesso da solução.

CAPÍTULO 7

Conclusões e Investigações Futuras

Esta dissertação teve como objetivo analisar a adoção da tecnologia blockchain no contexto das cadeias de abastecimento marítimas, com especial enfoque nos desafios de rastreabilidade, interoperabilidade, confiança entre stakeholders e redução de ineficiências operacionais. Para tal, foi concebida uma solução baseada em blockchain permissionada, estruturada como um artefacto conceptual e avaliada através de validação junto de stakeholders do setor.

O principal contributo do trabalho traduz-se em dois resultados complementares:

i. Uma revisão sistemática estruturada que consolidou o estado da arte sobre blockchain aplicada a cadeias marítimas e logísticas, identificando tendências, barreiras e fatores críticos de sucesso; e
ii. Uma arquitetura conceptual e proposta de solução tecnológica, desenhada para responder aos requisitos do ecossistema marítimo-portuário.

7.1 Como os objetivos foram alcançados

Os objetivos definidos no início da dissertação foram atingidos através de uma abordagem metodológica estruturada (Design Science Research Methodology), combinando evidência da literatura, análise de casos reais e validação conceptual, como se pode observar na Tabela *9* infra.

Tabela 9: Tabela Cumprimento Objetivos

Objetivo	Cumprimento do Objetivo
Objetivo 1 — i.Analisar o estado da arte e o potencial da tecnologia blockchain nas cadeias de abastecimento marítimas	Este objetivo foi cumprido através de uma revisão sistemática da literatura, conduzida segundo o protocolo PRISMA, que permitiu identificar os principais contributos científicos e padrões recorrentes de implementação da tecnologia blockchain no setor marítimo. A análise evidenciou que, apesar do elevado potencial da blockchain para aumentar a transparência e a confiança entre os intervenientes, a sua adoção depende de fatores como modelos de governação adequados, alinhamento de incentivos entre stakeholders, interoperabilidade tecnológica e enquadramento regulatório claro.
Objetivo 2 — Identificar os principais desafios e requisitos associados à adoção da blockchain em cadeias de abastecimento marítimas;	O objetivo foi alcançado através da triangulação entre literatura científica, análise de casos e iniciativas internacionais relevantes e compreensão do contexto operacional do setor marítimo-portuário. Foram identificados como desafios centrais a fragmentação dos sistemas de informação, a multiplicidade de atores envolvidos, a dependência de documentação física, a resistência à mudança organizacional, os custos de implementação e as dificuldades de alinhamento institucional.
Objetivo 3 — Conceber uma solução tecnológica baseada em blockchain aplicada às cadeias de abastecimento marítimas	Este objetivo foi atingido através da conceção de uma arquitetura conceptual baseada numa blockchain permissionada, incorporando mecanismos adequados ao contexto marítimo, tais como controlo de permissões, registo imutável e auditável de eventos e rastreabilidade de ativos e fluxos de informação. A solução foi desenhada para responder às lacunas identificadas na literatura e apresentar potencial de escalabilidade num ambiente de consórcio envolvendo múltiplos stakeholders.
Objetivo 4 — Validar conceptualmente a solução proposta junto de profissionais do setor marítimo	O objetivo foi cumprido através de uma validação conceptual baseada na aplicação de um questionário estruturado a um conjunto de stakeholders com experiência no setor marítimo-logístico. A análise quantitativa, recorrendo a escalas de Likert, e a análise qualitativa das respostas abertas permitiram avaliar a utilidade percebida, a viabilidade de adoção e a relevância da solução proposta, bem como recolher contributos e recomendações para uma eventual implementação futura.

7.2 Resposta às Research Questions (RQs)

As Questões de Investigação (Research Questions – "RQ") foram definidas com o objetivo de estruturar a análise da adoção da tecnologia blockchain no setor marítimo, alinhando os objetivos da investigação com a evidência científica e com as preocupações práticas identificadas junto dos stakeholders do setor. A sua formulação resulta de uma revisão sistemática da literatura, da análise do contexto marítimo-portuário e da validação conceptual realizada no âmbito deste estudo, conforme se pode observar na Tabela *10*.

Tabela 10: Resposta Research Questions

Research Question	Resposta à Research Question
RQ 1: Quais os benefícios potenciais percebidos da adoção da tecnologia blockchain nas cadeias de abastecimento marítimas, em termos de eficiência operacional, transparência, rastreabilidade e reforço da confiança interorganizacional?	A RQ1 foi respondida principalmente através da revisão sistemática e complementada com a validação conceptual realizada com stakeholders. Os resultados indicam que a adoção é condicionada por um conjunto de fatores interdependentes: i) Técnicos: interoperabilidade com sistemas existentes, maturidade tecnológica, qualidade e padronização dos dados, cibersegurança e escalabilidade; ii) Organizacionais: resistência à mudança, custos de implementação, disponibilidade de competências digitais, alinhamento entre parceiros e modelos de cooperação; iv) Regulatórios e ambientais: compliance, proteção de dados, requisitos legais de auditoria e necessidade de modelos claros de responsabilidade e governação. Assim, conclui-se que a adoção de blockchain no setor marítimo depende menos de fatores puramente tecnológicos e mais da capacidade de estruturar redes colaborativas com governação e incentivos claros.
RQ2: Quais os principais obstáculos à adoção da tecnologia blockchain no contexto marítimo-portuário, incluindo barreiras legais/regulatórias, interoperabilidade com sistemas legados, custos de implementação, partilha de informação sensível e resistência organizacional à mudança?	A RQ2 foi respondida através da análise crítica de casos reais e reforçada pela evidência recolhida junto dos participantes do questionário. Verificou-se que o sucesso de uma solução blockchain em cadeias marítimas depende de: i) definição de regras claras sobre quem participa, quem valida, quem tem acesso e quem pode registar eventos; ii) existência de mecanismos de governação que garantam neutralidade e evitem concentração de poder; iii) criação de incentivos adequados à participação dos stakeholders críticos (ex.: autoridades, armadores, terminais, transitários, operadores logísticos). A análise sugere que a blockchain, por si só, não resolve a falta de colaboração: exige um modelo de consórcio bem definido, com governança transparente, sendo este um fator decisivo para adoção e escalabilidade.
RQ3: Quais os fatores determinantes para a aceitação e adoção futura de soluções blockchain no setor marítimo, nomeadamente ao nível do modelo de governação, envolvimento regulatório, interoperabilidade, implementação gradual, capacitação e compromisso da liderança?	A RQ3 foi abordada a partir da literatura, complementada pela discussão da arquitetura proposta e das perceções recolhidas junto de stakeholders. Conclui-se que a blockchain maximiza o seu valor quando integrada com tecnologias que geram dados operacionais e suportam tomada de decisão, nomeadamente: i) IoT, para recolha de eventos e condições físicas (ex.: localização, temperatura, abertura de contentores), reforçando rastreabilidade e automação; ii) Inteligência Artificial, para deteção de anomalias, previsão de atrasos, otimização de recursos e identificação de padrões de risco. Desta forma, a blockchain desempenha um papel estruturante como camada de confiança e auditabilidade, enquanto IA e IoT aumentam o valor funcional ao nível da automação e inteligência operacional.

7.4 Conclusão final

Em termos globais, esta dissertação demonstrou que a blockchain tem potencial para gerar ganhos relevantes no setor marítimo, particularmente na rastreabilidade, transparência e confiança entre organizações, mas o seu sucesso depende de fatores não técnicos, como governação, adesão dos stakeholders e integração com ecossistemas digitais existentes.

A proposta desenvolvida constitui um contributo aplicável e alinhado com desafios reais do setor, validado de forma conceptual por profissionais do domínio. Como continuidade, recomenda-se a evolução do trabalho para uma fase de prototipagem e validação técnica (PoC), com integração em sistemas reais, permitindo medir impacto operacional através de indicadores objetivos de desempenho e adoção.

7.4 Limitações e trabalho futuro

Importa reconhecer que a validação realizada teve caráter conceptual e exploratório, suportada por uma amostra limitada. Embora adequada a uma fase inicial de Design Science, recomenda-se, em trabalho futuro, a realização de validações adicionais com amostras maiores, testes em ambiente piloto e avaliação quantitativa de métricas operacionais (tempo de processamento documental, número de inconformidades, custos administrativos, incidência de erros e rastreabilidade ponta-a-ponta).

Referências Bibliográficas

[1] Tonacio Paulo, "Blockchain and its Application Possibilities in Maritime Trade," *International Journal of Entrepreneurship*, vol. 28, no. 4, Jul. 2024.

[2] By Associate Editor, "Blockchain For Shipping: Improving Transparency In Global Trade," Blockchain For Shipping: Improving Transparency In Global Trade.

[3] P. Guan, L. C. Wood, J. X. Wang, and L. N. K. Duong, "Blockchain adoption in the port industry: a systematic literature review," 2024, *Cogent OA*. doi: 10.1080/23311975.2024.2431650.

[4] J. Louppova, "Blockchain for secure, efficient release of containers in the port," Blockchain for secure, efficient release of containers in the port.

[5] E. Irannezhad, "The Architectural Design Requirements of a Blockchain-Based Port Community System," *Logistics*, vol. 4, no. 4, Dec. 2020, doi: 10.3390/logistics4040030.

[6] "The closure of TradeLens: when technology is not enough," Why Maersk and IBM's blockchain platform TradeLens is closing down.

[7] M. Loritz, "Portuguese bluetech startup Bitcliq raises €600k to deploy its blockchain-based fish marketplace globally," EU-Startups.

[8] G. Leite, *Blockchain in Supply Chain: Revolutionizing Transparency and Efficiency*. 2025.

[9] M. Ben Farah *et al.*, "A survey on blockchain technology in the maritime industry: Challenges and future perspectives," *Future Generation Computer Systems*, vol. 157, pp. 618–637, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.future.2024.03.046.

[10] By Ledger Insights, "Shipping network GSBN responds to TradeLens blockchain shutdown," Ledger Insights.

[11] K. Peffers, T. Tuunanen, M. A. Rothenberger, and S. Chatterjee, "A Design Science Research Methodology for Information Systems Research," *Journal of Management Information Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 45–77, Dec. 2007, doi: 10.2753/MIS0742-1222240302.

[12] J. Liu, H. Zhang, and L. Zhen, "Blockchain technology in maritime supply chains: applications, architecture and challenges," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 2021, pp. 1–18, May 2021, doi: 10.1080/00207543.2021.1930239.

[13] S. Pu and J. S. L. Lam, "Blockchain adoptions in the maritime industry: a conceptual framework," *Maritime Policy & Management*, vol. 48, no. 6, pp. 777–794, Aug. 2021, doi: 10.1080/03088839.2020.1825855.

[14] H.-F. Lin, "Examining the determinants of blockchain technology-enabled maritime supply chain system adoption intention: Does market turbulence play a moderating role?," *Mar. Policy*, vol. 174, 2025, doi: 10.1016/j.marpol.2025.106616.

[15] H. Ju, Q. Zeng, X. Chu, and Y. Li, "Cooperative investment strategies of ports and shipping companies in blockchain technology," *Operational Research*, vol. 24, no. 2, 2024, doi: 10.1007/s12351-024-00839-4.

[16] P. Guan, L. C. Wood, J. X. Wang, and L. N. K. Duong, "Barriers to blockchain adoption in the seaport industry: A fuzzy DEMATEL analysis," *Mathematical Biosciences and Engineering*, vol. 20, no. 12, pp. 20995–21031, 2023, doi: 10.3934/mbe.2023929.

[17] H.-F. Lin, "Blockchain adoption in the maritime industry: empirical evidence from the technological-organizational-environmental framework," *Maritime Policy and Management*, vol. 51, no. 7, pp. 1474–1496, 2024, doi: 10.1080/03088839.2023.2175063.

[18] N. Adil, E.-C. Hamid, and O. Fatima, "Applications of Blockchain Technology in International Trade and Supply Chain Management: A Systematic Literature Review," in *Proceeding of the 7th International Conference on Logistics Operations Management, GOL'24*, Y. Benadada, F.-Z. Mhada, J. Boukachour, F. Ouzayd, and A. El Hilali Alaoui, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 305–315.

[19] Z. Sun, B. Shi, and J. Liu, “Pricing, emission reduction and coordination for maritime supply chain with risk-averse members in the blockchain era,” *Environ. Dev. Sustain.*, 2025, doi: 10.1007/s10668-025-06195-3.

[20] S. Nguyen, P. S.-L. Chen, and Y. Du, “Blockchain adoption in container shipping: An empirical study on barriers, approaches, and recommendations,” *Mar. Policy*, vol. 155, 2023, doi: 10.1016/j.marpol.2023.105724.

[21] J. Schnelle, M. Schröder, and W. Kersten, “Framework for the Adoption of Blockchain in Maritime Cold Chains,” in *Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics*, W. Kersten, C. Jahn, T. Blecker, and C. M. Ringle, Eds., Institute of Business Logistics and General Management, Hamburg University of Technology, 2022, pp. 121–148. [Online]. Available: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85178551471&partnerID=40&md5=427a42d0100c51965621b169d3abcc67

[22] R. Velastegui, R. Poler, and M. D. Madroñero, “Blockchain. A Technology that Transforms the Supply Chain and Logistics,” in *Lecture Notes in Networks and Systems*, M. V Garcia, C. Gordón-Gallegos, A. Salazar-Ramírez, and C. Nuñez, Eds., Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2024, pp. 888–898. doi: 10.1007/978-3-031-70981-4_56.

[23] K. Peffers, T. Tuunanen, M. A. Rothenberger, and S. Chatterjee, “A Design Science Research Methodology for Information Systems Research,” *Journal of Management Information Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 45–77, Dec. 2007, doi: 10.2753/MIS0742-1222240302.

[24] F. K. Elmay, K. Salah, I. Yaqoob, R. Jayaraman, A. Battah, and Y. Maleh, “Blockchain-Based Traceability for Shipping Containers in Unimodal and Multimodal Logistics,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 133539–133556, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3231689.

[25] T. Chen and C. Guestrin, “XGBoost,” in *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, New York, NY, USA: ACM, Aug. 2016, pp. 785–794. doi: 10.1145/2939672.2939785.

[26] B. Alkhaldi and A. Al-Omary, “Supply-Blockchain Functional Prototype for Optimizing Port Operations Using Hyperledger Fabric,” *Blockchains*, vol. 2, no. 3, pp. 217–233, Jul. 2024, doi: 10.3390/blockchains2030011.

[27] N. Gao *et al.*, “Modeling and analysis of port supply chain system based on Fabric blockchain,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 172, 2022, doi: 10.1016/j.cie.2022.108527.

[28] M. M. Zulkarnain, N. Ramli, and A. N. Nordin, “Performance Benchmarking of Hyperledger Fabric on Heterogeneous Hardware for IoT Applications,” *IIUM Engineering Journal*, vol. 26, no. 3, pp. 156–170, Sep. 2025, doi: 10.31436/iiumej.v26i3.3610.

[29] C. Melo, G. Gonçalves, F. A. Silva, and A. Soares, “A Comprehensive Hyperledger Fabric Performance Evaluation based on Resources Capacity Planning,” Feb. 2025, doi: 10.1007/s10586-024-04591-4.

[30] N. Zacharia, N. D. Kimario, O. O. Mwambe, and I. G. Tende, “Hyperledger Fabric Blockchain-Based Approach towards Secured Port Weighbridge Systems,” *Journal of Computer and Communications*, vol. 13, no. 05, pp. 46–65, May 2025, doi: 10.4236/jcc.2025.135004.

[31] E. Benson and L. Judd, “Ships Don’t Lie: Blockchain and a Secure Future for Global Shipping,” *Center for Strategic and International Studies*, Dec. 2021.

[32] M. Rakhra, R. Nagpal, P. Singh, P. K. Angra, G. S. Cheema, and A. Kumar, “Blockchain Technology’s Potential in Supply Chain management,” in *2024 International Conference on Electrical, Electronics and Computing Technologies, ICEECT 2024*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024. doi: 10.1109/ICEECT61758.2024.10739315.

[33] J. Li, D. Han, T.-H. Weng, H. Wu, K.-C. Li, and A. Castiglione, “A secure data storage and sharing scheme for port supply chain based on blockchain and dynamic searchable encryption,” *Comput. Stand. Interfaces*, vol. 91, 2025, doi: 10.1016/j.csi.2024.103887.

[34] H. Liu and D. Han, “Non-interactive Zero Knowledge Proof Based Access Control in Information-Centric Internet of Things,” in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2022, pp. 617–631. doi: 10.1007/978-3-030-95388-1_41.

[35] G. Bavassano, C. Ferrari, and A. Tei, “Blockchain: How shipping industry is dealing with the ultimate technological leap,” *Research in Transportation Business & Management*, vol. 34, p. 100428, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100428.

[36] P. Elias, “Portos crescem 6% com 88 milhões de toneladas de mercadorias movimentadas em 2024,” *Jornal de Negócios*, Mar. 2025.

[37] “Hyperledger Fabric Docs, "Private data,” https://hyperledger-fabric.readthedocs.io/en/latest/private-data/private-data.html.

[38] “Hyperledger Fabric Docs, ‘Channels,’” https://hyperledger-fabric.readthedocs.io/en/latest/channels.html.

[39] F. D. Davis, R. P. Bagozzi, and P. R. Warshaw, “User Acceptance of Computer Technology: A Comparison of Two Theoretical Models,” *Manage. Sci.*, vol. 35, no. 8, pp. 982–1003, Aug. 1989, doi: 10.1287/mnsc.35.8.982.

[40] V. Venkatesh, M. G. Morris, G. B. Davis, and F. D. Davis, “User Acceptance of Information Technology: Toward A Unified View1,” *MIS Quarterly*, vol. 27, no. 3, pp. 425–478, Sep. 2003, doi: 10.2307/30036540.

[41] T. Oliveira and M. F. Martins, “Understanding e-business adoption across industries in European countries,” *Industrial Management & Data Systems*, vol. 110, no. 9, pp. 1337–1354, Sep. 2010, doi: 10.1108/02635571011087428.

[42] F. D. Davis, “Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology,” *MIS Quarterly*, vol. 13, no. 3, pp. 319–340, Sep. 1989, doi: 10.2307/249008.

ANEXO A

Inquérito

No âmbito da validação conceptual da solução proposta, foi desenvolvido um instrumento de recolha de dados sob a forma de questionário estruturado, dirigido a profissionais com experiência no setor marítimo-logístico e portuário. A utilização deste instrumento enquadra-se na abordagem metodológica adotada — (DSRM) — permitindo avaliar o artefacto desenvolvido numa perspetiva perceptual, com base na análise das perceções e expectativas dos potenciais utilizadores e stakeholders da solução.

O questionário foi concebido com o objetivo de recolher informação relevante sobre a utilidade percebida, viabilidade de adoção, impacto esperado e principais barreiras associadas à implementação de uma plataforma digital baseada em tecnologia blockchain nas cadeias de abastecimento marítimas. Adicionalmente, procurou-se captar contributos qualitativos que permitissem enriquecer a interpretação dos resultados e identificar fatores contextuais relevantes para a implementação futura da solução.

Do ponto de vista operacional, o inquérito foi disponibilizado em formato digital, recorrendo à plataforma Google Forms, o que permitiu facilitar a sua disseminação junto de profissionais do setor, assegurar a anonimização das respostas e simplificar o processo de recolha e tratamento dos dados. A opção por este meio teve igualmente como objetivo maximizar a taxa de resposta, tendo em conta a dispersão geográfica e as limitações de disponibilidade dos participantes.

A seleção dos participantes foi efetuada através de pesquisa direcionada na rede social profissional LinkedIn, permitindo identificar e contactar perfis com experiência relevante no domínio marítimo-logístico. Esta abordagem possibilitou alcançar um conjunto diversificado de stakeholders, incluindo profissionais de autoridades portuárias, operadores logísticos, transitários, transportadoras marítimas, agentes de navegação e entidades reguladoras. A utilização do LinkedIn revelou-se particularmente adequada para este contexto, na medida em que permitiu uma segmentação eficaz dos participantes com base na sua experiência profissional e área de atuação, garantindo a pertinência e qualidade das respostas obtidas, ainda que com limitações ao nível da generalização estatística dos resultados.

O inquérito assume, assim, um papel central na validação conceptual do artefacto, permitindo aferir o grau de alinhamento da solução proposta com as necessidades reais do setor, bem como identificar condições críticas para a sua adoção futura. Os resultados obtidos constituem uma base empírica para sustentar a análise apresentada no Capítulo 5, contribuindo para a avaliação da relevância, utilidade e potencial de aceitação da solução desenvolvida.

Estrutura do Inquérito:

Secção A – Perfil do Respondente

A1. Tipo de organização
( ) Autoridade portuária
( ) Operador logístico / Transitário
( ) Transportadora marítima / Agente de navegação
( ) Autoridade aduaneira / Regulador
( ) Outro: _____

A2. Função desempenhada
( ) Operacional
( ) Gestão intermédia
( ) Direção / Estratégia

A3. Anos de experiência no setor marítimo/logístico
( ) < 5 ( ) 5–10 ( ) 11–20 ( ) > 20

Secção B – Digitalização Atual

B1. Grau de digitalização dos processos na sua organização
(1) Muito baixo (2) Baixo (3) Médio (4) Elevado (5) Muito elevado

B2. Grau de partilha digital de informação com outras entidades
(1) Muito baixo (2) Baixo (3) Médio (4) Elevado (5) Muito elevado

Secção C – Perceção sobre Blockchain

C1. Nível de conhecimento prévio sobre blockchain
(1) Nenhum (2) Básico (3) Razoável (4) Bom (5) Muito bom

C2. Grau de concordância com as afirmações seguintes:
(1 – Discordo totalmente | 5 – Concordo totalmente)

- C2.1 A blockchain pode facilitar a partilha de informação entre entidades.
- C2.2 A blockchain pode aumentar a confiança entre parceiros da cadeia logística.
- C2.3 A blockchain pode ajudar a reduzir erros e fraudes documentais.

Secção D – Avaliação da Solução Proposta

(Plataforma digital partilhada, acessível apenas a entidades autorizadas)

D1. Utilidade percebida da solução para:
(1 – Nada útil | 5 – Muito útil)

- D1.1 Rastrear contentores ao longo da cadeia logística
- D1.2 Digitalizar e substituir documentos em papel
- D1.3 Partilhar informação de forma segura
- D1.4 Melhorar a eficiência das operações

D2. Adequação geral da solução ao setor marítimo
(1) Nada adequada (2) Pouco adequada (3) Adequada (4) Muito adequada (5) Totalmente adequada

Secção E – Impacto Esperado

E1. Impacto esperado da solução em:
(1 – Impacto muito baixo | 5 – Impacto muito elevado)

- E1.1 Eficiência operacional
- E1.2 Transparência dos processos
- E1.3 Redução de erros e fraudes
- E1.4 Segurança da informação
- E1.5 Confiança entre entidades

Secção F – Barreiras à Adoção

F1. Importância dos seguintes desafios:
(1 – Nada importante | 5 – Muito importante)

- F1.1 Custos de implementação
- F1.2 Integração com sistemas existentes
- F1.3 Resistência à mudança
- F1.4 Questões legais e regulamentares
- F1.5 Partilha de informação sensível

Secção G – Intenção de Adoção

G1. Probabilidade de a sua organização considerar a adoção de uma solução deste tipo no futuro
(1) Muito improvável (2) Improvável (3) Possível (4) Provável (5) Muito provável

G2. Principal condição para avançar com a adoção
(Resposta aberta – uma condição principal)