



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Maria da Conceição Silva Dias

**DIGITAL TWIN FOR MARINE POLLUTION  
CONTROL**

Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Informática,  
especialização em Sistemas de informação, orientada pelos Professores  
Doutores João Nuno Lopes Barata e Licínio Gomes Roque e apresentada ao  
Departamento de Engenharia Informática da Faculdade de Ciências e  
Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Janeiro de 2024





FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE D  
**COIMBRA**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA INFORMÁTICA

Maria da Conceição Silva Dias

# Digital Twin for Marine Pollution Control

Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Informática, especialização em Sistemas de Informação, orientada pelos Professores Doutores João Nuno Lopes Barata e Licínio Gomes Roque e apresentada ao Departamento de Engenharia Informática da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Janeiro de 2024





## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à minha família por acreditarem sempre em mim e me apoiarem ao longo do meu percurso académico.

Gostaria de agradecer ao Pedro pela paciência, apoio incondicional e ajuda ao longo de todo este percurso. Por ser a pessoa mais querida que eu conheço e o meu melhor amigo.

Gostaria também de agradecer aos meus orientadores, o professor João Barata e o professor Licínio Roque por me terem apoiado e guiado durante o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, gostaria de agradecer aos meus amigos, por acreditarem em mim e me terem acompanhado ao longo destes últimos anos.



## **Abstract**

Spills of hydrocarbons or other dangerous substances can have disastrous consequences for the environment and biodiversity, so it is crucial for the marine ecosystem that pollution response plans are scrupulously adhered to. It is therefore necessary to invest in the training of all those involved in maritime pollution control, so that pollutants can be collected and contained as quickly and effectively as possible.

This master's thesis presents a Digital Twin prototype, capable of assisting maritime pollution control and predicting the evolution of a spill, based on the MOHID - Water Modelling System mathematical model. The integration of this model enables the planning and evaluation of spill containment strategies.

The results obtained through a Design Science Research (DSR) approach include the creation of an Application Programming Interface (API) that integrates and manages the MOHID mathematical model, the architecture and the instantiation of the Digital Twin prototype for evaluation as part of the international Marine Pollution Control Simulator (MPCS) project. The evaluation of the prototype developed demonstrated its relevance to the project's needs.

This work introduces contributions to the preparation of response teams in the event of a marine spill and aims to help define containment strategies. It also presents an example of how Digital Twins can be adopted in training and education environments, providing a valuable contribution to the continued advancement of this area.

## **Keywords**

Digital Twin, Emergency Response, Marine Pollution, MOHID, Performance Evaluation



## Resumo

Os derrames de hidrocarbonetos ou outras substâncias perigosas podem ter consequências desastrosas no meio ambiente e na biodiversidade, pelo que é crucial para o ecossistema marinho que os planos de combate à poluição sejam escrupulosamente cumpridos. Por conseguinte, é necessário apostar na formação e treino de todos os intervenientes no controlo da poluição marítima, para que a recolha e contenção dos poluentes seja efetuada o mais rapidamente possível e de forma eficaz.

Esta dissertação de mestrado apresenta um protótipo de Digital Twin, capaz de auxiliar o controlo de poluição marítima e prever a evolução de um derrame, tendo por base o modelo matemático MOHID - Water Modelling System. A integração deste modelo permite o planeamento e avaliação de estratégias de contenção do derrame.

Os resultados obtidos através de uma abordagem de DSR incluem a criação de uma API que integra e gere o modelo matemático MOHID, a arquitetura e a instanciação do protótipo de Digital Twin para avaliação no âmbito do projeto internacional MPCs. A avaliação do protótipo desenvolvido demonstrou a sua relevância face às necessidades do projeto.

Este trabalho introduz contribuições para a preparação das equipas de resposta perante a ocorrência de um derrame marítimo e pretende auxiliar na definição de estratégias de contenção. Apresenta também um exemplo de como Digital Twins podem ser adotados em ambientes de treino e formação, proporcionando uma valiosa contribuição para o avanço contínuo desta área.

## Palavras-Chave

Digital Twin, Resposta de Emergência, Poluição Marítima, MOHID, Avaliação de Desempenho



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Enquadramento . . . . .	1
1.2	Objetivos . . . . .	3
1.3	Estrutura do documento . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Revisão de Literatura</b>	<b>5</b>
2.1	Digital Twin . . . . .	5
2.1.1	Contexto histórico . . . . .	5
2.1.2	Definição de Digital Twin . . . . .	6
2.1.3	Classificação de Digital Twin . . . . .	7
2.1.4	Digital Twin vs simulação . . . . .	8
2.1.5	Etapas de concepção de um Digital Twin . . . . .	9
2.2	Digital Twin em contexto marítimo . . . . .	9
2.3	Avaliação de desempenho e simuladores em contexto marítimo . .	10
2.4	Modelos de derrame de petróleo . . . . .	12
2.5	Síntese dos temas abordados . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>15</b>
3.1	Metodologia . . . . .	15
3.2	Plano de trabalho . . . . .	18
3.2.1	Investigação . . . . .	18
3.2.2	Implementação . . . . .	19
3.3	Análise de riscos . . . . .	20
3.4	Ferramentas . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Especificação</b>	<b>25</b>
4.1	Arquitetura . . . . .	25
4.1.1	Arquitetura geral . . . . .	25
4.1.2	Arquitetura do Digital Twin . . . . .	28
4.2	Requisitos . . . . .	29
4.2.1	Requisitos funcionais . . . . .	30
4.2.2	Requisitos não funcionais . . . . .	31
<b>5</b>	<b>Implementação</b>	<b>33</b>
5.1	Exploração do modelo numérico . . . . .	33
5.2	Modelo entidade relacionamento . . . . .	39
5.3	Componentes do Digital Twin . . . . .	40
5.3.1	REST API para interação com o MOHID . . . . .	41
5.3.2	Componente do Digital Twin na aplicação Spring Boot . . .	47

5.4	Monitorização do exercício de combate à poluição . . . . .	48
<b>6</b>	<b>Testes e Avaliação</b>	<b>51</b>
6.1	Configuração do ambiente de testes . . . . .	51
6.1.1	Configuração da simulação . . . . .	52
6.1.2	Atualização do estado atual do derrame na base de dados . . . . .	54
6.2	Avaliação do protótipo . . . . .	55
6.2.1	Teste de adequabilidade do modelo matemático . . . . .	56
6.2.2	Demonstração das funcionalidades aos especialistas do domínio . . . . .	56
6.3	<i>Design principles</i> . . . . .	57
6.4	Oportunidades de melhoria . . . . .	58
<b>7</b>	<b>Conclusão</b>	<b>61</b>
	<b>Apêndice A Plano de trabalho</b>	<b>71</b>
	<b>Apêndice B Modelo ER</b>	<b>77</b>
	<b>Apêndice C Extração métricas necessárias ao Digital Twin</b>	<b>79</b>
	<b>Apêndice D Dados de teste de adequabilidade do modelo matemático</b>	<b>81</b>



# Acrónimos

**AIS** Association for Information systems.

**API** Application Programming Interface.

**BD** Base de Dados.

**DSR** Design Science Research.

**DT** Digital Twin.

**DTE** Digital Twin Environment.

**DTI** Digital Twin Instance.

**DTP** Digital Twin Prototype.

**ER** Entidade Relacionamento.

**GNOME** General NOAA Operational Modeling Environment.

**IoT** Internet of Things.

**ISD** International Conference on Information Systems Development.

**MARETEC** Marine and Environmental Technology Research Center.

**MPCS** Marine Pollution Control Simulator.

**MSP** Maritime Spatial Planning.

**NASA** National Aeronautics and Space Administration.

**NOAA** National Oceanic and Atmospheric Administration.

**PISCES II** Potential Incident Simulation, Control and Evaluation System.

**SIMREC** Simulators for improving Cross-Border Oil Spill Response in Extreme Conditions.



# Lista de Figuras

2.1	Modelo sugerido por Michael Grieves (M. W. Grieves, 2005) . . . . .	6
2.2	Subcategorias de Digital Twin (Singh et al., 2021) . . . . .	8
3.1	Processo DSR adaptado de (Peffer et al., 2007) . . . . .	17
3.2	Matriz de riscos . . . . .	20
4.1	Arquitetura geral do projeto . . . . .	27
4.2	Arquitetura do Digital Twin . . . . .	29
5.1	Diretoria Geral de uma simulação do modelo MOHID . . . . .	34
5.2	Conteúdo da diretoria <i>data</i> . . . . .	35
5.3	Exemplo de ficheiros gerados após a execução do simulador . . . . .	36
5.4	Exemplo de ficheiros gerados na diretoria <i>Run1</i> após a execução do simulador . . . . .	36
5.5	Conteúdo do ficheiro <i>OilBeachingStats_1.dat</i> . . . . .	37
5.6	Evolução do derrame de hidrocarbonetos . . . . .	37
5.7	Modelo Entidade Relacionamento . . . . .	39
5.8	Excerto do ficheiro <i>data.csv</i> gerado através do endpoint <code>"/api/start/"</code> . . . . .	42
5.9	Imagem aérea obtida através do <i>endpoint</i> <code>"/api/download/image"</code> . . . . .	45
5.10	Relatório atmosférico . . . . .	46
5.11	Dashboard com indicadores referentes ao estado atual da simulação . . . . .	48
5.12	Relatório do desempenho global dos participantes . . . . .	49
A.1	Diagrama de Gantt previsto para a fase de investigação . . . . .	72
A.2	Diagrama de Gantt realizado na fase de investigação . . . . .	73
A.3	Diagrama de Gantt previsto para a fase de implementação . . . . .	74
A.4	Diagrama de Gantt realizado na fase de implementação . . . . .	75
B.1	Modelo de dados . . . . .	78



# Lista de Tabelas

3.1	Grelha DSR para o desenvolvimento do Digital Twin para controlo de poluição marítima . . . . .	16
4.1	Requisitos funcionais do Digital Twin . . . . .	30
4.2	Requisitos não funcionais do Digital Twin . . . . .	31
4.3	Restrições do Digital Twin . . . . .	32
6.1	Tempo de execução do modelo . . . . .	53
6.2	Impacto do passo temporal nos resultados . . . . .	54
6.3	Tempos de execução de um pedido à API e colocação de um recuperador . . . . .	55



# Capítulo 1

## Introdução

O presente documento apresenta o trabalho desenvolvido no âmbito da unidade curricular Dissertação/Estágio do mestrado em Engenharia Informática, especialização em Sistemas de Informação, do Departamento de Engenharia Informática da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Um Digital Twin (DT) pode ser definido como uma representação digital de um objeto, processo, sistema ou organização (Gartner, 2018). Através da conexão entre o Digital Twin e a sua representação real é possível obter vantagens como, redução de custos, apoio à tomada de decisão, otimização de processos e melhoria de desempenho (Gartner, 2017). Apesar da ideia de DT não ser nova (Gartner, 2018), estima-se que num futuro próximo se faça uso desta tecnologia numa grande variedade de setores distintos com vista à redução de custos e otimização de desempenho (Gartner, 2017).

Num contexto de controlo de poluição marítima, um DT pode ser usado para analisar e simular diferentes cenários, de forma a tornar os processos mais eficientes, sustentáveis e económicos. Contudo, o uso de Digital Twins neste contexto está ainda num estágio inicial pelo que é necessária uma análise dos potenciais benefícios e desafios associados ao uso desta tecnologia.

Neste sentido, surge o estudo, planeamento e desenvolvimento de um protótipo de Digital Twin para preparação do combate à poluição marítima.

O presente capítulo está subdividido em três secções. Na secção 1.1 é feita a apresentação do projeto europeu em que se enquadra este trabalho, na secção 1.2 são enunciados os objetivos e por fim, na última secção é descrita a estrutura do documento.

### 1.1 Enquadramento

Atualmente, a poluição marítima constitui uma ameaça para a sustentabilidade do nosso planeta (Galloway, 2006). Desta forma, é de extrema importância apostar em medidas de combate à poluição marítima que nos permitam alcançar um oceano mais limpo para as gerações futuras (Bellou et al., 2021). Existem

diversas formas de poluição marítima, tais como poluição química, luminosa, sonora e por plástico (National Geographic, 2022). Algumas destas formas de poluição podem manifestar-se de forma accidental, como é o caso da poluição por derrame de produtos químicos.

Os derrames de hidrocarbonetos ou outras substâncias químicas podem ter diferentes consequências consoante a origem, tipo de substância e quantidade derramada. Por exemplo, se for derramado algum combustível ao abastecer um barco, ainda que afete o meio ambiente, o impacto é reduzido. Contudo, se ocorrer um grande derrame as consequências para o meio ambiente e para a biodiversidade marinha podem ser desastrosas e continuar a fazer-se sentir anos mais tarde (NOAA, 2020). As propriedades do crude são prejudiciais para a biodiversidade marinha e podem levar à morte de diversos animais como mamíferos e aves. Noutros animais poderá afetar o sistema imunitário e prejudicar as capacidades de reprodução. Ao ocorrer dissolução dos hidrocarbonetos, peixes e outras espécies como moluscos são também afetadas e caso a contaminação não seja letal, estas espécies tornam-se impróprias para consumo humano (UNEP, 2021).

Caso se verifique a ocorrência de um derrame, é crucial que exista uma resposta rápida e recolha dos componentes de modo a minimizar as consequências no meio ambiente e na vida marinha. Em primeiro lugar, é necessário recolher amostras e avaliar a extensão do derrame de forma a compreender a gravidade da situação. De seguida, é necessária a mobilização de diversas entidades e meios de combate de forma a recolher a maior quantidade de hidrocarbonetos possível. Toda esta mobilização e coordenação de diversas entidades deve ser feita com vista a minimizar o impacto ambiental, o tempo de resposta e o impacto financeiro.

Para que as consequências de um derrame sejam minimizadas é fundamental que todos os intervenientes conheçam os planos de intervenção e tenham a formação adequada. De igual forma, a realização de exercícios periódicos, fazendo uso dos mecanismos e meios previstos nos planos de intervenção, permite que todos os intervenientes conheçam os procedimentos associados ao papel que desempenham. Devido à extensão e custo naturalmente associado a este tipo de exercícios, é natural que não seja possível a sua realização de forma frequente.

Neste sentido, surge o projeto Marine Pollution Control Simulator (MPCS) (ECHO, 2022; Qualiseg, 2022), com participação da Universidade de Coimbra, visando criar uma ferramenta de aprendizagem e simulação que permite o desenvolvimento das competências das equipas de resposta à ocorrência de um derrame, baseando-se para o efeito, numa metodologia de simulação de eventos discretos. O seu principal objetivo parte por providenciar uma ferramenta que possibilite a preparação destas equipas no sentido de fornecer uma resposta rápida e eficaz perante a ameaça ou ocorrência de um derrame de hidrocarbonetos ou outras substâncias poluentes perigosas, de forma a minimizar o impacto no meio ambiente, na economia e nas localidades próximas do local de derrame.

Com vista à concretização do projeto na sua globalidade pretende-se a implementação de diversos componentes distintos (ECHO, 2022; Qualiseg, 2022), tais como: Digital Twin, editor de jogo, modelo de simulação, geração de In-



interfaces de utilizador, operações com realidade virtual e arquitetura de servidor multiplayer. No âmbito desta dissertação é abordado o Digital Twin e a sua contribuição para a materialização do projeto.

## 1.2 Objetivos

Por meio desta dissertação, pretende-se implementar um protótipo de Digital Twin, com o intuito de demonstrar o seu potencial no treino e avaliação de desempenho no âmbito do controlo de poluição marítima, tendo como base um modelo numérico intitulado MOHID (MARETEC, 2002), capaz de prever a evolução de um derrame de hidrocarbonetos.

Este estudo pretende resolver a lacuna identificada na atual falta de ferramentas capazes de treinar a intervenção social e em particular situações de resposta de emergência. Por conseguinte, as tarefas subjacentes à concretização do protótipo de Digital Twin são:

### 1. Criação de API

A integração do modelo matemático MOHID no Digital Twin é essencial para possibilitar a simulação em tempo real de um derrame, assim como, previsões de estados futuros, de forma matematicamente correta.

### 2. Propor uma arquitetura do Digital Twin

Através da definição da arquitetura do Digital Twin é possível detalhar a estrutura fundamental do modelo Digital bem como, a troca de dados com os restantes módulos do sistema. Esta tarefa contribui para uma lacuna identificada na literatura acerca de arquiteturas de Digital Twin para ferramentas de treino no combate à poluição.

### 3. Construção do Digital Twin

A construção do Digital Twin implica a implementação de funcionalidades como: simulação da evolução um derrame de hidrocarbonetos, colocação e remoção de equipamentos de contenção do derrame, obtenção de uma imagem aérea do local do incidente, assim como previsão da evolução do derrame. Adicionalmente, pretende-se que através do Digital Twin seja possível obter métricas relativas ao volume de hidrocarboneto (tais como sedimentado, evaporado, emulsificado e recuperado), assim como recolha de métricas referentes ao desempenho das equipas e utilizadores (tais como custo, número de avarias e impacto do seu desempenho coletivo).

### 4. Avaliação do Digital Twin

A avaliação é essencial para garantir que o protótipo desenvolvido está alinhado com as necessidades do projeto. Esta tarefa vai de encontro às *guidelines* da metodologia Design Science Research (DSR) adotada.

Com o desenvolvimento desta ferramenta pretende-se potencializar a capacidade de coordenação, resposta e experiência, individual e coletiva, em ações de

controlo de poluição marítima e fornecer às equipas de resposta métricas relativas ao seu desempenho, no final do exercício. Uma das grandes vantagens do uso desta plataforma reside no facto de poderem ser efetuados treinos com os mais variados níveis de alcance do derrame e sem a necessidade de mobilizar todos os intervenientes e meios do exercício. Desta forma, é possível reduzir drasticamente os custos operacionais geralmente associados aos exercícios de treino e consequentemente potencializar a sua realização de forma mais frequente.

### 1.3 Estrutura do documento

O presente documento encontra-se estruturado em sete capítulos, iniciando com uma explicação do contexto e objetivos do projeto no primeiro capítulo. O segundo capítulo dedica-se à revisão de literatura, um processo crucial para a aquisição de conhecimento necessário à concretização do DT proposto. No terceiro capítulo, descrevemos a metodologia adotada, o plano de trabalho, a análise de riscos e as ferramentas usadas na execução do projeto. O quarto capítulo apresenta a arquitetura global do MPCCS, juntamente com a arquitetura do protótipo de Digital Twin e os requisitos funcionais e não funcionais.

No capítulo cinco, é feita a descrição do trabalho desenvolvido, com a apresentação do trabalho exploratório do modelo numérico, modelo Entidade Relacionamento (ER), componentes do protótipo e tecnologias usadas e os ecrãs desenvolvidos para monitorização do exercício. No capítulo seis, são apresentados os testes efetuados ao sistema, a avaliação e oportunidades de melhoria. Por fim, no capítulo sete é feita uma síntese do conteúdo abordado neste documento.

# Capítulo 2

## Revisão de Literatura

O presente capítulo tem como principal objetivo analisar conceitos como: Digital Twins, avaliação de desempenho, simuladores e modelos de derrame de petróleo, em contexto marítimo.

### 2.1 Digital Twin

Ao longo desta secção será feita uma apresentação do contexto histórico de um Digital Twin, são apresentadas e analisadas algumas definições de Digital Twin (DT) sugeridas por diferentes autores e são apresentadas algumas classificações de Digital Twin. De seguida, são apresentados alguns exemplos de Digital Twin num contexto marítimo. De seguida, é feita uma distinção entre Digital Twin e Simulação. Por fim, são apresentadas as etapas de concepção de um Digital Twin.

#### 2.1.1 Contexto histórico

Em 1991, David Gelernter apresentou os Mirror Worlds, um conceito bastante próximo dos Digital Twins conhecidos hoje em dia. Mirror Worlds consistia num modelo de software com a capacidade de ser alimentado com dados em tempo real, de forma a reproduzir a realidade (Gelernter, 1991). O modelo descrito era também capaz de recordar acontecimentos passados sempre que solicitado (Gelernter, 1991). Apesar do conceito ser bastante inovador, devido aos desenvolvimentos tecnológicos da época em que foi apresentado, não era possível a sua implementação (Gelernter, 1991).

Em 2002, Michael Grieves apresentou um modelo para Product Lifecycle Management que também contribuiu para a atual definição de Digital Twin (M. Grieves & Vickers, 2016; M. W. Grieves, 2019). O modelo sugerido era composto por três elementos: espaço físico, espaço virtual e um mecanismo de ligação entre os dois espaços que permite a troca de informação (M. W. Grieves, 2005), como é ilustrado na figura 2.1 .

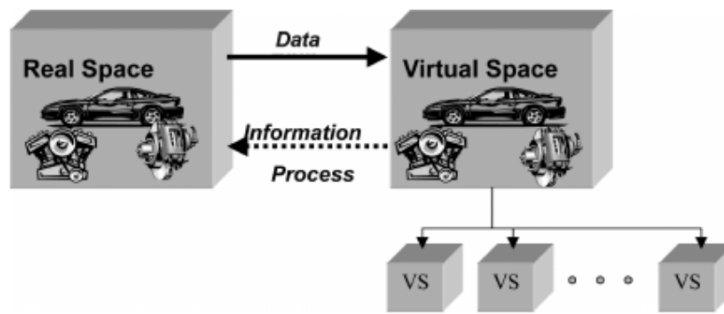


Figura 2.1: Modelo sugerido por Michael Grieves (M. W. Grieves, 2005)

Contudo, foi apenas em 2010 que surgiu o termo “Digital Twin” numa versão preliminar do roteiro tecnológico da National Aeronautics and Space Administration (NASA) (Piascik et al., 2010). Neste documento foram enunciadas algumas particularidades deste conceito, tais como, a sua capacidade de incorporar modelação e simulação de alta fidelidade, em tempo real, na cópia virtual do sistema e o facto de o DT ser capaz de prever o estado, vida útil e probabilidade de sucesso da missão (Piascik et al., 2010).

Ainda que o conceito de Digital Twin tenha surgido há cerca de três décadas, foi com o desenvolvimento de áreas como Internet of Things (IoT) e big data que a sua implementação se tornou possível (Greengard, 2020). Desde então, algumas grandes empresas como Siemens, IBM e General Electrics desenvolveram plataformas de DT para monitorização em tempo real (Greengard, 2020). Consequentemente, ao potencializar o uso desta tecnologia foi possível a expansão deste termo para várias áreas distintas, nomeadamente para a indústria, engenharia aeroespacial, controlo de tráfego e qualidade do ar (Greengard, 2020).

Recentemente, Tao et al. apresentaram um modelo de Digital Twin composto por cinco dimensões (Tao et al., 2018) como uma extensão do modelo de três dimensões introduzido por M. W. Grieves (M. W. Grieves, 2005). Os autores sugerem uma abordagem em que o modelo combina dados físicos e virtuais para uma recolha de informações mais completa e precisa. Este modelo inclui também serviços onde as funções do DT podem ser encapsuladas para permitir uma gestão centralizada e um acesso imediato (Tao et al., 2018).

### 2.1.2 Definição de Digital Twin

Um Digital Twin possui aplicações em inúmeras áreas. Deste modo, diferentes autores foram sugerindo e realçando aspetos distintos de acordo com a sua aplicabilidade.

De acordo com os autores Stark & Damerou, um DT pode ser definido como *“a digital representation of an active unique product (real device, object, machine, service, or intangible asset) or unique product-service system (a system consisting of a product and a related service) that comprises its selected characteristics, properties, conditions, and behaviors by means of models, information, and data within a single or even across multiple life cycle phases”* (Stark & Damerou, 2019). Numa outra perspetiva,

um DT é descrito como *“an evolving digital profile of the historical and current behavior of a physical object or process that helps optimize business performance”* (Parrott & Warshaw, 2022).

Nas definições apresentadas e noutras presentes na literatura podemos identificar alguns aspetos similares que constam do conceito apresentado por Grieves e que se mantêm, como é o caso do espaço físico, do espaço virtual e da informação transferida entre ambos. Naturalmente, é dada grande importância à troca de dados entre os dois espaços, na medida em que através da análise destes dados é possível efetuar uma análise ao funcionamento do sistema físico, prever o seu desempenho e efetuar uma otimização dos seus processos ou constituintes (Singh et al., 2021).

### 2.1.3 Classificação de Digital Twin

M. Grieves & Vickers referem dois tipos de Digital Twin: Digital Twin Prototype (DTP) e Digital Twin Instance (DTI) (M. Grieves & Vickers, 2016). De acordo com os autores, o Digital Twin Prototype é, tal como o nome indica um protótipo do artefacto físico e inclui informações que permitem a sua produção. O Digital Twin Instance é referido como o produto físico ao qual o Digital Twin fica conectado (M. Grieves & Vickers, 2016). Posteriormente é feita uma referência a Digital Twin Environment (DTE), referido como um ambiente integrado para operação dos Digital Twins (M. Grieves & Vickers, 2016).

De acordo com Kritzinger et al., podem ser identificadas 3 subcategorias de Digital Twins tendo como base o seu nível de integração de dados (Kritzinger et al., 2018). Caso não exista uma troca de dados automatizada entre o artefacto físico e o digital os autores referem que se trata de um Digital Model (Kritzinger et al., 2018). Neste caso, caso ocorra uma alteração num dos objetos não existe um efeito direto no outro na medida em que toca a troca de informação é feita de forma manual (Kritzinger et al., 2018). Caso exista um fluxo de informação unidirecional, estamos na presença de um Digital Shadow. Nesta situação, uma alteração no artefacto físico, reflete-se no digital, contudo o contrário não se verifica (Kritzinger et al., 2018). Por outro lado, os autores referem que na presença de uma troca de informação bidirecional podemos identificar um Digital Twin (Kritzinger et al., 2018). Neste caso, as alterações num dos artefactos, refletem-se no outro (Kritzinger et al., 2018). A figura 2.2 esquematiza a informação apresentada.

Segundo Madni et al. podem ser definidos quatro níveis de representação virtual de um Digital Twin (Madni et al., 2019). No primeiro nível é apresentado o Pre-Digital Twin que antecede a criação do artefacto físico (Madni et al., 2019). É usado para reduzir os riscos técnicos associados e reduzir os problemas encontrados (Madni et al., 2019). No segundo nível é apresentado o Digital Twin, onde existe uma troca de informações bidirecional entre os artefactos (Madni et al., 2019). Assim, o Digital Twin consegue usar os dados fornecidos para melhorar o seu desempenho em tempo real e verificar a saúde do artefacto físico (Madni et al., 2019). No terceiro nível é sugerido o Adaptive Digital Twin que ao forne-

cer uma User Interface é capaz de adaptar o seu funcionamento às preferências definidas pelo utilizador (Madni et al., 2019). No último nível surge o Intelligent Digital Twin que, além das capacidades enunciadas para o nível 3, possui aprendizagem computacional não supervisionada (Madni et al., 2019). Neste nível, o Digital Twin possui bastante autonomia (Madni et al., 2019).

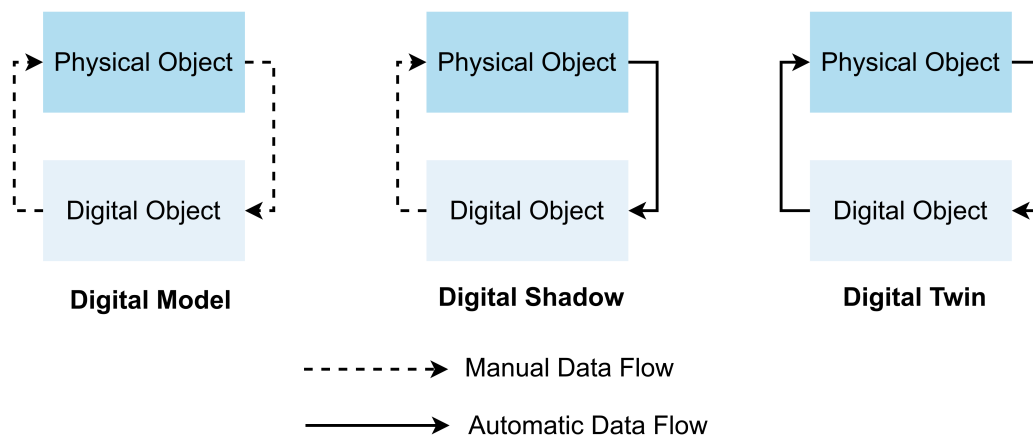


Figura 2.2: Subcategorias de Digital Twin (Singh et al., 2021)

### 2.1.4 Digital Twin vs simulação

Na subsecção anterior foram apresentadas subcategorias de Digital Twin que incluem uma componente de simulação e cuja conexão ao artefacto físico não é feita necessariamente em tempo real. Assim, torna-se importante distinguir os conceitos de Digital Twin e Simulação de forma a identificar os limites das duas denominações.

Em primeiro lugar, tanto as simulações como o Digital Twin se baseiam em modelos digitais, de forma a representar os processos do sistema. Contudo, VanDerHorn & Mahadevan defendem que um dos elementos diferenciadores entre os conceitos advém do facto de uma simulação prever estados futuros tendo por base pré condições previamente definidas (VanDerHorn & Mahadevan, 2021). Por outro lado, um Digital Twin baseia-se na troca de informação bidirecional entre os artefactos, pelo que é capaz de acompanhar a evolução do estado do sistema e prever o seu estado futuro em tempo real (VanDerHorn & Mahadevan, 2021). Deste modo, uma simulação e um Digital Twin podem partilhar o mesmo modelo digital, contudo é através da atualização em tempo real das condições do ambiente físico que podemos usar este tipo de modelos para otimizar o processo de tomada de decisão e prever estados futuros (VanDerHorn & Mahadevan, 2021). Em suma, pode-se aferir que apesar de um Digital Twin possuir uma componente de simulação, a simulação por si só não constitui um Digital Twin.

### 2.1.5 Etapas de concepção de um Digital Twin

Um dos aspetos fundamentais da implementação de um DT reside na definição das etapas de concepção. Segundo VanDerHorn & Mahadevan, as principais etapas da concepção de um Digital Twin incluem a definição dos objetivos a alcançar e do âmbito da solução, a criação da representação virtual e o estabelecimento das ligações de transferência de dados (VanDerHorn & Mahadevan, 2021)

Através da definição dos objetivos é possível estabelecer limites realistas para a concepção do DT. É importante que estes objetivos sejam quantificáveis, de forma a determinar o impacto do DT desenvolvido (VanDerHorn & Mahadevan, 2021). Através dos limites estabelecidos na primeira etapa, é possível verificar se o âmbito definido é suficiente para alcançar os objetivos definidos sem introduzir complexidade ou custos desnecessários que possam pôr em causa a viabilidade do DT. Deste modo, é crucial identificar os aspetos do artefacto físico a modelar e qual o nível de abstração necessário (VanDerHorn & Mahadevan, 2021). O próximo passo na concepção do DT consiste na representação virtual que inclui a criação de modelos de dados e de modelos computacionais. Outro aspeto fundamental da representação virtual consiste na visualização dos dados na medida em que além de auxiliar no processo de tomada de decisão, ajuda a demonstrar o potencial do DT (VanDerHorn & Mahadevan, 2021). Por fim, devem ser tomadas decisões relativamente à frequência e modo de recolha dos dados e sua transferência entre os artefactos que constituem o DT (VanDerHorn & Mahadevan, 2021).

## 2.2 Digital Twin em contexto marítimo

Nos últimos anos tem vindo a ser explorada a aplicabilidade do conceito de Digital Twin em contextos marítimos. Lee et al. apresenta um Digital Twin para operações de embarcações (Lee et al., 2022). Os autores apresentam um Digital Twin capaz de prever a ondulação e as condições hidrodinâmicas com o intuito de minimizar os riscos e consumo dos barcos, assim como otimização de rotas e controlo de velocidade (Lee et al., 2022). Um dos aspetos fulcrais neste DT baseia-se na previsão em tempo real da ondulação, que é possível através de um algoritmo de reconstrução das ondas criado pelos autores (Lee et al., 2022).

A União Europeia está atualmente a financiar um projeto (ILIAD Digital Twin of the Ocean) que através da criação de um Digital Twin pretende contribuir para uma economia do oceano sustentável. A construção deste Digital Twin é possível devido aos investimentos efetuados em infraestrutura, que permitem agora a recolha de dados de inúmeras fontes e o seu tratamento. Através da construção deste DT será possível a visualização geográfica e o uso de realidade virtual ou aumentada de forma a permitir aos utilizadores a observação dos dados de uma forma mais interativa (Iliad, 2021). A construção deste DT será feita de forma colaborativa e inclusiva, suportando o desenvolvimento de iniciativas paralelas e a integração de outros Digital Twins e projetos europeus.

Também a Mercator Ocean International começou o desenvolvimento de modelos para o oceano com o intuito de contribuir para a construção deste DT (Mercator Ocean International, 2022). A organização está a trabalhar com equações de dinâmica de fluidos para a construção desses mesmos modelos e sua integração com frameworks para operações em tempo real (Mercator Ocean International, 2022). Através da combinação dos modelos com a recolha de dados de fontes como satélites, é possível a representação do estado atual, passado ou futuro do oceano (Mercator Ocean International, 2022).

Encontra-se em desenvolvimento um projeto piloto de um Digital Twin para o mar de Creta, como parte do projeto ILIAD. Este projeto tem como principal objetivo ajudar a monitorizar e prever a contaminação causada por um derrame de petróleo, combinando vários serviços de previsão de alta resolução. Com o uso deste Digital Twin será possível também identificar estratégias de resposta, minimizar os danos e reduzir o tempo de recuperação ambiental (Spanoudaki et al., 2023).

Atualmente, tem sido sugerida a inserção de outras plataformas no ILIAD Digital Twin of the Ocean (Mayer, 2022), como é o caso de Maritime Spatial Planning (MSP) Challenge simulation platform. O MSP foi desenvolvido com o objetivo de permitir aos utilizadores compreender e gerir a economia marítima através da definição de planos de atuação para o futuro. Posteriormente os resultados das escolhas dos utilizadores são simulados e apresentados. Esta plataforma faz uso de modelos de simulação combinados com dados reais (MSP Challenge, 2015). Atualmente um dos módulos que está em desenvolvimento irá permitir a visualização em 3D do oceano (MSP Challenge, 2020).

### **2.3 Avaliação de desempenho e simuladores em contexto marítimo**

O treino das equipas de resposta de emergência pode utilizar simulações baseadas em cenários reais, em que os utilizadores podem tomar as mesmas decisões que num contexto real (Klein et al., 2022). A formação das equipas de resposta de emergência deve centrar-se na rapidez de resposta e na coordenação da equipa, o que implica o conhecimento do protocolo de combate (Klein et al., 2022). Para atingir estes objetivos, as equipas de resposta devem efetuar exercícios regulares para melhorar e avaliar a sua preparação. É importante identificar as principais competências a ser avaliadas e como podem interferir na avaliação de desempenho dos utilizadores durante o exercício (Greenberg et al., 2017). De acordo com (Greenberg et al., 2017), existem três tipos de capacidades: funcionais, de gestão e apoio e relacionais e de resolução de problemas. O autor identifica ainda técnicas de avaliação que podem ser utilizadas para avaliar o desempenho dos utilizadores, tais como a análise das ações, através de indicadores, de documentação e através da avaliação do plano de atuação.

Segundo Fitz-Gibbon, os indicadores de desempenho servem, tal como o nome indica, para monitorizar o desempenho de um sistema (Fitz-Gibbon, 1990).



Estes correspondem a um item de informação recolhido de forma regular, de modo a ter uma perceção da sua evolução ao longo do tempo (Fitz-Gibbon, 1990). Através da recolha destes indicadores, ainda que possam estar associados a alguns erros e sejam por vezes difíceis de interpretar, são bastante úteis para o controlo de qualidade (Fitz-Gibbon, 1990). Segundo a autora, um dos aspetos fundamentais para uma monitorização relevante e eficiente parte pela escolha de indicadores de desempenho adequados e relevantes no contexto do problema apresentado (Fitz-Gibbon, 1990).

Um dashboard pode ser caracterizado como *"a visual display of the most important information needed to achieve one or more objectives; consolidated and arranged on a single screen so the information can be monitored at a glance"* (Fitz-Gibbon, 1990). A autora apresenta ainda algumas características fundamentais que devem ser encontradas nos dashboards (Fitz-Gibbon, 1990). O primeiro aspeto referido é que a informação apresentada num dashboard deve ser bem resumida para que o utilizador a possa compreender de imediato (Fitz-Gibbon, 1990). Da mesma forma, a apresentação dessa informação deve ser concisa, clara, intuitiva e adaptada ao utilizador (Fitz-Gibbon, 1990).

A combinação de capacidades de simulação e representações visuais avançadas de eventos complexos como a poluição marinha é um requisito fundamental para os Digital Twins. Os principais indicadores de desempenho têm de ser recolhidos regularmente, permitindo a visualização da evolução dos dados ao longo do tempo. Estas métricas são essenciais para o controlo de qualidade; no entanto, é crucial identificar indicadores de desempenho relevantes e adequados ao contexto do problema (Gaba, 2004).

No âmbito de avaliação de desempenho de pilotagem marítima, Ernstsens & Nazir sugerem uma ferramenta chamada CAPA que pode ser usada num contexto educacional ou de treino em simuladores (Ernstsens & Nazir, 2020). Esta ferramenta é composta por cinco dimensões: trabalho em equipa, variáveis técnicas, instalação do piloto, atracação do barco e fatores externos (Ernstsens & Nazir, 2020). A avaliação de desempenho final do utilizador é calculada através da soma da pontuação obtida em cada uma destas dimensões (Ernstsens & Nazir, 2020). Dentro de cada uma destas dimensões foram identificadas algumas variáveis e indicadores empíricos de forma a poder ser feita a avaliação do desempenho do utilizador (Ernstsens & Nazir, 2020).

No domínio de poluição marítima foram encontrados na literatura alguns simuladores, nomeadamente o Potential Incident Simulation, Control and Evaluation System (PISCES II) (Piscas II, 2020), o Simulators for improving Cross-Border Oil Spill Response in Extreme Conditions (SIMREC) (Merikotka, 2022) e o General NOAA Operational Modeling Environment (GNOME) (NOAA, 2019). De seguida, são apresentadas algumas das características de cada um.

O PISCES II, é um simulador usado para prever e controlar a evolução de um derrame, fazendo uso de dados meteorológicos e oceanográficos (Łazuga et al., 2013; Piscas II, 2020). Adicionalmente, auxilia o treino de estudantes e profissionais e é capaz de refinar e testar estratégias de atuação das equipas de resposta (Łazuga et al., 2013; Piscas II, 2020).

O projeto SIMREC visa a redução dos riscos associados aos derrames de petróleo na região do Golfo da Finlândia, através da criação de um ambiente de simulação que permita o treino das equipas de resposta (Lanki et al., 2022; Merikotka, 2022; *SIMREC*, 2020). Este simulador tem em consideração informações sobre o tráfego marítimo e previsões meteorológicas e baseando-se nestes dados é capaz de identificar zonas de maior risco (Lanki et al., 2022; Merikotka, 2022; *SIMREC*, 2020). Este simulador possui 3 componentes distintas: navegação, rádio e sala de máquinas e é capaz de treinar as equipas de resposta para operar sob condições meteorológicas extremas que afetem a visibilidade e manuseio de equipamentos de navegação e operação (Lanki et al., 2022).

O GNOME é composto por uma coleção de ferramentas de modelação desenvolvidas para prever o movimento e impacto de hidrocarbonetos derramados num ambiente marítimo (Zelenke et al., 2012). Estas ferramentas estão disponíveis para uso da comunidade académica e equipas de resposta e são geralmente usadas pelas equipas de suporte e resposta da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (NOAA, 2019). A ferramenta GNOME disponibiliza ainda diversos componentes que fornecem diferentes funcionalidades, incluindo a definição e visualização da evolução de um derrame e uma ferramenta que auxilia o planeamento de contingência (NOAA, 2020).

Como referido anteriormente, a avaliação de desempenho é fundamental em sistemas com uma forte componente educacional, uma vez que a aprendizagem do utilizador depende do feedback fornecido (Bellotti et al., 2013). No entanto, os simuladores de poluição marítima apresentados (*PISCES II* (*Pisces II*, 2020), *SIMREC* (*SIMREC*, 2020), GNOME Suite for Oil Spill Modeling (Zelenke et al., 2012)) necessitam de melhorar os seus dashboards e focar no desempenho do utilizador na remoção do poluente (através da apresentação da quantidade de hidrocarboneto removido, áreas afetadas no final do exercício, entre outros) e a avaliação do protocolo de resposta (por exemplo, verificar se o processo de autorizações foi efetuado conforme descrito no protocolo). Neste sentido, um Digital Twin pode representar uma solução para avaliar o contexto técnico-social do controlo da poluição marinha.

## 2.4 Modelos de derrame de petróleo

Atualmente são usados diversos modelos de derrames de petróleo para simular a evolução de hidrocarbonetos na água. Alguns dos mais comuns são: BLOSOM (Sim et al., 2015), CDOG (Yapa et al., 2012), GNOME (Zelenke et al., 2012), MEDSLIK (Lardner et al., 2006), MEDSLIK-II (De Dominicis et al., 2013), MOHID (MARETEC, 2002), MOTHY (Daniel et al., 2003), OILMAP (Spaulding et al., 1994), OILMAPDEEP (Crowley et al., 2014), OILTOX (Brovchenko et al., 2003), OILTRANS (Berry et al., 2012), OpenDrift (Dagestad et al., 2018), OSCAR (Aamo et al., 1996), OSERIT (Legrand & Duliere, 2012), OSIS (Leech et al., 1993), POSEIDON OSM (Annika et al., 2001), SIMAP (McCay & Rowe, 2004) e TAMOC (Gros et al., 2017).

Este tipo de modelos faz uso de dados meteorológicos e oceanográficos (nomeadamente correntes, ventos e ondas) para prever a evolução dos derrames de hidrocarbonetos (Keramea et al., 2021). Grande parte dos modelos apresentados segue uma abordagem Lagrangiana e são capazes de calcular diversos aspetos dos processos de transporte e degradação do petróleo, nomeadamente sedimentação, emulsificação, evaporação, dissolução, dispersão e chegada do petróleo à costa.

Entre os modelos apresentados anteriormente os mais usados pela comunidade científica são: SIMAP, OSCAR, OILLMAP, MOHID, MEDSLIK, MEDSLIK-II, e OPENDrift (Keramea et al., 2021). Para este projeto foi escolhido o modelo MOHID devido à possibilidade de colobaração com a equipa desenvolvedora do software.

O MOHID é um modelo hidrodinâmico tri-dimensional, desenvolvido pela Marine and Environmental Technology Research Center (MARETEC) no instituto superior técnico, que pertence à universidade de Lisboa (MARETEC, 2002). Este modelo inclui um módulo de transporte Lagrangiano que é capaz de calcular os processos de degradação dos hidrocarbonetos (Keramea et al., 2021).

## 2.5 Síntese dos temas abordados

Ao longo deste capítulo foi abordado o conceito de Digital Twin e o modelo sugerido por M. W. Grieves, no qual um Digital Twin é composto por três elementos: espaço físico, espaço virtual e troca de informação entre ambos (M. W. Grieves, 2005). Desta forma, um Digital Twin permite replicar em tempo real um sistema ou processo físico e revela-se capaz de simular, monitorizar e prever estados futuros (M. W. Grieves, 2005). Ainda que um Digital Twin possua uma componente de simulação, não se baseia na representação de um sistema e previsão do seu comportamento, mas vai mais longe através da integração de dados em tempo real, previsão de estados futuros e análise contínua (VanDerHorn & Mahadevan, 2021).

Os Digital Twins marítimos e simuladores para poluição marítima apresentados, confirmam a novidade do tema e a oportunidade de ir além da previsão da evolução do derrame e impacto no meio ambiente, através do uso de um Digital Twin para treino e avaliação das equipas de resposta à poluição marítima.

No próximo capítulo será apresentada a metodologia e plano de trabalho definido para a concretização do projeto, assim como o levantamento de alguns riscos associados e as ferramentas usadas.



# Capítulo 3

## Metodologia

Ao longo deste capítulo será apresentada a metodologia adotada no desenvolvimento desta dissertação de mestrado. De seguida, será apresentado o plano de trabalho previsto versus plano de trabalho realizado. Por fim, será apresentada a análise de riscos e ferramentas utilizadas.

### 3.1 Metodologia

O desenvolvimento do Digital Twin para controlo de poluição marítima apresentado no presente documento seguiu a metodologia Design Science Research (DSR), com o objetivo de propor soluções inovadoras para um problema, produzindo conhecimento a partir do processo de design e implementação (Herner et al., 2004). A utilidade dos artefactos é central em DSR e pode incluir modelos, instanciações ou métodos desenvolvidos iterativamente em contextos sociotécnicos (Herner et al., 2004). Por um lado, a DSR exige uma base de conhecimentos sólida para fundamentar a conceção e a avaliação. Por outro lado, a metodologia DSR também requer um contexto relevante (Gregor & Hevner, 2013). A tabela 3.1 apresenta a nossa grelha DSR (Vom Brocke & Maedche, 2019). A grelha DSR (Vom Brocke & Maedche, 2019) resume os principais elementos dos projectos DSR. O projeto MPCS visa produzir conhecimento prescritivo com um modelo e uma instanciação (Gregor & Hevner, 2013) benéfico para os diferentes stakeholders da poluição marítima num contexto nacional e internacional.

De acordo com Peffers et al. (2007), o processo de DSR é constituído por seis fases distintas: identificação do problema e motivação, definição dos objetivos, conceção e desenvolvimento, demonstração, avaliação e comunicação. Seguindo esta metodologia, apesar da definição de fases sequenciais, existe sempre a possibilidade de voltar a fases anteriores e introduzir melhorias ou retificações. Na figura 3.1 encontra-se um resumo dos passos adotados em cada uma das fases do processo DSR.

Conforme referido anteriormente, o treino das equipas de resposta a um evento de poluição marítima constitui um processo demorado e tem um elevado custo associado, o que impossibilita a sua realização frequente. É importante que

Tabela 3.1: Grelha DSR para o desenvolvimento do Digital Twin para controlo de poluição marítima

<p><i>problem</i> É necessário um Digital Twin para reproduzir um cenário real de poluição marítima. As propostas existentes possuem limitações no treino da intervenção social.</p>	<p><i>research process</i> Etapas de formulação do problema, conceção e avaliação. Adoção de <i>guidelines</i> DSR no processo.</p>	<p><i>solution description</i> Artefacto com capacidades de simulação, previsão e avaliação do desempenho incorporado numa plataforma internacional para treino de poluição marítima.</p>
<p><i>input knowledge</i> Controlo poluição marítima, Arquitetura Digital Twin e preparação para resposta a emergência.</p>	<p><i>concepts</i> Sistema de informação, Digital Twin, Dashboard.</p>	<p><i>output knowledge</i> Requisitos e modelo de Digital Twin para controlo da poluição marítima.</p>

as equipas de resposta possuam um grande domínio do protocolo e procedimentos a seguir, assegurando a recolha dos poluentes de forma rápida e eficaz. Similarmente, neste tipo de exercícios a componente de intervenção social e capacidade de coordenação também se revela significativa. Surge assim, a necessidade de criação de um artefacto capaz de replicar um cenário de poluição marítima que possibilite às equipas o treino e avaliação das suas competências.

A fase de identificação do problema e motivação iniciou-se em 2022 com a proposta de um projeto de cooperação internacional para o controlo da poluição marítima. Foi posteriormente apresentada como uma proposta de dissertação, motivando a realização da presente dissertação.

Aquando da formulação do problema foram desenvolvidos alguns documentos nos quais eram descritos de forma global quais os objetivos do projeto. Deste modo, partindo destes objetivos globais e dos conhecimentos adquiridos através da investigação efetuada na primeira fase do projeto, foi possível definir alguns objetivos mais específicos que foram a base da fase seguinte. Os objetivos identificados podem ser analisados com maior detalhe no capítulo seguinte.

A fase de conceção e desenvolvimento foi acompanhada através de reuniões semanais e de relatórios de progresso com a equipa. Nestas reuniões foram discutidos alguns dos problemas encontrados, implicações para o projeto e diferentes alternativas. Estas reuniões foram essenciais para garantir a qualidade e a eficiência do desenvolvimento do protótipo, permitindo ajustes e melhorias contínuas ao longo do processo. Além disso, a comunicação frequente entre a equipa e os stakeholders possibilitou a troca de ideias e o alinhamento das expectativas, contribuindo para o sucesso do projeto.

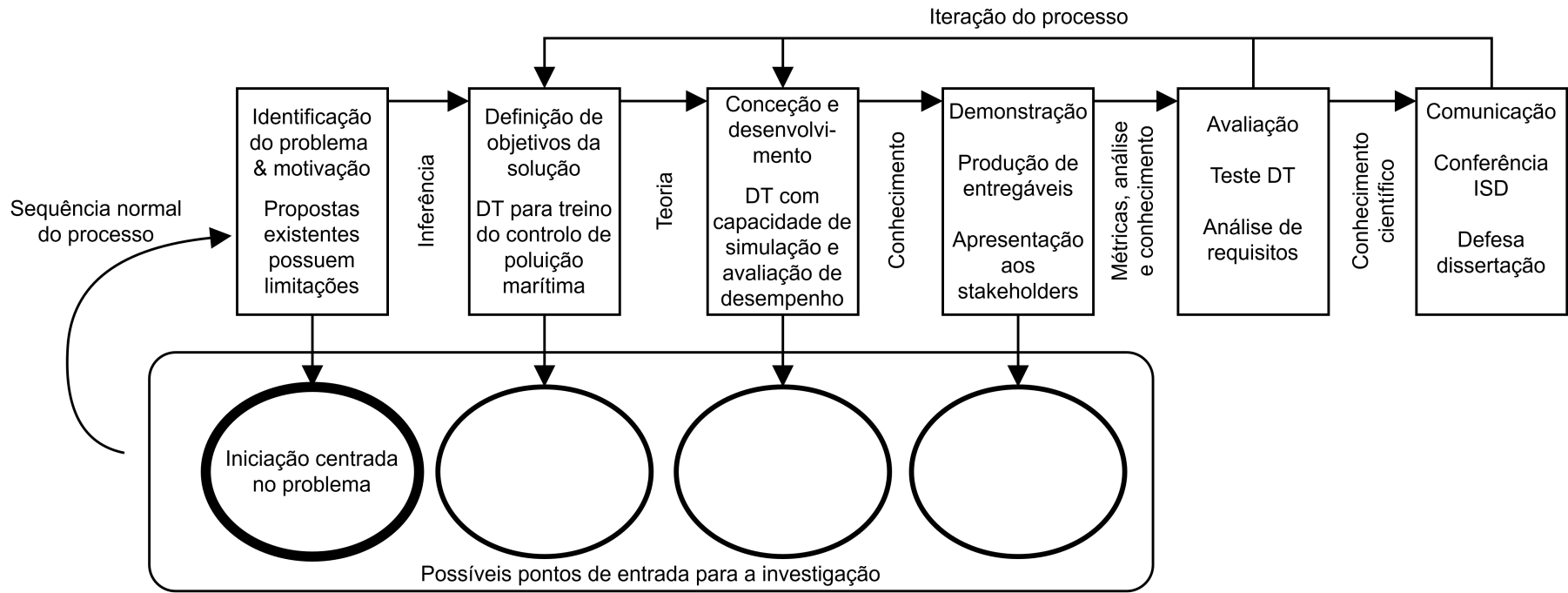


Figura 3.1: Processo DSR adaptado de (Peffers et al., 2007)

A fase de demonstração foi realizada através da produção de diferentes entregáveis para garantir que a solução em desenvolvimento era coerente com as necessidades do projeto.

A fase de avaliação consistiu na realização de diferentes testes ao protótipo e validação das funcionalidades implementadas. A fase final da primeira grande iteração do presente trabalho envolveu a comunicação, através da apresentação de um artigo científico, no qual o projeto MPCs foi detalhado, destacando o papel do Digital Twin na sua materialização.

Após a comunicação, deu-se início a uma nova iteração na qual se procedeu a corrigir e completar o trabalho desenvolvido até então. Deu-se ainda início ao processo de integração do Digital Twin com os restantes módulos do sistema.

O momento final da segunda iteração consiste na apresentação e defesa do presente trabalho.

## 3.2 Plano de trabalho

Nesta secção será apresentado o plano de trabalho desenvolvido. Numa fase inicial do projeto, foi feita uma revisão da literatura para perceber como um DT podia ser adotado no contexto de preparação para o combate à poluição.

Terminada a fase inicial de investigação, passou-se à definição da arquitetura, assim como implementação do artefacto proposto. Deste modo, a primeira tarefa consistiu na elaboração da arquitetura geral do projeto, assim como a arquitetura do DT. De seguida, procedeu-se ao desenvolvimento de uma REST API responsável pela comunicação com o MOHID.

Finalmente, terminado o desenvolvimento da API o objetivo passou pela correção de pequenos erros e inconsistências, integração do Digital Twin com os restantes módulos, monitorização do exercício, avaliação do protótipo e término do presente documento.

### 3.2.1 Investigação

Através da revisão de literatura, foi possível aprofundar o conhecimento no contexto do problema de forma a dominar os conhecimentos necessários para planear e desenvolver o trabalho proposto. A aquisição de conhecimento nesta fase do projeto consistiu essencialmente na investigação teórica, na análise dos documentos de requisitos do projeto e em reuniões de discussão do projeto.

Outro aspeto essencial da fase de investigação consistiu no estudo do software de simulação MOHID, a ser usado na fase seguinte. Para o efeito, foi usado o software OpenFlows Flood (Bentley, 2022) que faz uso de modelos do MOHID e possui uma interface gráfica de fácil utilização. Numa primeira fase foi seguido um guia de inicialização à ferramenta para compreender o seu funcionamento. Numa fase posterior, foi possível executar algumas simulações e analisar a es-



estrutura e conteúdo dos ficheiros gerados. Através desta análise preliminar foi possível identificar algumas métricas presentes nos ficheiros resultantes de uma execução do software. Por conseguinte, foram identificadas métricas como os dados indicativos da chegada do petróleo à costa (por exemplo, volume), propriedades do petróleo (por exemplo, densidade, volume) e as coordenadas do polígono que define a área do derrame.

### **3.2.2 Implementação**

A fase de implementou iniciou-se com a a definição do modelo Entidade Relacionamento (ER) global do projeto, no qual foram incluídas algumas das métricas identificadas na fase anterior, assim como a arquitetura geral, de modo a definir os limites de intervenção de cada um dos membros da equipa de desenvolvimento envolvidos no projeto. Nesta fase, foi também elaborado um modelo do Digital Twin com algum detalhe, de forma a tornar mais perceptível a sua interação com o sistema.

Após a definição da arquitetura do sistema, foi iniciado o estudo da simulação. Nesta fase, o principal objetivo era o estudo de como se poderia executar o MOHID através da linha de comandos, pelo que foi necessário criar alguns scripts que permitissem a alteração dos ficheiros de configuração do simulador e a sua execução. Outro aspeto ao qual se deu alguma relevância foi à obtenção de uma imagem aérea do derrame, pelo que foi adaptado um script fornecido pelos parceiros do projeto que permitia ler os resultados HDF5 do MOHID e gerar gráficos a partir dos mesmos. Foram também criados scripts para verificar se um determinado ponto se encontra no mar e para verificar se o conjunto de pontos que definem uma barreira não distam mais que o seu comprimento.

Posteriormente, procedeu-se à configuração de uma máquina virtual Windows para a execução do MOHID e iniciaram-se os testes de conexão sob forma de pedido HTTP. Assim que se verificou o sucesso da conexão iniciou-se a definição e implementação de diferentes métodos da API de forma a permitir a passagem de parâmetros e execução dos métodos no servidor. Nesta fase do desenvolvimento houve também uma reestruturação do código desenvolvido anteriormente, assim como a criação de métodos necessários no contexto do problema, tais como: mapeamento temporal do tempo real para tempo simulado (e vice-versa), colocação e remoção de equipamentos de contenção do derrame (barreiras e recuperadores) e obtenção de um relatório atmosférico. Finalmente, iniciou-se o processo de integração do Digital Twin com os restantes módulos do sistema (nomeadamente ferramenta de jogo e gestor de interfaces de utilizador) e a atualização da base de dados com os dados obtidos através da API criada.

Posteriormente, terminou-se a integração do Digital Twin com os restantes módulos que, naturalmente, implicou algumas alterações e adaptações ao código previamente realizado, de modo a garantir o funcionamento do sistema como um todo. Por fim, procedeu-se à identificação de indicadores a serem usados para a realização da avaliação de desempenho dos utilizadores.

No apêndice A podem ser analisados os diagramas Gantt referentes ao planejamento previsto e realizado relativo ao desenvolvimento do presente trabalho.

### 3.3 Análise de riscos

Inerente à realização de qualquer projeto existem sempre alguns riscos associados. À vista disso, é fundamental que sejam rapidamente identificados e avaliados, de forma a poder criar um plano de mitigação que nos permita estar preparados para colmatar essas situações. A presente análise de riscos segue as *guidelines* apresentadas em Power (2014). Na figura 3.2 é apresentada uma matriz com os riscos identificados.

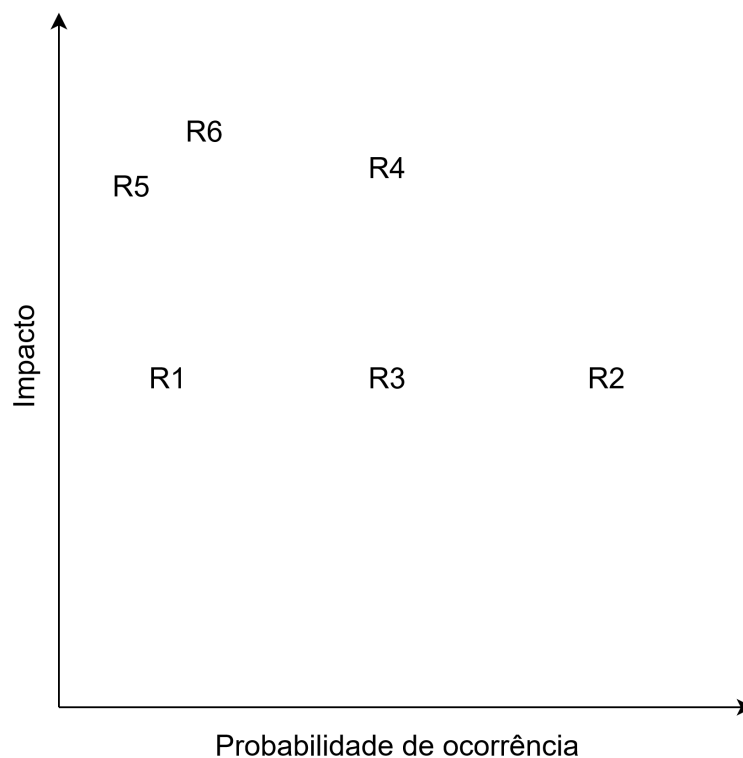


Figura 3.2: Matriz de riscos

#### R1. Atraso na resposta dos parceiros do projeto

Este risco pode ter diversas causas e comprometer o sucesso do projeto. Deste modo, de forma a evitar a ocorrência deste risco, deve ser mantido um contacto próximo com os parceiros mais críticos e realizadas reuniões de acompanhamento do projeto. Este risco possui uma probabilidade de ocorrência baixa e um impacto médio.

Este risco manifestou-se numa fase do projeto na qual se estava a implementar o recálculo de uma simulação a partir de um estado previamente calculado, caso em que o MOHID gerou uma sucessão de erros. O problema foi comunicado à equipa que desenvolveu o modelo, que se prontificou a resolver os problemas gerados. Este processo contudo levou ao atraso na implementação,

ainda que de forma pouco significativa. Desta forma, o impacto foi baixo.

## **R2. Alteração dos requisitos do projeto**

Este risco pode ser causado pela instabilidade da definição de requisitos e pode resultar na implementação de funcionalidades desajustadas e/ou desnecessárias e comprometer a solução final. De forma a mitigar este risco, é importante priorizar a implementação das funcionalidades essenciais para o funcionamento do DT. Este risco possui uma probabilidade de ocorrência alta e um impacto médio.

Durante o processo de desenvolvimento este risco não se manifestou.

## **R3. Falta de experiência no desenvolvimento de Digital Twins**

Este risco pode ser causado pela inexperiência no uso das tecnologias usadas para o desenvolvimento e pode resultar na impossibilidade de implementar o projeto na sua totalidade. Assim, de forma a mitigar este risco devem ser explorados conteúdos que permitam o desenvolvimento das competências necessárias para a implementação do Digital Twin. Este risco possui uma probabilidade de ocorrência média e um impacto médio.

Durante o processo de desenvolvimento este risco não teve impacto.

## **R4. Problemas de integração**

Este risco pode ocorrer no caso de falta de disponibilidade dos restantes membros ou problemas de incompatibilidade ao integrar os módulos. Isto pode resultar na impossibilidade de testar o funcionamento do Digital Twin. Deste modo, devem ser criados diferentes módulos para que possam ser desenvolvidos e operar de forma independente. Deve também ser definida o quanto antes a arquitetura do sistema e quais os pontos de contacto entre os diferentes módulos. Este risco possui uma probabilidade de ocorrência média e um impacto alto.

Este risco manifestou-se devido à falta de disponibilidade dos restantes membros para efetuar a integração do sistema com o módulo do Digital Twin. De forma a diminuir o impacto deste risco, foram escalonadas outras tarefas que não envolviam a integração. Desta forma, o impacto foi médio.

## **R5. Impossibilidade de recuperação do equipamento de trabalho**

Este risco pode ocorrer na eventualidade de uma avaria e resultar na perda de todo o trabalho desenvolvido até ao momento. De forma a mitigar este risco, todo o trabalho desenvolvido deve ser guardado de forma periódica em plataformas como Overleaf e GitHub para garantir que o acesso ao mesmo é possível usando um equipamento com ligação à internet. Este risco possui uma probabilidade de ocorrência baixa e um impacto elevado.

Durante o processo de desenvolvimento este risco não se manifestou.

## **R6. Inadequação do modelo numérico de simulação MOHID**

Este risco pode ocorrer pela obrigatoriedade de uso deste modelo e pode resultar num artefacto inadequado no contexto do problema. De forma a mitigar

este risco, foi realizado um estudo das capacidades do simulador assim como dos seus outputs, no primeiro semestre. De igual forma, a equipa que desenvolveu o modelo estava disponível para esclarecimento de questões, caso fosse necessário. Este risco possui uma probabilidade de ocorrência baixa e um impacto elevado.

Durante o processo de desenvolvimento este risco não se manifestou.

### 3.4 Ferramentas

Nesta secção serão apresentadas as ferramentas que foram utilizadas para a realização deste projeto.

#### OpenFlows Flood

O OpenFlows Flood (Bentley, 2022) é um software que faz uso dos modelos MOHID Water e MOHID Land, pertencentes ao MOHID Modelling System, integrando-os numa interface gráfica de fácil utilização. Como referido anteriormente, numa primeira fase do projeto recorreremos a este software para explorar o simulador MOHID a ser utilizado. Foram analisados os ficheiros de dados gerados provenientes da execução de uma simulação, qual o seu conteúdo e respetiva organização e de que forma podem ser aplicadas alterações aos parâmetros de configuração iniciais.

#### MOHID

O MOHID (MARETEC, 2002) é um modelo numérico de simulação de sistemas hidrodinâmicos que é usado para simular diversos processos hidrodinâmicos, tais como: correntes oceânicas, transporte de sedimentos e dispersão de poluentes.

Neste projeto este software foi alimentado com os dados meteorológicos (velocidade e direção de vento, pressão atmosférica e temperatura do ar) necessários para calcular corretamente a trajetória da mancha de petróleo.

#### Express

O Express (Express, 2010) é uma *framework* para o Node.js. Através desta *framework* é possível gerir pedidos HTTP, tratar exceções, assim como desenvolver aplicações Web Node.js. Esta *framework* é usada neste projeto para implementar a REST API do Digital Twin.

#### Spring Boot

O Spring Boot (spring, 2013) é uma ferramenta que facilita o desenvolvi-

mento de aplicações Web e microserviços com o Spring Framework de forma mais fácil e rápida uma vez que permite desenvolver uma aplicação baseada em Spring com uma configuração e instalação mínima. Esta ferramenta foi escolhida para ser usada por todos os membros da equipa para a construção dos diferentes módulos do sistema, com o intuito de facilitar a comunicação entre eles.

O presente capítulo aborda a metodologia DSR, adotada no desenvolvimento do presente trabalho devido à sua abordagem centrada na criação de soluções práticas e inovadoras para a resolução de problemas e desenvolvimento iterativo (Herner et al., 2004). De seguida, é descrito o plano de trabalho para as fases de investigação e implementação, a análise de riscos e ainda algumas das ferramentas usadas para a concretização desta dissertação de mestrado.

No capítulo seguinte será apresentada a arquitetura do sistema no qual se insere o Digital Twin e serão apresentados os requisitos funcionais e não funcionais, assim como as restrições do desenvolvimento do projeto.



# Capítulo 4

## Especificação

No presente capítulo será apresentada a arquitetura do sistema integral MPCS e apresentados os limites da intervenção do presente estágio. Por fim, serão apresentados de forma detalhada os requisitos funcionais e não funcionais do protótipo de Digital Twin.

### 4.1 Arquitetura

A arquitetura do MPCS segue um modelo cliente-servidor multicamada e é composto por diversos componentes: editor de jogo, ferramenta de jogo, gerador de interfaces de utilizador, Digital Twin e realidade virtual. Nas subsecções seguintes serão abordados estes componentes de forma mais geral, para melhor compreensão da abrangência do MPCS e em particular a arquitetura do Digital Twin, que é o foco do trabalho da autora.

#### 4.1.1 Arquitetura geral

O uso de uma arquitetura cliente-servidor multicamada permite a existência de uma infraestrutura central de simulação, capaz de suportar o acesso a partir de diferentes dispositivos móveis e programas de navegação Web. O encapsulamento de um sistema de modelação tridimensional hidrodinâmico fornece a simulação do processo físico de um derrame e a deriva dos hidrocarbonetos, servindo como base do estado do exercício que inclui pessoas, recursos e equipamentos disponíveis.

O MPCS permite a criação de exercícios multiplayer nos quais cada utilizador assume o papel de um profissional pertencente a uma das organizações participantes no controlo de poluição marítima. A atribuição de papéis é definida pelo gestor do exercício, ao criar um exercício novo. Na criação do exercício, o gestor define também a data de início e fim, a localização e propriedades do derrame, bem como as organizações, instalações e equipamentos disponíveis no exercício.

Durante o exercício, pretende-se que os utilizadores sigam o protocolo definido para um evento de derrame. Para atingir este objetivo, durante o exercício os utilizadores podem interagir entre si (por exemplo através do uso de equipamentos de comunicação (computador e telemóvel)), movimentar-se, interagir com os equipamentos (por exemplo, movimentar e ligar/desligar) e interagir com o derrame (por exemplo através da colocação de equipamentos de contenção). Ao longo do exercício os utilizadores podem, através de um dashboard criado, acompanhar em tempo real a evolução da mancha e aceder às suas propriedades, bem como ao estado de saúde dos participantes e dos equipamentos. Após o término do exercício, é possível aceder a um relatório com métricas referentes ao desempenho da equipa.

Cada componente do MPCs tem responsabilidades distintas. Com efeito, através do editor de jogo é possível a configuração, gestão e exploração de dados dos exercícios. Através da ferramenta de jogo é possível a atuação dos componentes da interface, assim como a atualização do estado do jogo. O gerador de interfaces de utilizador permite a geração de interfaces adequadas ao estado e papel de cada utilizador no exercício. Através do Digital Twin, é possível a integração com o MOHID e a gestão e atualização do estado da simulação. Por fim, a componente de realidade virtual é exploratória e pretende fornecer realismo no manuseio de barreiras e barcos. Na figura 4.1 é possível analisar uma representação simplificada das principais interações entre os diferentes componentes do sistema.

O editor de jogo possibilita a configuração e edição de exercícios, permitindo a escolha dos utilizadores, participantes, consumíveis, equipamentos e organizações participantes no exercício. Através deste módulo é igualmente possível definir o incidente e tipo de exercício que será realizado.

A ferramenta de jogo possibilita a entrada dos utilizadores no jogo, através de uma página de boas vindas. Este módulo tem como funções a distribuição das interfaces adequadas aos participantes, a gestão dos pedidos de eventos e ações e o seu processamento, através da validação das pré e pós condições.

O gerador de interfaces de utilizador tem como principais responsabilidades gerar e gerir os componentes das interfaces apropriadas a cada participante. Esta verificação é feita através da verificação do papel e ações permitidas a cada utilizador (calculadas através das condições do exercício).

A principal função do Digital Twin parte pela emulação da interação com as condições físicas do exercício e pela atualização do estado da simulação. Isto foi alcançado através da modelação de variáveis relevantes de um derrame e através da integração de um modelo de simulação de deriva hidrodinâmica, neste caso o MOHID.

O funcionamento do sistema é possibilitado pela integração dos diferentes módulos (através da chamada de métodos definidos em cada um dos módulos) e pelo uso de uma base de dados acessível a todos. Nesta base de dados, além da configuração dos exercícios, é guardado o estado atual do derrame. O módulo de geração de interfaces comunica diretamente com o cliente (browser) através do uso de Spring Boot, de forma a fornecer a interface mais adequada.



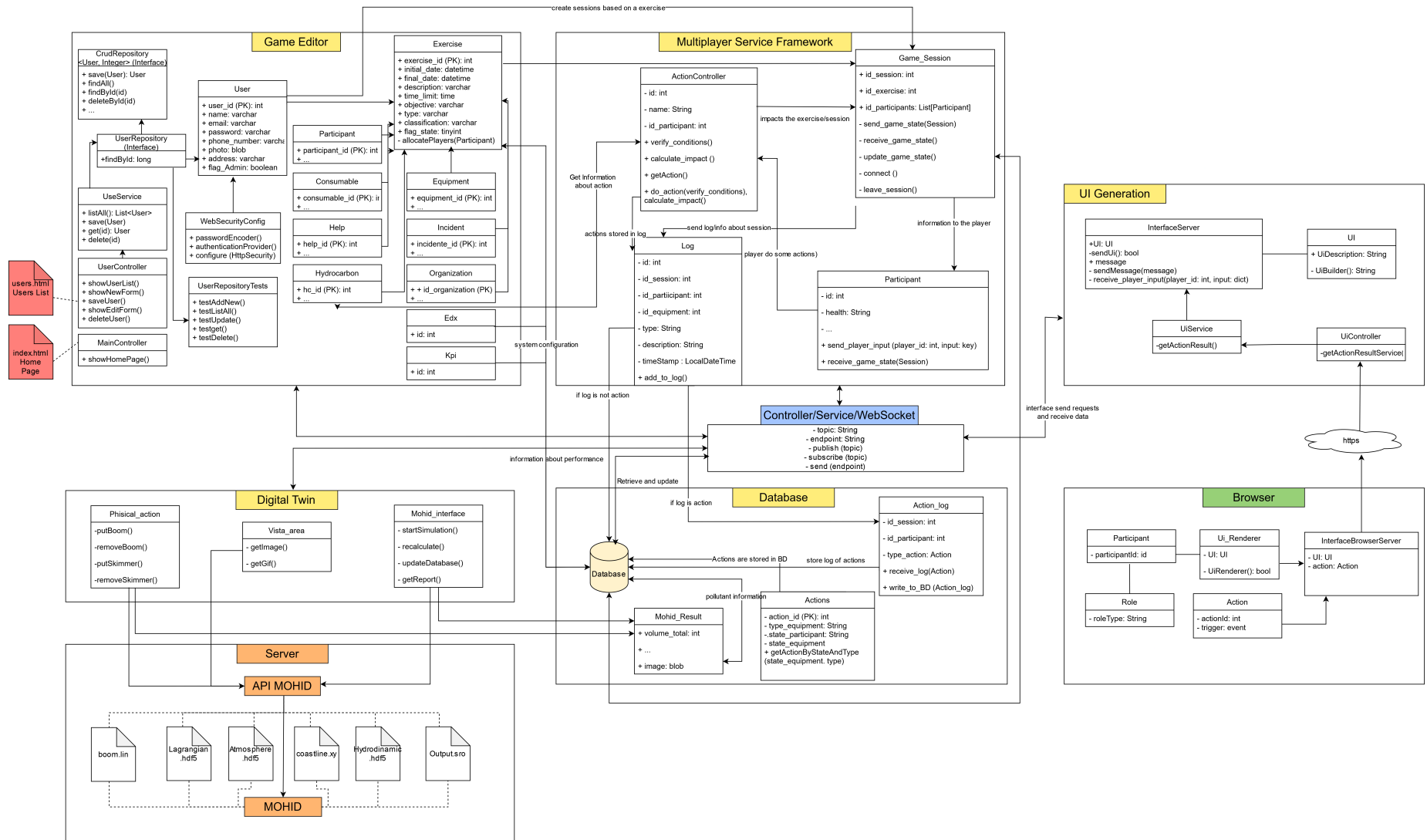


Figura 4.1: Arquitetura geral do projeto

A participação da autora no MPCs incidiu no desenvolvimento do Digital Twin. Adicionalmente, colaborou com a definição da arquitetura geral, bem como a definição do modelo ER.

### 4.1.2 Arquitetura do Digital Twin

O módulo do Digital Twin fornece diferentes métodos numa API que permitem a configuração dos parâmetros do MOHID. Estes métodos permitem ainda especificar as datas de início e fim da simulação, colocação de barreiras e recuperadores para conter o derrame e a obtenção de imagens aéreas do local do incidente. Após a chamada aos métodos da API este módulo efetua o processamento dos dados e efetua o carregamento na base de dados. Após o carregamento dos dados na base de dados é possível aceder às características do derrame a cada instante. A localização e propriedades do hidrocarboneto derramado, tais como volume total, volume recolhido e volume evaporado são exemplos de propriedades que podem ser encontradas na base de dados.

A framework apresentada por Wang et al., inspirou a nossa proposta para o modelo do Digital Twin para controlo de poluição marítima, apresentado na figura 4.2. Este modelo encontra-se dividido em três módulos: recolha de dados, modelo inteligente do DT e dados do DT (Wang et al., 2021). Este modelo segue a literatura apresentada e divide-se em espaço físico, espaço virtual e troca de informação entre ambos (Gelernter, 1991). No espaço físico enquadra-se a ocorrência de um derrame, bem como o módulo de recolha de dados. O espaço virtual contém o módulo de dados e o módulo inteligente.

No contexto deste trabalho, o espaço físico, associado ao módulo de captura de dados é, instanciado usando dados reais da zona costeira de Lisboa, capturados ao longo do mês de outubro de 2021. Estes dados alimentam o modelo matemático MOHID e encontram-se representados na parte inferior da figura 4.2, sendo: cartografia do terreno, condições hidrodinâmicas, condições meteorológicas e localização do evento de poluição. Ao receber a notificação da ocorrência de um derrame e as suas características, este módulo calcula a sua deriva até à hora de término do exercício. Desta forma, o Digital Twin apresenta a particularidade de usar "condições físicas reais" que ocorreram no passado para auxiliar a preparação das equipas de resposta responsáveis pelo controlo da poluição marítima. O DT recebe um pedido sempre que os utilizadores interferem com o estado atual, através da colocação de equipamentos de recolha ou contenção dos hidrocarbonetos derramados. Ao receber um pedido, este módulo é capaz de calcular o impacto da ação no ambiente de simulação.

O módulo inteligente do Digital Twin é capaz de efetuar monitorização em tempo real, permitindo aos utilizadores acompanhar a evolução do derrame. Alguns dos indicadores disponíveis para consulta em tempo real incluem o volume que chegou à costa, emulsificado, dispersado, evaporado e informações sobre a saúde dos participantes e equipamentos presentes no exercício. Através deste módulo é possível a recolha de métricas particularmente úteis para a avaliação de desempenho, tais como: custos humanos e operacionais, número de mortos,

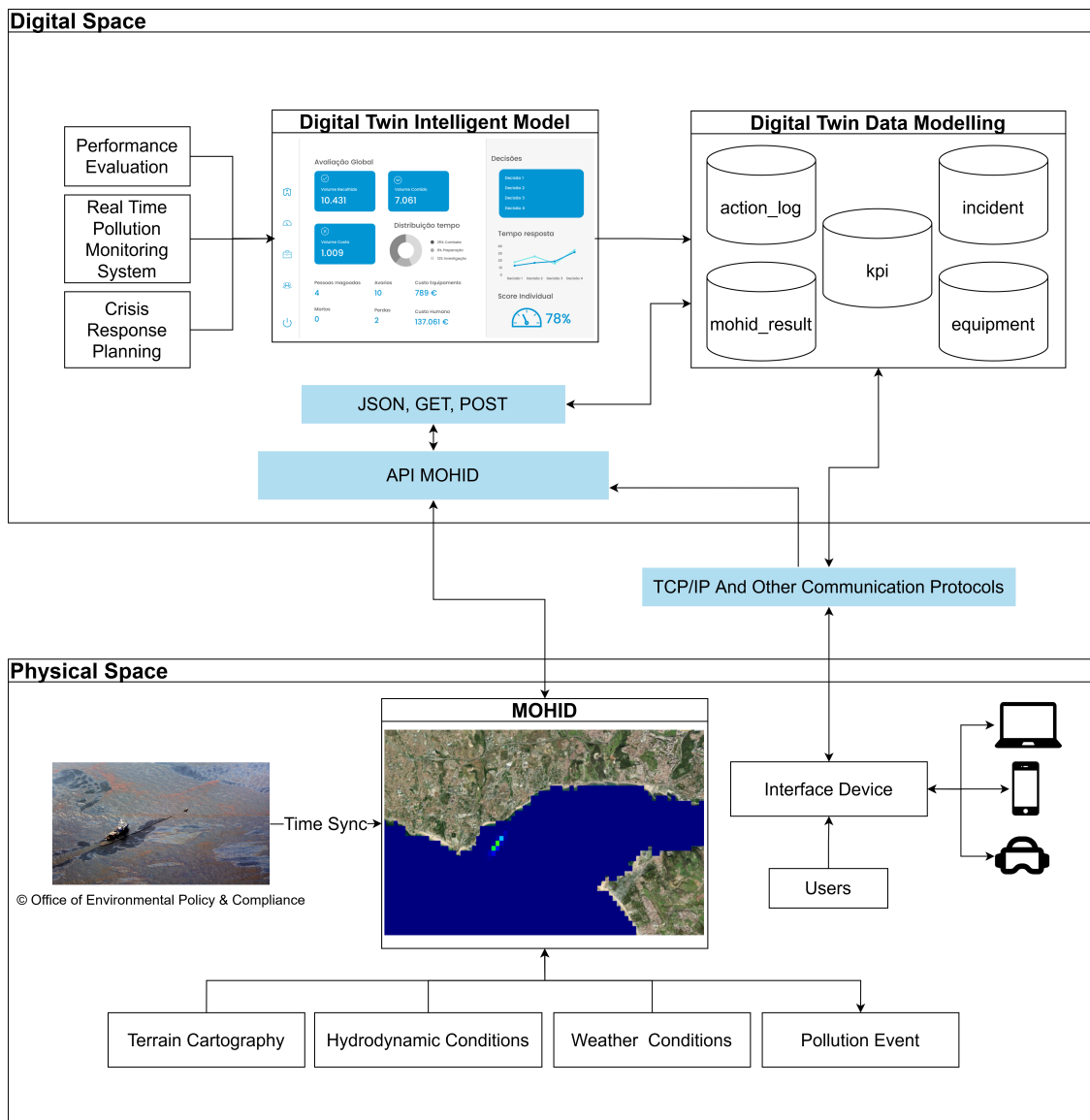


Figura 4.2: Arquitetura do Digital Twin

número de avarias e volume recolhido.

O módulo de dados do Digital Twin faz a gestão do armazenamento e apresentação dos dados na base de dados. Tendo por base este módulo é possível aceder a métricas que permitem avaliar o desempenho global da equipa, baseando-se num caso base sem intervenção humana. Isto pode ser alcançado através da comparação de métricas referentes à evolução da mancha sem intervenção humana e verificar, no final do exercício se as decisões da equipa de resposta tiveram um impacto positivo.

## 4.2 Requisitos

Nesta secção serão apresentados os requisitos funcionais e não funcionais do presente trabalho.

De acordo com Sommerville podemos definir como requisitos a especificação de funcionalidades e restrições de funcionamento de um sistema, de modo a refletir as necessidades dos utilizadores relativamente ao sistema a desenvolver (Sommerville, 2016). Estes requisitos podem ser identificados como requisitos funcionais ou requisitos não funcionais.

Os requisitos funcionais são definidos como uma descrição detalhada das funcionalidades e modo de funcionamento de um sistema. Consequentemente, podem também descrever o que sistema não deve fazer e não devem ser contraditórios (Sommerville, 2016).

Por outro lado, os requisitos não funcionais referem-se a restrições ou limitações nos serviços e funcionalidades de um sistema. Este tipo de requisitos pode afetar toda a arquitetura do sistema e gerar diversos requisitos funcionais (Sommerville, 2016).

### 4.2.1 Requisitos funcionais

Na tabela 4.1 são apresentados os requisitos funcionais identificados como essenciais à construção do protótipo de Digital Twin para controlo de poluição marítima. Nesta tabela, além da descrição dos requisitos, é apresentada a prioridade (Must, Should ou Could) e o estado atual (implementado, parcialmente implementado ou não implementado).

Tabela 4.1: Requisitos funcionais do Digital Twin

ID	Descrição	Prioridade	Estado
RF1	O DT deve ser capaz de prever a evolução do derrame de hidrocarbonetos.	Must	Implementado
RF2.0	O DT deve permitir a colocação de uma barreira para conter o derrame.	Must	Implementado
RF2.1	O DT deve permitir a remoção de uma barreira colocada para conter o derrame.	Must	Implementado
RF2.2	O DT deve ser capaz de calcular o impacto da colocação de uma barreira.	Could	Implementado
RF3.0	O DT deve permitir a colocação de um recuperador para conter o derrame.	Must	Implementado
RF3.1	O DT deve permitir a remoção de um recuperador para conter o derrame.	Must	Implementado
RF3.2	O DT deve ser capaz de calcular o impacto da colocação de um recuperador.	Could	Implementado
RF4	O DT deve ser capaz de gerar um relatório atmosférico.	Could	Implementado
RF5	O DT deve ser capaz de gerar uma previsão de evolução do derrame para um intervalo de tempo definido pelo utilizador do sistema.	Must	Implementado

RF6	O DT deve ser capaz de gerar uma imagem aérea do estado atual do local do incidente.	Must	Implementado
RF7	O DT deve ser capaz de atualizar em tempo real as métricas e localização do derrame.	Must	Implementado
RF8	O DT deve ser capaz de guardar as métricas referentes a exercícios anteriores.	Must	Implementado
RF9	O DT deve ser capaz de calcular o desempenho da equipa no exercício.	Must	Parcialmente implementado
RF10	O DT deve ser capaz de calcular o desempenho individual de um utilizador no exercício.	Could	Não implementado

## 4.2.2 Requisitos não funcionais

Na presente subsecção são apresentados os requisitos não funcionais identificados para o desenvolvimento do Digital Twin, assim como algumas restrições técnicas.

Na tabela 4.2 são apresentados os requisitos não funcionais do sistema e respetivas categorias, de forma sucinta. O primeiro requisito não funcional apresentado (RNF1) diz respeito à segurança do sistema uma vez que este não deve ser acedido por pessoas não autorizadas. Deste modo, apenas serão permitidas ligações à API através do servidor MPCs, no qual se encontram alojados os outros módulos do sistema MPCs. Relativamente ao RNF2, que diz respeito à manutenção do projeto, este deve-se encontrar devidamente documentado, por exemplo através de comentários no código em cada um dos métodos desenvolvidos ou no presente documento, para que possa facilmente ser mantido no futuro. O RNF3 diz respeito ao desempenho do sistema. Num Digital Twin, um dos aspetos mais importantes é a troca de informação entre o artefacto físico e o digital, pelo que é importante que todas as métricas sobre a evolução da mancha se encontrem atualizadas a cada instante, deste modo, o tempo de resposta do DT não deve ser superior a 1 minuto.

Tabela 4.2: Requisitos não funcionais do Digital Twin

ID Requisito	Descrição	Categoria
RNF1	O acesso à API do DT deve ser permitido apenas ao servidor MPCs.	Segurança
RNF2	O código do DT deve ser devidamente documentado.	Manutenção
RNF3	O tempo de resposta da execução do MOHID e inserção de registos na Base de Dados (BD) deve ser inferior a 1 minuto.	Desempenho

Na tabela 4.3 são apresentadas as restrições do Digital Twin. A principal restrição técnica deste projeto reside na obrigatoriedade de uso do modelo hidrodinâmico MOHID, que será usado para prever a evolução do derrame de hidrocarbonetos e o impacto da utilização de equipamentos de controlo de poluição marítima, como é o caso das barreiras e dos recuperadores. Relacionado com esta restrição, temos a obrigatoriedade de uso de uma máquina virtual Windows para executar o software MOHID, uma vez que o executável fornecido é compatível com o sistema operacional Windows 10 ou 11. Relativamente à restrição R2, os dados meteo-oceanográficos fornecidos pelos parceiros do projeto são referentes à zona costeira de Lisboa, pelo que ao testar o Digital Twin esta restrição deve ser respeitada. Por fim, a tecnologia de base de dados a usar deve ser SQL ou NoSQL, uma vez que é uma das restrições especificadas num dos documentos de requisitos do projeto.

Tabela 4.3: Restrições do Digital Twin

ID Restrição	Descrição
R1	A previsão da evolução do derrame, assim como o efeito do uso de equipamentos de controlo de poluição deve ser feito com recurso ao modelo hidrodinâmico MOHID.
R2	Os dados meteo-oceanográficos usados devem ser referentes à região costeira de Lisboa, referentes ao mês de outubro de 2021.
R3	A tecnologia usada para o armazenamento de dados na base de dados deve ser SQL ou NoSQL, dependendo da tipologia de dados a armazenar e desempenho.

De forma a tornar mais claro o papel do Digital Twin no MPCs foi apresentada a arquitetura geral do projeto e posteriormente explicado em mais pormenor o Digital Twin e as suas capacidades. De seguida, foram apresentados os requisitos funcionais e não funcionais.

No próximo capítulo será abordado o processo de implementação, através da exploração do modelo numérico MOHID, definição em equipa do modelo de entidade relacionamento e estrutura e tecnologias usadas no desenvolvimento do Digital Twin.

# Capítulo 5

## Implementação

No presente capítulo é descrito o trabalho exploratório do modelo numérico adotado. Esta etapa revelou-se essencial para compreender de que forma poderia ser aplicado, as suas capacidades e quais as informações úteis no contexto do problema. De seguida, é apresentada a definição do modelo ER que facilitou a integração e funcionamento eficiente dos diferentes módulos do projeto. Por fim, serão abordados os componentes do protótipo de Digital Twin desenvolvido e as tecnologias usadas.

### 5.1 Exploração do modelo numérico

Para a implementação de um Digital Twin, é necessária uma alimentação contínua de dados reais. No contexto deste projeto é necessário que o utilizador seja capaz de observar a evolução do derrame de hidrocarbonetos ou outras substâncias poluentes perigosas. Na impossibilidade de obtenção de dados reais, foi usado o simulador MOHID que é alimentado com dados hidrodinâmicos e meteorológicos de uma zona costeira, recolhidos ao longo do mês de outubro de 2021. Através destes dados e da especificação do local exato da ocorrência do derrame, quantidade derramada e tipo de substância poluente, entre outros, o software é capaz de simular a evolução da mancha.

Na figura 5.1 é apresentada a configuração base do modelo de dispersão do petróleo fornecida pela equipa de desenvolvimento do MOHID, organizada em 4 diretorias distintas. A pasta *data* contém ficheiros de configuração de opções de cálculo. Na pasta *General Data* podemos encontrar ficheiros de dados gerais, tais como correntes, ventos, batimetria e linha de costa. A pasta *exe* é a diretoria de execução do programa. Por fim, a pasta *res* é a diretoria onde são escritos os resultados da simulação.

Na diretoria *exe*, encontra-se um ficheiro batch denominado *RunMOHID.bat* que deve ser usado para executar o modelo. Dentro desta diretoria encontram-se também os ficheiros *Tree.dat* e *nomfich.dat*. O ficheiro *Tree.dat* contém informação sobre o caminho completo para a diretoria de execução. Por outro lado, o ficheiro *nomfich.dat* contém os caminhos dos ficheiros de configuração do modelo

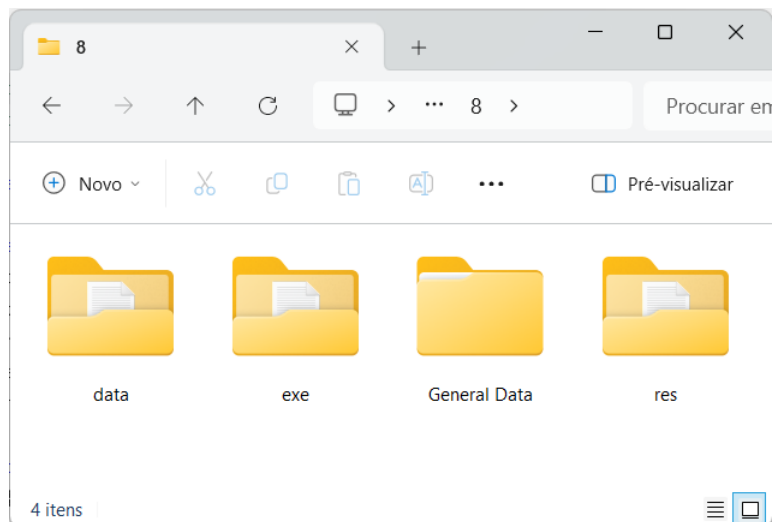


Figura 5.1: Diretoria Geral de uma simulação do modelo MOHID

presentes na diretoria *data* e para os ficheiros de resultados que serão criados na diretoria *res*. Ao executar, o MOHID irá usar a diretoria apresentada no ficheiro *Tree.dat* para encontrar o ficheiro *nomfich.dat*.

Na figura 5.2 é apresentada a diretoria *data* e os ficheiros de configuração dos módulos do modelo. Esta configuração base já se encontra pronta a utilizar, pelo que para a criação de novos cenários de simulação apenas é necessário alterar os módulos *Model* e *Lagrangian*.

No módulo *Model* podem ser especificados os seguintes parâmetros:

- Data e hora de início da simulação
- Data e hora de fim da simulação
- Passo temporal de integração do modelo

No módulo *Lagrangian* podem ser especificadas as propriedades do derrame, tais como:

- Origem derrame
- Volume derramado
- Hidrocarboneto derramado
- Tipo de hidrocarboneto

O módulo *Lagrangian* permite ainda a colocação de barreiras e recuperadores. Através deste módulo é possível gerar ficheiros de reinicialização, de forma a permitir a iniciar uma nova simulação a partir de outra previamente calculada (considerando para o efeito como condições iniciais as condições escritas no ficheiro de reinicialização).



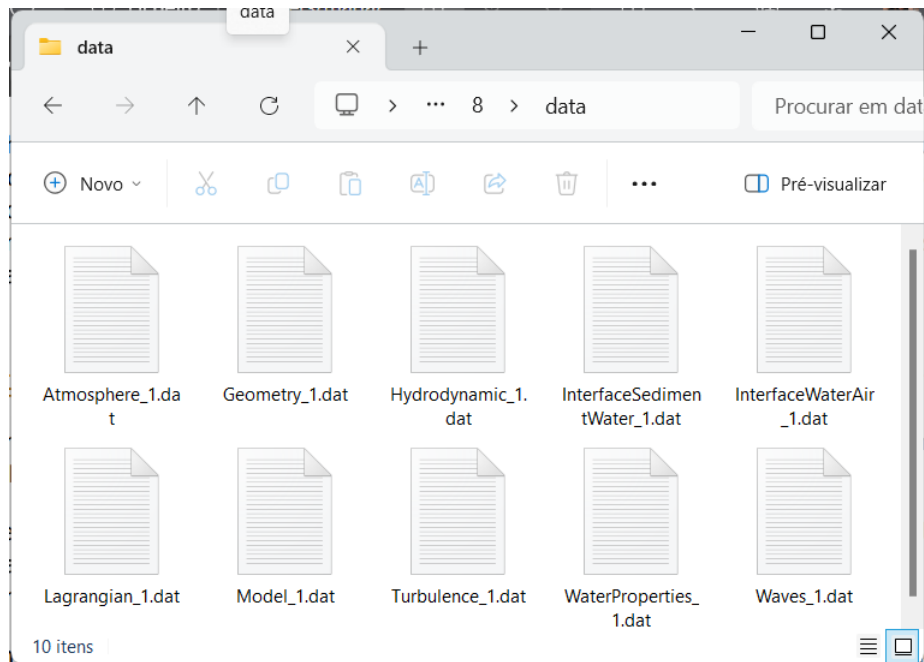


Figura 5.2: Conteúdo da diretoria *data*

A criação de um novo cenário de simulação envolve a réplica da diretoria geral do modelo, apresentada na figura 5.1. De seguida, é necessário alterar os módulos *Model* e *Lagrangian*, para incluir as datas de início e fim de simulação, bem como todas as características que definem o derrame. Após estas alterações é necessário correr o ficheiro *RunMOHID.bat* para execução do modelo.

Na figura 5.3 podemos analisar a organização da diretoria *res* e os ficheiros gerados após a execução do modelo. O ficheiro *Lagrangian\_1.hdf5*, é um dos ficheiros apresentados e contém toda a informação sobre a evolução da mancha de petróleo. O ficheiro *Lagrangian\_1.fin* apresentado é o ficheiro de reinicialização final da simulação. Nesta figura estão representados também os ficheiros de reinicialização intermédia, que seguem a seguinte estrutura: *Lagrangian\_EXE\_data-hora.fin*, sendo *EXE* o número da execução da simulação (o exemplo apresentado apenas possui uma execução) e *data-hora* a data e hora correspondentes às condições escritas no ficheiro.

Após a execução inicial do modelo podemos usar um dos ficheiros de reinicialização intermédia para gerar uma nova execução a partir de um estado intermédio de simulação. Esta funcionalidade é geralmente útil para a colocação ou remoção de barreiras e recuperadores. Para o efeito, é necessário duplicar e alterar os ficheiros *Model* e *Lagrangian*, para incluir as novas opções de cálculo. Para facilitar a gestão dos ficheiros de configuração e de resultados, o nome dos ficheiros inclui o número da execução correspondente. Adicionalmente, é necessário incluir no ficheiro *nomfich.dat* (presente na diretoria *exe*) o ficheiro de reinicialização intermédio desejado, indicar a diretoria para guardar o resultado da execução, bem como os novos ficheiros *Model* e *Lagrangian* e o nome do ficheiro *hdf5* a gerar no final da simulação com informação sobre a evolução da mancha de petróleo.

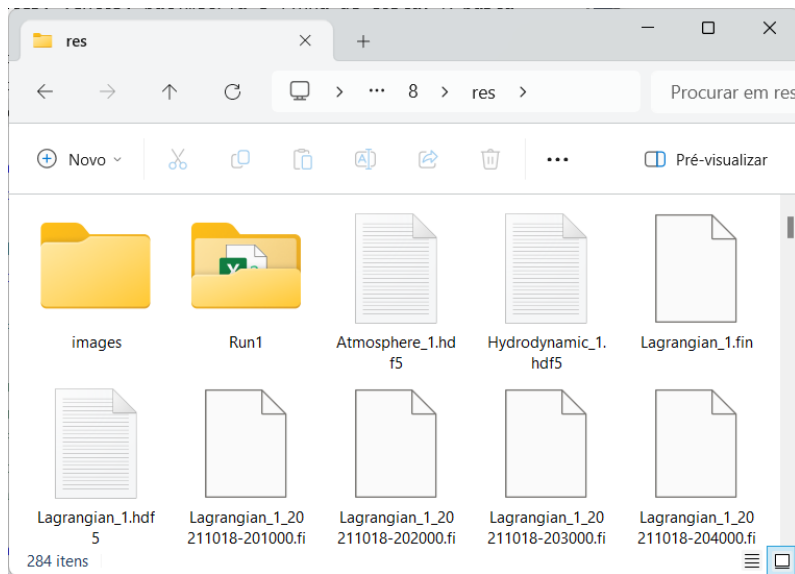


Figura 5.3: Exemplo de ficheiros gerados após a execução do simulador

Na diretoria *res\Run1* apresentada na figura 5.3, são guardados os ficheiros que resultam da primeira execução do modelo. Na figura 5.4 são apresentados esses ficheiros. No ficheiro *OilBeachingStats\_1.dat* são apresentados dados relacionados com a chegada de petróleo à costa enquanto que no ficheiro *Output.sro* são apresentados diversos dados relacionados com as propriedades dos poluentes, nomeadamente, densidade, massa e volume total, volume (recolhido, evaporado, sedimentado, dissolvido, entre outros) e volume de poluente que chegou à costa. Na figura 5.5 é apresentado o conteúdo do ficheiro *OilBeachingStats\_1.dat*. Na figura 5.6 é apresentado um exemplo de evolução do derrame de hidrocarbonetos como resultado da simulação.

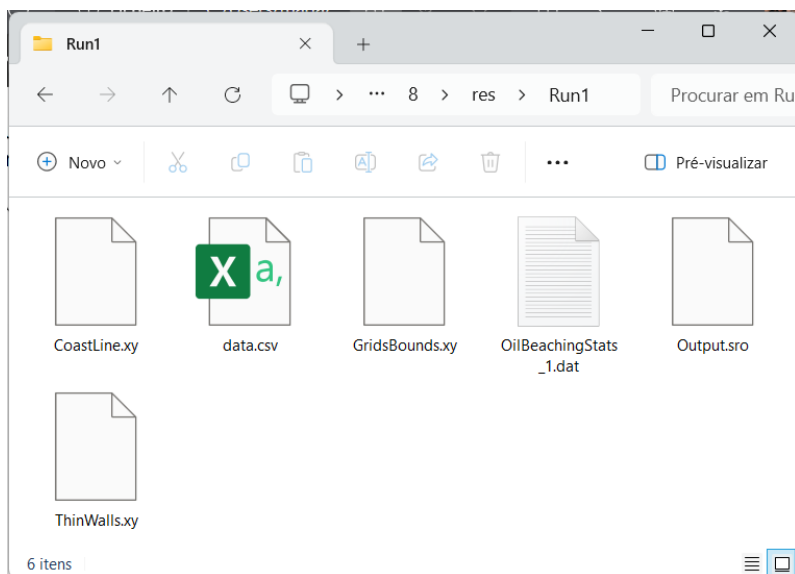


Figura 5.4: Exemplo de ficheiros gerados na diretoria *Run1* após a execução do simulador

```
OilBeachingStats_1.dat - Bloco de notas
Ficheiro  Editar  Ver
START      : 2021. 10.  2. 12.  0.  0.0
END        : 2021. 10.  3. 12.  0.  0.0
HAS_BEACHED : 1
MAX_VOL_OIL_BEACHED : 354.66
MIN_DISTANCE_TO_COAST : 0.000
MINIMUM_BEACHING_TIME : 43920.0
BEACH_COASTLINE_LENGTH : 3092.2
Ln 1, Col 1 | 100% | Windows (CRLF) | UTF-8
```

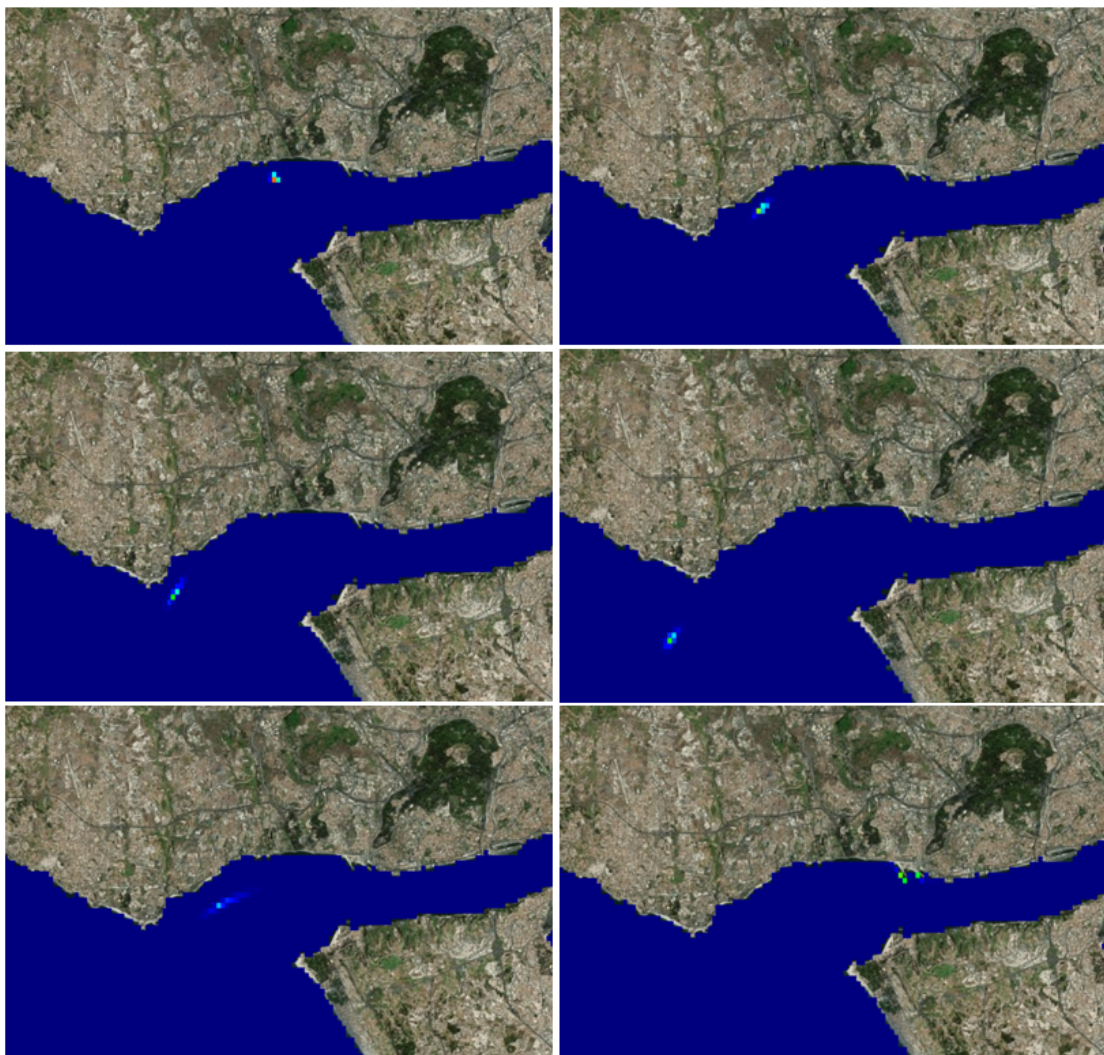
Figura 5.5: Conteúdo do ficheiro *OilBeachingStats\_1.dat*

Figura 5.6: Evolução do derrame de hidrocarbonetos

A análise efetuada demonstra-se útil para compreender de que forma é feita a organização dos ficheiros do modelo em estudo e como se pode criar e executar uma nova simulação. Adicionalmente, é possível identificar alguns dos dados

relevantes para o funcionamento do DT. É necessário guardar dados indicativos da chegada do petróleo à costa (por exemplo, volume), propriedades do petróleo (por exemplo, densidade, volume) uma vez que as suas características se vão alterando com a passagem do tempo e as coordenadas do polígono que define a área do derrame.

O modelo matemático MOHID não se encontrava preparado para integração no Digital Twin, pelo que foi necessária a criação de alguns scripts para fazer a gestão dos ficheiros e diretorias do MOHID e efetuar a sua execução, bem como o tratamento de dados.

Para gerir os ficheiros e diretorias do MOHID foram criados scripts que envolvem a criação das diretorias necessárias à execução do MOHID, bem como a alteração dos ficheiros de configuração consoante o pedido efetuado. De seguida, é apresentado o método desenvolvido em Python usado para executar o MOHID após a configuração do modelo.

```
def runMOHID(dir):  
  
    os.chdir("MOHID\\" + dir + "\exe")  
    exe = "RunMOHID.bat"  
  
    p = Popen(exe)  
    stdout, stderr = p.communicate()  
  
    return p.returncode
```

Após a execução do MOHID, é chamado um script para realizar a extração das métricas necessárias ao Digital Twin e coloca-as num ficheiro denominado *data.csv*. O script desenvolvido é apresentado no apêndice C. Na figura 5.8 pode ser visto o conteúdo deste ficheiro, que contém para cada registo:

- Data e hora
- Volume que chegou à costa
- Volume de poluente inalterado
- Volume evaporado
- Volume dispersado
- Volume sedimentado
- Volume dissolvido
- Volume recolhido
- Volume emulsificado
- Conjunto de pontos que definem a localização da macha

Os dados apresentados neste ficheiro são obtidos através dos ficheiros *Output.sro* (apresentado na figura 5.4) e *Lagrangian\_x.hdf5* (apresentado na figura 5.3), sendo *x* o número da execução do modelo a que os dados dizem respeito.

## 5.2 Modelo entidade relacionamento

Previamente à implementação, foi necessário definir em equipa o modelo ER a implementar uma vez que este constitui um elemento comum a todos os módulos. Neste modelo foram incluídas as entidades e respetivos atributos a ser criados no projeto MPCs. Este modelo foi sofrendo algumas alterações durante o processo de desenvolvimento. A definição das entidades *mohid\_realtime* e *mohid\_result*, *hydrocarbon* foram da responsabilidade da autora, que também colaborou na definição das entidades *incident*, *skimmer* e *boom*.

A análise descrita na secção anterior foi fulcral para a identificação dos dados a serem passados ao Digital Twin e consequentemente a adicionar ao modelo ER. O modelo desenvolvido é apresentado na figura 5.7, e novamente no apêndice B, na figura B.1 de forma mais legível.

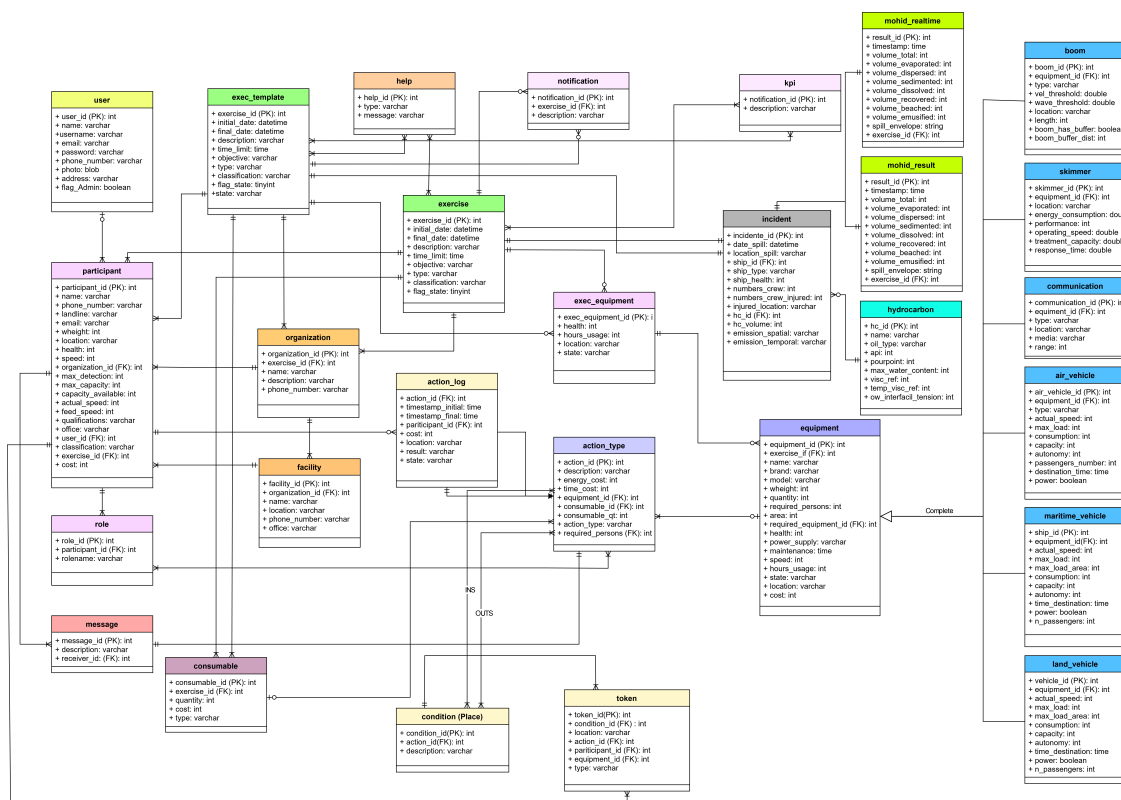


Figura 5.7: Modelo Entidade Relacionamento

Neste modelo é apresentada uma entidade denominada *mohid\_realtime*. Através desta entidade é possível guardar o estado atual do derrame, incluindo localização da mancha, e volume total.

A entidade *mohid\_result* segue uma estrutura semelhante a *mohid\_realtime*, possuindo os mesmos atributos que a anterior. A diferença entre as duas reside na particularidade da entidade *mohid\_result* guardar métricas referentes à evolução da mancha sem qualquer intervenção humana. Desta forma, no final do exercício é possível avaliar o impacto da intervenção da equipa de resposta através da comparação das duas entidades.

As entidades *hydrocarbon*, *incident*, *skimmer* e *boom* possuem atributos importantes para o Digital Twin, sendo necessários ao MOHID para efetuar a previsão da deriva dos hidrocarbonetos.

### 5.3 Componentes do Digital Twin

Na presente secção serão exploradas as tecnologias adotadas na construção do Digital Twin. Como referido na subsecção 4.2.2, uma das restrições da implementação do Digital Twin reside na obrigatoriedade de uso do modelo hidrodinâmico MOHID, o que implica o uso de uma máquina virtual Windows para a sua execução. De forma a não propagar esta restrição para o projeto MPCS, e para minimizar a dependência entre o Digital Twin e os restantes módulos, optou-se por dividir o Digital Twin em dois elementos principais.

O Digital Twin é composto por uma REST API e por uma componente na aplicação Spring Boot na qual foram desenvolvidos os restantes módulos. Através do componente presente na aplicação Spring Boot é possível interagir com a API recorrendo a pedidos HTTP. A abordagem adotada possibilita a escalabilidade, manutenção e evolução do Digital Twin de forma mais autónoma.

A REST API é usada como o ponto de entrada para a interação, manipulação e execução do modelo numérico MOHID, responsável pela simulação da deriva do derrame. Após encaminhamento do pedido HTTP para o *endpoint* correto, é efetuado o tratamento do pedido. Este processo envolve a recolha e verificação dos dados passados para o *endpoint* e consiste na passagem dos dados para um script responsável pela atualização dos dados de configuração do MOHID, bem como gestão de ficheiros necessários à execução do modelo. Após a execução do script, o MOHID é executado e o resultado da simulação é tratado e enviado para o cliente.

O componente do Digital Twin na aplicação Spring Boot funciona como uma ponte entre a REST API e os restantes módulos do sistema e consiste numa classe *Request* que envia os pedidos para a API e faz o seu tratamento. Após a criação de um novo exercício, colocação ou remoção de equipamentos de contenção do derrame, a aplicação invoca o método correspondente da classe *Request*. Através desta classe, é possível gerar o pedido HTTP a enviar à API e fazer o tratamentos dos dados fornecidos em resposta, permitindo assim a atualização do estado atual do derrame na base de dados.

Nas subsecções seguintes serão explicados os dois elementos do Digital Twin em maior pormenor.

### 5.3.1 REST API para interação com o MOHID

Na presente subsecção serão abordadas as tecnologias e implementação da REST API desenvolvida. De seguida, serão apresentados os *endpoints* disponíveis, bem como os parâmetros necessários para cada um deles.

Para o desenvolvimento da API foi usado Node.js, juntamente com a framework Express. A escolha do Node.js deve-se à sua capacidade de gestão de uma grande quantidade de conexões simultâneas de forma não bloqueante. Por outro lado, a framework Express ajuda a simplificar o processo de desenvolvimento da API, tornando-o mais rápido e eficiente.

O servidor MPCs suporta a execução de exercícios simultâneo, pelo que, a API deve ser capaz de diferenciar os exercícios. Desta forma, todos os pedidos enviados necessitam obrigatoriamente de indicar o *id* do exercício a que o pedido diz respeito. A API possui uma estrutura partilhada que faz a gestão do número de execuções, estado das execuções (terminada, em espera ou a executar), bem como hora de fim da última execução, para cada um dos exercícios. Esta estrutura é necessária por diversos motivos, nomeadamente: evitar execuções do modelo desnecessárias, gerir a criação e acesso aos ficheiros e para permitir a execução sequencial dos pedidos.

Apesar da API permitir a execução de 2 ou mais pedidos em simultâneo, não é possível executar pedidos simultâneos referentes ao mesmo exercício. A razão desta impossibilidade reside no facto de à exceção do pedido de simulação inicial, todos os outros pedidos de simulação usarem um estado pré calculado da simulação anterior. Desta forma, se a API receber um pedido enquanto o anterior ainda está a ser processado, este pedido tem de aguardar enquanto o anterior termina. Esta restrição foi implementada através do acesso à informação presente na estrutura partilhada referida anteriormente, acompanhada de semáforos para controlar a alteração e acesso à informação.

Nas subsecções seguintes são apresentados os *endpoints* da API e os parâmetros que recebem. Todos os *endpoints* possuem um script em Python associado, por exemplo, para o *endpoint* `"/api/start/` existe um ficheiro denominado *start.py* que é chamado com os parâmetros recebidos no endpoint. Estes scripts em python associados aos *endpoints* efetuam as alterações necessárias aos ficheiros de configuração do MOHID. Após as alterações dos ficheiros de configuração, o script corre o ficheiro *RunMOHID.bat* que executa o MOHID. Ao terminar a execução do MOHID, os dados são tratados e colocados num ficheiro que é enviado como resposta.

#### Início de simulação

Através do *endpoint* `"/api/start/`, é possível efetuar o pedido de uma nova simulação. Para o efeito, devem ser enviados obrigatoriamente os seguintes parâmetros:

- *id* do exercício







## Recálculo da simulação

Através do *endpoint* `"/api/recalculate/"`, é possível aplicar as condições de simulação anteriores e simular a evolução da mancha para o intervalo temporal fornecido ao simulador. O componente do Digital Twin executa este *endpoint* a cada 3 horas de simulação para pedir a atualização do estado atual do derrame. Para o efeito, devem ser enviados obrigatoriamente os seguintes parâmetros:

- *id* do exercício
- Hora de início e fim de simulação

Este *endpoint* foi criado com vista a diminuir o tempo de execução do MOHID e evitar efetuar cálculos desnecessários.

Antes de efetuar o recálculo, é verificado se a hora de fim de simulação fornecida é posterior à hora de fim da simulação anterior. Se esta condição se verificar, é enviado o pedido de recálculo para o simulador, caso contrário é enviada como resposta uma mensagem com código 204 e mensagem *"There's no need to recalculate"*.

À semelhança do *endpoint* anterior, caso as condições para efetuar o recálculo se verifiquem, este *endpoint* retorna como resposta um ficheiro *data.csv*, que contém informações sobre a localização da mancha, bem como informações sobre o volume de poluente ao longo do tempo de simulação fornecido por parâmetro.

## Colocação de barreira na simulação

Através do *endpoint* `"/api/putBoom"`, é possível colocar uma barreira para conter o derrame. Para o efeito, devem ser enviados obrigatoriamente os seguintes parâmetros:

- *id* do exercício
- Hora de início e fim de simulação
- *id* da barreira
- Nome da barreira
- Velocidade a partir da qual a barreira não consegue conter partículas em *m/s*
- Altura significativa das ondas a partir da qual a barreira não consegue conter partículas em *m*
- Pontos que definem a barreira

À semelhança dos *endpoints* anteriores, este *endpoint* retorna como resposta um ficheiro *data.csv*.

### Remoção de barreira da simulação

O *endpoint* `"/api/removeBoom"`, permite a remoção de uma barreira previamente colocada. Para o efeito, devem ser enviados obrigatoriamente os seguintes parâmetros:

- *id* do exercício
- Hora de início e fim de simulação
- *id* da barreira

À semelhança dos *endpoints* anteriores, este *endpoint* retorna como resposta um ficheiro *data.csv*.

### Colocação de recuperador na simulação

Através do *endpoint* `"/api/putSkimmer"`, é possível a colocação de um recuperador. Para o efeito, é necessário fornecer os seguintes parâmetros:

- *id* do exercício
- Hora de início e fim da simulação
- TIMESTEP
- Tipo de cálculo da remoção mecânica
- Taxa de petróleo removido mecanicamente em *l/h*

À semelhança dos *endpoints* anteriores, este *endpoint* retorna como resposta um ficheiro *data.csv*.

### Remoção de recuperador da simulação

Através do *endpoint* `"/api/removeSkimmer"`, é possível remover um recuperador. Para o efeito, é necessário fornecer de os seguintes parâmetros:

- *id* do exercício
- Hora de início e fim de simulação
- Taxa de petróleo removido mecanicamente em *l/h*

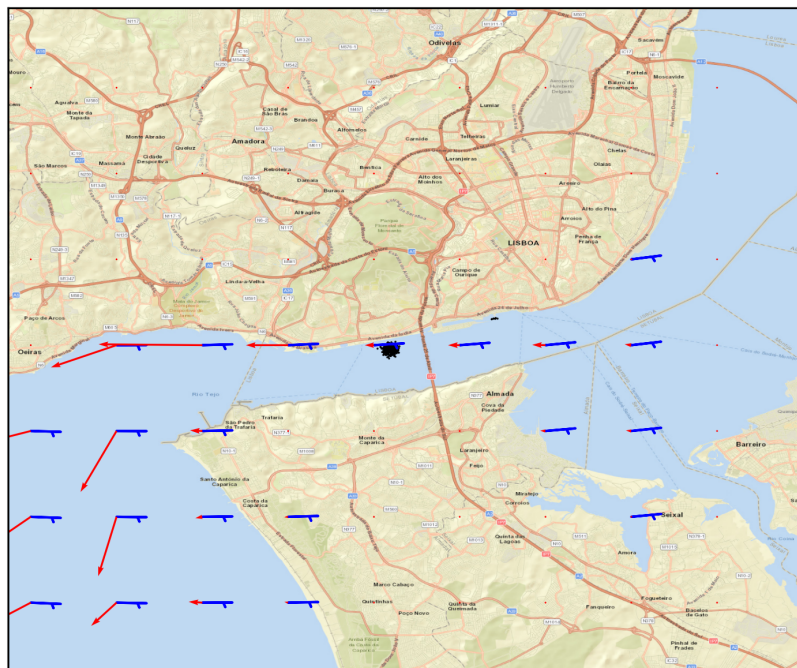
À semelhança dos *endpoints* anteriores, este *endpoint* retorna como resposta um ficheiro *data.csv*.

## Geração de imagem aérea com indicadores de marés e ventos

Através do *endpoint* `"/api/download/image"`, é possível solicitar uma imagem satélite do local do derrame. Para o efeito, é necessário fornecer os seguintes parâmetros:

- *id* do exercício
- Hora do pedido

Este *endpoint*, retorna como resposta uma imagem aérea em formato *png*. Nesta imagem podem ser incluídas informações sobre ventos e correntes, bem como a localização de equipamentos de contenção, como é o caso das barreiras. A figura 5.9 representa um exemplo de uma imagem obtida através deste *endpoint*.



11/10/2021, 08:00:00

Figura 5.9: Imagem aérea obtida através do *endpoint* `"/api/download/image"`

Na figura 5.9 encontram-se representadas as informações sobre os ventos (representados a azul com *wind barbs*) e correntes (representadas a vermelho com setas).

## Simulação de resposta a pedido de simulação

Através do *endpoint* `"/api/download/gif"`, é possível solicitar uma previsão do estado futuro da mancha, sendo o resultado uma imagem animada. Para o efeito, é necessário fornecer os seguintes parâmetros:



### 5.3.2 Componente do Digital Twin na aplicação Spring Boot

A principal funcionalidade do componente do Digital Twin na aplicação Spring Boot consiste na gestão dos pedidos efetuados à API, efetuando o tratamento da informação enviada e recebida, bem como a atualização do estado da simulação na base de dados.

Uma das restrições abordadas anteriormente, diz respeito ao facto dos dados meteorológicos e hidrodinâmicos disponíveis serem referentes ao mês de outubro de 2021, pelo que o MOHID deve receber um intervalo temporal que respeite esta restrição. Desta forma, foram criados dois métodos que fazem a conversão do tempo de simulação usado no exercício para o intervalo de simulação recebido pelo MOHID e vice versa.

A componente do Digital Twin possui na classe *Request* métodos para gerar pedidos para cada um dos *endpoints* da API mencionados na secção anterior. Desta forma, para gerar um pedido à API basta invocar o método correspondente da classe *Request*. Parte do código de gestão do pedido é apresentado de seguida:

```
url = new URL("http://10.17.0.174:3000" + request);  
  
URLConnection connection = (URLConnection)  
    url.openConnection();  
connection.setRequestMethod("GET");  
  
int responseCode = connection.getResponseCode();
```

No código apresentado anteriormente, *request* representa uma string com o *endpoint* e parâmetros necessários. A ligação é efetuada ao endereço e porto da máquina virtual na qual a API se encontra.

Na secção anterior foram apresentados os ficheiros obtidos nos *endpoints* da API. À exceção dos *endpoints* para obtenção de uma imagem aérea, pedido de simulação e relatório atmosféricos, todos os outros *endpoints* retornam um ficheiro denominado *data.csv* com informação sobre a evolução da mancha. A componente do Digital Twin usa as informações presentes neste ficheiro para fazer a atualização do estado da mancha na base de dados.

No caso do pedido de início de simulação, os dados presentes no ficheiro *data.csv* são usados para popular as tabelas *mohid\_result* e *mohid\_realtime*. No caso dos restantes pedidos, a componente do Digital Twin obtém o timestamp do primeiro registo presente no ficheiro *data.csv* e apaga todas as entradas da tabela *mohid\_realtime* que possuam um timestamp igual ou superior. Desta forma, é garantido que a informação apresentada na base de dados representa de forma precisa e em tempo real a evolução do derrame. Por outro lado, através das informações presentes na tabela *mohid\_result*, é possível verificar o impacto das decisões das equipas de resposta.

## 5.4 Monitorização do exercício de combate à poluição

Para a avaliação de desempenho é importante definir indicadores de desempenho, deste modo, os parceiros do projeto identificaram como indicadores de desempenho global dados como tempos de tomada de decisões, volume de hidrocarboneto recolhido e contido, custo humano, custo operacional, número de pessoas feridas, número de mortos, número de equipamentos avariados e número de equipamentos danificados.

Na figura 5.11 é apresentado o dashboard gerado pelo componente do Digital Twin que permite aceder em tempo real às métricas do derrame, bem como verificar a saúde dos participantes e equipamentos presentes no exercício.

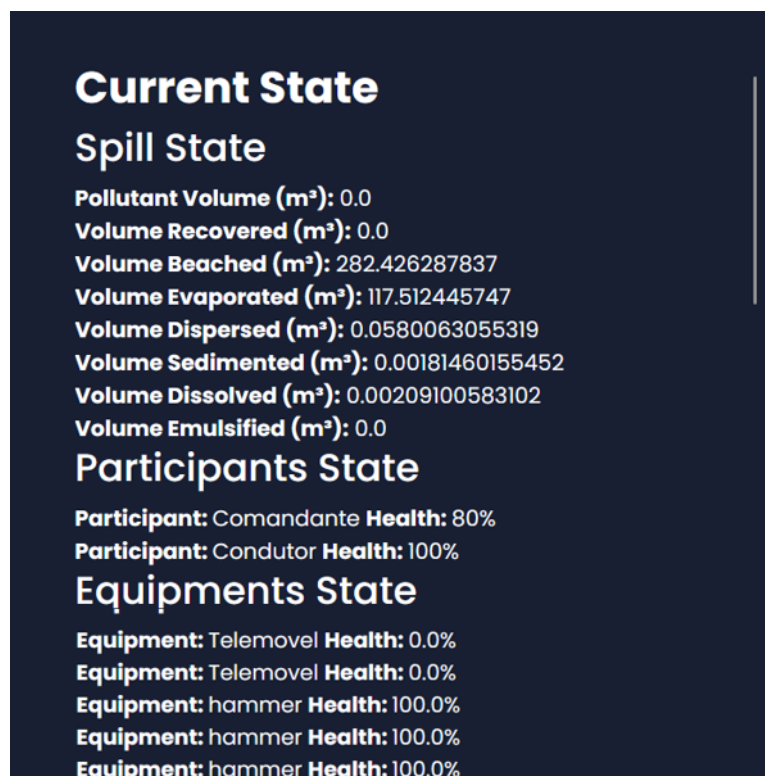


Figura 5.11: Dashboard com indicadores referentes ao estado atual da simulação

Na figura 5.12 é apresentado o relatório do estado final da simulação desenvolvido. Este relatório pode ser acedido após o término dos exercícios e possui alguns dos indicadores referidos como importantes, tais como: custo humano e operacional, número de avarias, mortos e feridos. Através da análise deste relatório é também possível comparar os volumes de poluente no final do exercício, com o estado do derrame no caso de não haver intervenção da equipa de resposta.

**Spill Final State**

Pollutant Volume (m<sup>3</sup>): 665.714492713  
Volume Recovered (m<sup>3</sup>): 0.0  
Volume Beached (m<sup>3</sup>): 0.0  
Volume Evaporated (m<sup>3</sup>): 134.28135963  
Volume Dispersed (m<sup>3</sup>): 4.28611460864E-4  
Volume Sedimented (m<sup>3</sup>): 1.34081806459E-5  
Volume Dissolved (m<sup>3</sup>): 0.0  
Volume Emulsified (m<sup>3</sup>): 0.0

**Spill Final State Without Intervention**

Pollutant Volume (m<sup>3</sup>): 450.30532423  
Volume Recovered (m<sup>3</sup>): 0.0  
Volume Beached (m<sup>3</sup>): 215.409156855  
Volume Evaporated (m<sup>3</sup>): 134.28135963  
Volume Dispersed (m<sup>3</sup>): 4.3988677184E-4  
Volume Sedimented (m<sup>3</sup>): 1.37609043134E-5  
Volume Dissolved (m<sup>3</sup>): 0.00370563726413  
Volume Emulsified (m<sup>3</sup>): 0.0

Injured People: 0  
Deceased: 0  
Malfunctions: 0  
Lost equipment: 0  
Equipment Cost: 180 €  
Human Cost: 616 €

Figura 5.12: Relatório do desempenho global dos participantes

No presente capítulo foi apresentado o trabalho de exploração do modelo numérico, o modelo ER desenvolvido em equipa para o projeto, a estrutura e tecnologias usadas no desenvolvimento e alguns ecrãs desenvolvidos para fornecer ao utilizador informação sobre o estado da mancha e dos elementos presentes no exercício.

No próximo capítulo serão apresentados os testes e a avaliação realizada ao sistema após a sua implementação. Além disso, serão introduzidos 6 *design principles*, um dos resultados típicos de DSR, sugerindo guias orientadoras para design de soluções similares, úteis para o futuro.





# Capítulo 6

## Testes e Avaliação

No presente capítulo serão abordados os testes realizados e a avaliação do protótipo de Digital Twin desenvolvido. Na primeira secção são apresentadas as configurações do ambiente usado para testar o sistema, bem como as características do derrame. Nesta secção são também apresentados os resultados dos testes efetuados à base de dados e para configuração da simulação. De seguida, é apresentada a avaliação efetuada ao protótipo e as oportunidades de melhoria.

### 6.1 Configuração do ambiente de testes

Antes de iniciar os testes ao protótipo desenvolvido é importantes especificar as características do ambiente de simulação. Desta forma, para a realização dos testes, foi usada uma máquina virtual hospedada nos servidores do Departamento de Engenharia Informática da Universidade de Coimbra com um sistema operativo Windows Server 2019 Standard com 8 vCPUs, 16 GB RAM e 50 GB de armazenamento.

De forma a garantir a consistência dos resultados apresentados, foi utilizado o mesmo derrame para todas as simulações efetuadas. As suas características são apresentadas de seguida:

- **Data de início:** 2021/10/11 00:00:00
- **Nome Origem:** Oil spill
- **Tipo de emissão espacial:** Accident
- **Tipo de emissão temporal:** Instantaneous
- **Origem do derrame:** (38.702958, -9.155112)
- **Volume:** 400  $m^3$
- **Nome do hidrocarboneto:** Heavy Oils (Heavy Crude Oils. No. 6 Fuel Oil. Bunker C)

- **Tipo do hidrocarboneto:** Crude
- **Api:** 13
- **Temperatura a partir da qual o hidrocarboneto perde as suas propriedades de fluido:** -30 °C
- **Conteúdo máximo de água:** 80%
- **Viscosidade dinâmica de referência:** 3603 *cP*
- **Temperatura à qual foi determinada a viscosidade dinâmica de referência:** 15 °C
- **Tensão interfacial água-óleo:** 20 *Dyne/cm*

Após a definição dos valores de teste, procedeu-se à inicialização do servidor da REST API.

### 6.1.1 Configuração da simulação

O protótipo de Digital Twin deve garantir a atualização em tempo real do estado do derrame de forma a assegurar o realismo da simulação. Por conseguinte, é necessário que a atualização das condições seja efetuada de forma transparente para o utilizador.

Através do modelo matemático MOHID, é possível a configuração do passo de integração (DT) da simulação, que determina a frequência de atualização das partículas, pelo que foi necessário efetuar alguns testes de forma a encontrar o valor mais adequado no contexto do problema. À vista disso, foram testados valores de passo de integração de 1 minuto, 10 minutos e 1 hora para simulações com 1 hora, 3 horas, 6 horas, 12 horas, 1 dia e 3 dias. Para cada teste, foram efetuadas 3 execuções do modelo de forma a reduzir a influência de fatores externos (como congestionamento da rede).

Na tabela 6.1 são apresentados os resultados obtidos.

Um dos requisitos não funcionais, apresentados na secção 4.2.2 refere que o tempo de resposta do DT que deve ser inferior a 1 minuto. Desta forma, e através da análise dos resultados obtidos na tabela 6.1 podemos rapidamente verificar que para um passo de integração de 1 minuto, os tempos de execução são bastante elevados e com apenas 6 horas de simulação, este valor é ultrapassado, pelo que esta opção não é a mais adequada no contexto do problema. Para um passo de integração de 10 minutos e 12 horas de tempo de execução o valor do tempo de execução ainda é inferior ao limite de 1 minuto, enquanto que usando um passo de integração de 1 hora e simulação para 1 dia o valor médio do tempo de execução é cerca de 24 segundos. Assim, conclui-se que, o modelo é consideravelmente mais rápido usando o passo de integração de 1 hora.

Tabela 6.1: Tempo de execução do modelo

Tempo de simulação	Passo de integração	Tempo de execução	Média dos tempos de execução
1 hora	1 min	13,047 s	12,940 s
		13,423 s	
		12,350 s	
1 hora	10 min	6,335 s	6,038 s
		6,000 s	
		5,779 s	
1 hora	1 hora	2,985 s	2,837 s
		3,028 s	
		2,500 s	
3 horas	1 min	34,844 s	33,642 s
		32,349 s	
		33,733 s	
3 horas	10 min	12,985 s	11,969 s
		11,175 s	
		11,749 s	
3 horas	1 hora	4,562 s	4,307 s
		4,000 s	
		4,360 s	
6 horas	1 min	1,111 min	1,123 min
		1,124 min	
		1,134 min	
6 horas	10 min	24,048 s	24,084 s
		24,344 s	
		23,862 s	
6 horas	1 hora	7,234 s	6,671 s
		5,759 s	
		7,020 s	
12 horas	1 min	2,392 min	2,425 min
		2,446 min	
		2,435 min	
12 horas	10 min	51,614 s	52,381 s
		54,254 s	
		51,276 s	
12 horas	1 hora	11,485 s	11,009 s
		10,806 s	
		10,737 s	
1 dia	1 min	4,960 min	4,966 min
		4,985 min	
		4,953 min	
1 dia	10 min	2,130 min	2,144 min
		2,168 min	
		2,135 min	
1 dia	1 hora	22,982 s	24,009 s
		25,368 s	
		23,678 s	
3 dias	1 min	19,442 min	19,371 min
		19,303 min	
		19,368 min	
3 dias	10 min	10,942 min	11,012 min
		11,028 min	
		11,066 min	
3 dias	1 hora	2,000 min	1,982 min
		1,953 min	
		1,992 min	

Ainda assim, é importante averiguar a influência que o aumento do passo

de integração exerce sobre os resultados de simulação. Por este motivo, foram analisados os ficheiro de resultados gerados e obtidos os estados finais para um tempo de simulação de 1 dia, usando os 3 passos de integração distintos. Na tabela 6.2 é apresentada a informação sobre as métricas mais relevantes dos ficheiros de resultados obtidos, apresentando informações sobre os volumes de óleo derramado (que permanece inalterado), volume evaporado e que chegou à costa.

Através da análise dos resultados apresentados na tabela 6.2, podemos concluir que o aumento do passo de integração não exerce uma influência muito significativa sobre os resultados de simulação. Ainda assim, ao analisar os ficheiros de resultados verificou-se que não é possível a escrita de resultados de intervalos de tempo intermédios ao passo de integração. Deste modo, com um passo de integração de 1 hora só é possível obter as condições da mancha a cada 1 hora, o que não se adequa aos objetivos do protótipo.

Tabela 6.2: Impacto do passo temporal nos resultados

Passo de integração	Volume óleo ( $m^3$ )	Volume evaporado ( $m^3$ )	Volume na costa ( $m^3$ )
<b>1 minuto</b>	101,195602432	46,0713284711	252,729107551
<b>10 minutos</b>	106,364392605	46,0879130511	247,543995339
<b>1 hora</b>	95,7992173050	46,3590267806	257,837670263

Através da análise efetuada conclui-se que a melhor opção seria usar um passo de integração de 10 minutos, ainda que para tempo de simulações maiores, como é o caso da simulação para 3 dias, o tempo de execução seja superior a 10 minutos. De modo a reduzir o impacto do tempo de espera na simulação, ao criar um exercício novo, é enviado um pedido de início de simulação que simula a evolução do derrame durante todo o exercício e os jogadores só podem entrar no jogo após o término do pedido. Este pedido serve 2 propósitos principais. O primeiro é popular a tabela *mohid\_result* que será usada no final do exercício para verificar o impacto das ações dos utilizadores. O segundo diz respeito à população da tabela *mohid\_realtime* que contém informação sobre o estado atual da mancha.

Durante o exercício, de modo a manter uma atualização do estado da mancha de forma impercetível para o utilizador, optou-se por efetuar pedidos de simulação de apenas 3 horas. Deste modo, antes da colocação de equipamentos de combate (barreiras e recuperadores) o estado da mancha presente na base de dados é o estado atual. Após o uso de equipamentos de combate a atualização do estado será iterativa, melhorando assim o tempo de resposta e diminuindo cálculos desnecessários. Esta atualização iterativa é garantida por um Scheduler implementado em Java que pede uma nova simulação à REST API.

### 6.1.2 Atualização do estado atual do derrame na base de dados

A base de dados desempenha um papel importante para a atualização e obtenção do estado atual do derrame. Assim, para confirmar se a base de da-

dos possui um desempenho adequado às necessidades do projeto é necessário analisar a oscilação dos tempos de resposta com diferentes volume de dados.

Foram executados exercícios com a duração de 1, 2 e 3 dias e efetuado para cada um deles a colocação de um recuperador (como referido anteriormente, este pedido executa uma simulação com 3 horas de duração). À semelhança do teste anterior, cada um dos exercícios foi executado 3 vezes. De notar, que a execução de um exercício novo envolve a inserção de registos nas tabelas *mohid\_realttime* e *mohid\_result* enquanto que, a colocação de um equipamento envolve a remoção de registos desatualizados na tabela *mohid\_realttime* e a atualização dessa mesma tabela.

Na tabela 6.3 são apresentados os tempos obtidos. É possível verificar que o preenchimento da base de dados de uma simulação de 3 dias demora cerca do triplo do tempo que demora o preenchimento de uma simulação de 1 dia. Esta situação não é ideal e pode ser um ponto de melhoria no futuro. Contudo, não influencia diretamente o desempenho do Digital Twin na representação do estado atual no exercício uma vez que este preenchimento é efetuado antes do início do exercício. Por outro lado, a colocação de um recuperador (que envolve uma simulação de 3 horas) mantém valores quase constantes e bastante baixos. Para a obtenção dos valores da tabela 6.3 é apresentada a colocação de um recuperador, contudo seria equivalente colocar ou remover outro equipamento ou até mesmo efetuar um pedido de recálculo uma vez que o tempo de simulação destes pedidos é semelhante.

Tabela 6.3: Tempos de execução de um pedido à API e colocação de um recuperador

	Pedido de simulação		Colocação recuperador	
	Tempo pedido API	Tempo população base de dados	Tempo pedido API	Tempo população base de dados
<b>1 Dia</b>	1,770 min	3,698 s	9,868 s	0,246 s
	1,992 min	4,369 s	12,337 s	0,262 s
	1,789 min	4,447 s	15,668 s	0,258 s
<b>Média</b>	1,850 min	4,171 s	12,624 s	0,255 s
<b>2 Dias</b>	4,910 min	8,014 s	9,797 s	0,291 s
	4,955 min	7,949 s	9,626 s	0,256 s
	4,951 min	8,012 s	12, 275 s	0,248 s
<b>Média</b>	4,939 min	7,992 s	10, 566 s	0,265 s
<b>3 Dias</b>	9,685 min	15,576 s	9,728 s	0,259 s
	9,688 min	11,317 s	10,655 s	0,269 s
	9,544 min	11,220 s	9,937 s	0,307 s
<b>Média</b>	9,639 min	12,704 s	10,107 s	0,278 s

## 6.2 Avaliação do protótipo

Um dos aspetos fundamentais de DSR passa pela avaliação, permitindo a validação do artefacto desenvolvido, bem como a melhoria contínua e sistematização das lições aprendidas. Apresenta-se de seguida os testes de adequabilidade do modelo matemático, avaliação das funcionalidades do protótipo e os *design principles* gerados a partir do conhecimento adquirido com o desenvolvimento do presente projeto.

## 6.2.1 Teste de adequabilidade do modelo matemático

Um dos aspetos essenciais da avaliação do protótipo parte pela validação da adequação do modelo matemático e a sua capacidade de simular um comportamento realista da evolução do derrame, bem como da intervenção humana através do uso de equipamentos de combate. Esta validação foi efetuada através do deliverable 4.2 - Mathematical Models Validation Report, elaborado pelos parceiros do projeto com a colaboração da autora.

Para o efeito, foram preparadas as seguintes simulações:

- **Caso1\_AltoMar**

Deriva do hidrocarboneto durante 12 horas, em determinadas condições de mar e atmosfera, no alto mar e sem qualquer intervenção do Homem

- **Caso2\_Costa**

Deriva do hidrocarboneto durante 12 horas, em determinadas condições de mar e atmosfera, junto e a chegar à costa, sem qualquer intervenção do Homem

- **Caso3\_Porto**

Deriva do hidrocarboneto durante 12 horas, em determinadas condições de mar e atmosfera, no porto de Lisboa, sem qualquer intervenção do Homem

- **Caso4\_Barreiras**

Deriva do hidrocarboneto durante 6 horas, em determinadas condições de mar e atmosfera, sem qualquer intervenção do Homem, depois, instalação de duas barreiras em localizações distintas e deriva do hidrocarboneto durante as 6 horas seguintes

- **Caso5\_Recuperadores**

Deriva do hidrocarboneto durante 6 horas, em determinadas condições de mar e atmosfera, sem qualquer intervenção do Homem, depois, instalação de dois recuperadores e deriva do hidrocarboneto durante as 6 horas seguintes

Os dados usados na criação das simulações, bem como o link para visualização podem ser encontrados no apêndice D.

## 6.2.2 Demonstração das funcionalidades aos especialistas do domínio

De forma a avaliar o resultado do desenvolvimento efetuado seguindo a metodologia DSR, foi realizada uma reunião para apresentação do trabalho desenvolvido no MPCs na qual foram demonstradas as contribuições do protótipo do Digital Twin desenvolvido.

Foi criado um exercício através do MPCs com 4 utilizadores que demonstraram como usar o sistema para seguir o protocolo definido para combate à poluição marítima. Durante esta fase foi realizada a apresentação detalhada das funcionalidades do sistema. De destacar a integração do protótipo desenvolvido que, além de ir de encontro aos requisitos funcionais definidos, eleva a eficiência geral do projeto, proporcionando realismo à simulação e informação em tempo real das propriedades do derrame, bem como, do estado dos equipamentos e participantes.

Através da demonstração, verificou-se que a integração do protótipo enriqueceu a experiência do utilizador contribuindo para a simulação realista da evolução do derrame, colocação de equipamentos de contenção e verificação do seu impacto em tempo real.

Durante a apresentação das funcionalidades houve um período de discussão e dúvidas, na qual os parceiros do projeto puderam expressar as suas dúvidas e sugestões. Este diálogo demonstrou a relevância do protótipo desenvolvido em relação às necessidades do projeto, nomeadamente através do ecrã apresentado na figura 5.11.

Desta forma, a reunião de apresentação do projeto não só possibilitou a validação das funcionalidades do protótipo, como também permitiu a recolha de sugestões para melhoria do projeto, garantindo que o mesmo se adequa às necessidades dos utilizadores finais.

### 6.3 *Design principles*

Como referido anteriormente, a metodologia DSR tem como objetivo propor oferecer abordagens inovadoras para a resolução de um problema, gerando conhecimento (Herner et al., 2004). Em DSR, são usados *design principles* para descrever de forma simples, o conhecimento gerado a partir do processo de design e implementação (Gregor et al., 2020).

Neste contexto, são apresentados seis *design principles* concebidos para Digital Twins em cenários de controlo de poluição marítima. Estes *design principles* emergem de DSR, e têm como objetivo fornecer diretrizes claras e abrangentes, orientando a futura implementação de Digital Twins em contextos similares (Dias et al., 2023):

*Design principle 1: Os Digital Twins para controlo de poluição marítima devem fornecer feedback em tempo real sobre o impacto das decisões. Durante a análise de requisitos, foram reunidas evidências de que as equipas de resposta precisam de conhecer o impacto das suas ações o mais rapidamente possível de forma a aplicar medidas corretivas.*

*Design principle 2: Assegurar o desempenho do controlo de poluição marítima pode incluir medidas quantitativas baseadas na previsão do impacto e análise qualitativa. Através do contacto com especialistas, foi possível identificar métricas relevantes do impacto físico (por exemplo, volume de poluente recolhido e volume de polu-*

ente que atingiu a costa). Verificou-se também a relevância da análise pós-evento para reflexão, exigindo detalhes sobre o contexto das decisões tomadas (através da análise dos ficheiros de log).

*Design principle 3: Interoperabilidade do modelo físico e dos componentes responsáveis pela interação com os utilizadores.* Durante a execução do exercício, é necessário garantir o acesso aos dados obtidos com o modelo físico (por exemplo, localização do derrame e da barreira e fotografia aérea do local do incidente) de forma interoperável.

*Design principle 4: O Digital Twin pode ser complementado com a plataforma de e-learning para fornecer os conceitos necessários aos utilizadores do sistema.* As equipas do Digital Twin e dos conteúdos de aprendizagem devem trabalhar em sintonia para garantir a aquisição correcta dos conhecimentos necessários à aprendizagem e à formação (por exemplo, conhecimento do protocolo).

*Design principle 5: O Digital Twin deve permitir prever o comportamento da poluição.* As acções dos utilizadores influenciam direta ou indiretamente o estado do derrame, pelo que o Digital Twin deve ser capaz de prever o seu estado futuro em cada instante.

*Design principle 6: O Digital Twin deve assegurar a persistência dos dados de exercícios anteriores.* É extremamente importante conservar os dados das sessões anteriores para avaliar a evolução do desempenho do utilizador.

## 6.4 Oportunidades de melhoria

Através da análise dos resultados obtidos, bem como das funcionalidades implementadas, é possível identificar algumas oportunidades de melhoria do protótipo, tais como:

- Exploração de oportunidades para otimização da base de dados, de forma a garantir eficiência e rapidez nas operações de leitura e de escrita
- Melhoria do ecrã de dashboard apresentado na figura 5.11 através da inclusão de gráficos
- Melhoria do ecrã de relatório de desempenho apresentado na figura 5.12, através da inclusão de métricas de avaliação de desempenho dos utilizadores e gráficos
- Integração de funcionalidades para enriquecimento da experiência do utilizador

Neste capítulo foram apresentados os testes efetuados à simulação e à base de dados, através da obtenção dos tempos de execução do modelo. Os testes realizados foram usados não só para validação do protótipo, mas também para



apoio à decisão. De seguida foi apresentada a avaliação do protótipo, através da contribuição num deliverable do projeto e através de uma sessão de demonstração do projeto MPCs aos parceiros do mesmo. Adicionalmente, foram apresentados 6 *design principles* que podem ser usados como um guia para futuras implementações de Digital Twins em contextos similares. Por fim, são apresentadas as oportunidades para melhoria futura.



# Capítulo 7

## Conclusão

A presente dissertação tem como principal objetivo desenvolver um protótipo de Digital Twin para o projeto internacional MPCs. De forma a alcançar este objetivo, é apresentado no capítulo 1 o contexto e a motivação do projeto, bem como as tarefas subjacentes à implementação do protótipo de Digital Twin.

No capítulo 2 são discutidos os conceitos que servem como base ao desenvolvimento. No contexto deste trabalho é importante avaliar se o conceito de Digital Twin é possível de ser aplicado ao treino para combate à poluição marítima, e de que forma. Através do uso do MOHID e dos dados meteorológicos e hidrodinâmicos conseguimos obter os dados correspondentes à evolução do derrame, neste caso, representando os dados obtidos em tempo real. Com a apresentação destes dados, é possível usar o DT como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão.

De seguida, no capítulo 3 é apresentada a metodologia DSR, adotada no desenvolvimento do presente trabalho devido à sua abordagem centrada na criação de soluções práticas e inovadoras para a resolução de problemas e desenvolvimento iterativo. Por meio de DSR são apresentadas as diferentes fases do processo, bem como o plano de trabalho efetuado.

No decorrer do projeto, surge a necessidade de definir a arquitetura do protótipo a desenvolver, bem como delimitar a sua intervenção no projeto. Assim, no capítulo 4 é apresentada a arquitetura geral do projeto (desenvolvida em equipa), a arquitetura do Digital Twin e os requisitos funcionais e não funcionais do protótipo.

Após a definição arquitetural e identificação de requisitos, a exploração do modelo matemático MOHID apresentada no capítulo 5 foi essencial para compreender de que forma o modelo poderia ser integrado no protótipo e quais as suas funcionalidades que poderiam ser úteis no contexto do problema. Partindo das métricas obtidas através do MOHID referentes ao derrame, iniciou-se também a definição (em equipa) do modelo ER a implementar no projeto. No mesmo capítulo foram apresentados os constituintes do protótipo de Digital Twin desenvolvido: a REST API e o componente do Digital Twin.

A REST API desenvolvida possibilita a configuração e execução do MOHID,

bem como o tratamento de dados essenciais no contexto do projeto. A API permite deste modo, a criação de uma nova simulação, colocação e remoção de equipamentos de contenção, o pedido de uma imagem aérea, recalcular o estado anterior da simulação, solicitar um relatório atmosférico e pedir uma previsão do estado futuro da mancha.

Por outro lado, a componente do Digital Twin é capaz de criar e efetuar pedidos à REST API. Após a receção da resposta da API, tem como objetivo a atualização do estado da mancha, através da atualização da base de dados. Este componente é capaz de gerar em tempo real, um relatório do estado atual da simulação, incluindo métricas referentes ao estado do derrame, dos utilizadores e equipamentos (figura 5.11).

A descrição do presente trabalho termina, no capítulo 6, com a descrição da avaliação efetuada ao sistema, bem como os testes efetuados e respetivas configurações. Nesse capítulo são também apresentados as oportunidades de melhoria futura identificadas.

Os resultados desta dissertação foram integrados em relatórios do projeto MPCs, avaliados positivamente por parceiros do consórcio e avaliadores externos. O contributo científico foi consolidado num artigo, com apresentação realizada pela autora numa das melhores conferências internacionais de sistemas de informação, classificada como A no índice australiano CORE e afiliada da Association for Information systems (AIS): Dias, M., Barata, J. and Roque, L. (2023). *A Digital Twin for Training Marine Pollution Control*, 31st International Conference on Information Systems Development (ISD).

# Referências

- Aamo, O., Downing, K., & Reed, M. (1996). Calibration, verification, and sensitivity analysis of the iku oil spill contingency and response (oscar) model system. *Report*, 42, 4048.
- Annika, P., George, T., George, P., Konstantinos, N., Costas, D., & Koutitas, C. (2001). The poseidon operational tool for the prediction of floating pollutant transport. *Marine Pollution Bulletin*, 43(7-12), 270–278.
- Bellotti, F., Kapralos, B., Lee, K., Moreno-Ger, P., Berta, R., & Barreto, A. B. (2013). Review article assessment in and of serious games: An overview. *Advances in Human-Computer Interaction*, 2013, 11. doi: 10.1155/2013/136864
- Bellou, N., Gambardella, C., Karantzalos, K., Monteiro, J. G., Canning-Clode, J., Kemna, S., ... Lemmen, C. (2021). Global assessment of innovative solutions to tackle marine litter. doi: 10.1038/s41893-021-00726-2
- Bentley. (2022). *Openflows flood: Flood modeling software* | bentley systems. Retrieved from <https://www.bentley.com/software/openflows-flood/>
- Berry, A., Dabrowski, T., & Lyons, K. (2012). The oil spill model oiltrans and its application to the celtic sea. *Marine pollution bulletin*, 64(11), 2489–2501.
- Brovchenko, I., Kuschan, A., Maderich, V., Shliakhtun, M., Yuschenko, S., & Zheleznyak, M. (2003). The modelling system for simulation of the oil spills in the black sea. In *Elsevier oceanography series* (Vol. 69, pp. 586–591). Elsevier.
- Crowley, D., Mendelsohn, D., Mulanaphy, N. W., Li, Z., & Spaulding, M. (2014). Modeling subsurface dispersant applications for response planning and preparation. In *International oil spill conference proceedings* (Vol. 2014, pp. 933–948).
- Dagestad, K.-F., Röhrs, J., Breivik, Ø., & Ådlandsvik, B. (2018). Opendrift v1. 0: a generic framework for trajectory modelling. *Geoscientific Model Development*, 11(4), 1405–1420.
- Daniel, P., Marty, F., Josse, P., Skandrani, C., & Benshila, R. (2003). Improvement of drift calculation in mothy operational oil spill prediction system. In *International oil spill conference* (Vol. 2003, pp. 1067–1072).
- De Dominicis, M., Pinardi, N., Zodiatis, G., & Lardner, R. (2013). Medslik-ii, a lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting—part 1: Theory. *Geoscientific Model Development*, 6(6), 1851–1869.

- Dias, M., Barata, J., & Roque, L. (2023). A digital twin for training marine pollution control.
- ECHO. (2022). *Mpcs | ucp knowledge network: Applied knowledge for action*. Retrieved from <https://civil-protection-knowledge-network.europa.eu/projects/mpcs>
- Ernstsen, J., & Nazir, S. (2020, 9). Performance assessment in full-scale simulators – a case of maritime pilotage operations. *Safety Science*, 129, 104775. doi: 10.1016/J.SSCI.2020.104775
- Express. (2010). *Express fast, unopinionated, minimalist web framework for node.js*. Retrieved from <https://expressjs.com/>
- Fitz-Gibbon, C. T. (1990). Bera dialogues. vol. 2, performance indicators. , 111.
- Gaba, D. M. (2004). The future vision of simulation in health care. *BMJ Quality & Safety*, 13(suppl 1), i2–i10.
- Galloway, T. S. (2006). Biomarkers in environmental and human health risk assessment. *Marine Pollution Bulletin*, 53(10-12), 606–613.
- Gartner. (2017). *Gartner top 10 strategic technology trends for 2018*. Retrieved from <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2018>
- Gartner. (2018). *Gartner top 10 strategic technology trends for 2019*. Retrieved from <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2019>
- Gelernter, D. (1991). *Mirror worlds: Or: The day software puts the universe in a shoebox...how it will happen and what it will mean*. Oxford University Press. doi: 10.1093/OSO/9780195068122.001.0001
- Greenberg, B., Voevodsky, P., & Gralla, E. (2017). A capabilities-based framework for disaster response exercise design and evaluation: Findings from oil spill response exercises. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 13(4), 20160034.
- Greengard, S. (2020). *Digital twins grow up | news | communications of the acm*. Retrieved from <https://cacm.acm.org/news/238642-digital-twins-grow-up/fulltext>
- Gregor, S., Chandra Kruse, L., Seidel, S., et al. (2020). Research perspectives: the anatomy of a design principle..
- Gregor, S., & Hevner, A. R. (2013). Positioning and presenting design science research for maximum impact. *MIS quarterly*, 337–355.
- Grieves, M., & Vickers, J. (2016, 1). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*, 85-113. doi: 10.1007/978-3-319-38756-7\_4

- Grieves, M. W. (2005). Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises. *International Journal of Product Development*, 2, 71-84. doi: 10.1504/IJPD.2005.006669
- Grieves, M. W. (2019, 1). Virtually intelligent product systems: Digital and physical twins. *Complex Systems Engineering: Theory and Practice*, 175-200. doi: 10.2514/5.9781624105654.0175.0200
- Gros, J., Socolofsky, S. A., Dissanayake, A. L., Jun, I., Zhao, L., Boufadel, M. C., ... Arey, J. S. (2017). Petroleum dynamics in the sea and influence of subsea dispersant injection during deepwater horizon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(38), 10065–10070.
- Herner, A., MS, P. J., & Ram, S. (2004). Design science in information system research. *MIS Quarterly*, 28(1), 75–105.
- Iliad. (2021). *Home | iliad - digital twin of the ocean*. Retrieved from <https://www.ocean-twin.eu/>
- Keramea, P., Spanoudaki, K., Zodiatis, G., Gikas, G., & Sylaios, G. (2021). Oil spill modeling: A critical review on current trends, perspectives, and challenges. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(2). Retrieved from <https://www.mdpi.com/2077-1312/9/2/181> doi: 10.3390/jmse9020181
- Klein, M. G., Jackson, P. L., & Mazereeuw, M. (2022). Teaching humanitarian logistics with the disaster response game. *Decision Sciences Journal of Innovative Education*, 20(3), 158–169.
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018, 1). Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51, 1016-1022. doi: 10.1016/J.IFACOL.2018.08.474
- Lanki, A., Laurila-Pant, M., Lehtikoinen, A., Lu, L., & Tonteri, O. (2022). *Designing effective simulator-based oil spill response trainings for improved performance, preparedness, and societal resilience* (A. Lehtikoinen, Ed.). Kotka Maritime Research Centre (Merikotka).
- Lardner, R., Zodiatis, G., Hayes, D., & Pinardi, N. (2006). Application of the medslk oil spill model to the lebanese spill of july 2006. *European Group of Experts on satellite monitoring of sea based oil pollution, European Communities ISSN*, 1018–5593.
- Łazuga, K., Gucma, L., & Perkovic, M. (2013). M/t “baltic carrier” accident. the reconstruction of oil spill with pisces ii simulator application. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*(36 (108) z. 1), 110–115.
- Lee, J. H., Nam, Y. S., Kim, Y., Liu, Y., Lee, J., & Yang, H. (2022, 12). Real-time digital twin for ship operation in waves. *Ocean Engineering*, 266, 112867. doi: 10.1016/J.OCEANENG.2022.112867
- Leech, M., Tyler, A., & Wiltshire, M. (1993). Osis: A pc-based oil spill information system. In *1993 international oil spill conference: Prevention, preparedness, response*.

- Legrand, S., & Duliere, V. (2012). Oserit: An oil spill evaluation and response integrated tool. In *Book of abstracts of the fourth international conference on the application of physical modelling to port and coastal protection* (pp. 275–276).
- Madni, A. M., Madni, C. C., & Lucero, S. D. (2019, 1). Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering. *Systems 2019, Vol. 7, Page 7, 7*. doi: 10.3390/SYSTEMS7010007
- MARETEC. (2002). *Mohid water modelling system*. Retrieved from <http://www.mohid.com/>
- Mayer, I. S. (2022). Rede, uitgesproken door digital twins for the real world.
- McCay, D. F., & Rowe, J. J. (2004). Evaluation of bird impacts in historical oil spill cases using the simap oil spill model. In *Arctic and marine oilspill program technical seminar* (Vol. 1, pp. 421–452).
- Mercator Ocean International. (2022). *Digital twin of the ocean - mercator ocean*. Retrieved from <https://www.mercator-ocean.eu/en/digital-twin-ocean/>
- Merikotka. (2022). *Simulators for improving cross-border oil spill response in extreme conditions*. Retrieved from <https://www.merikotka.fi/en/projects/simrec-2/>
- MSP Challenge. (2015). *Home*. Retrieved from <https://www.mspchallenge.info/>
- MSP Challenge. (2020). *3d ocean view*. Retrieved from <https://www.mspchallenge.info/3d-ocean-view.html>
- National Geographic. (2022). *A poluição marinha, explicada | national geographic*. Retrieved from <https://www.natgeo.pt/meio-ambiente/a-poluicao-marinha-explicada>
- NOAA. (2019). *Gnome suite for oil spill modeling*. Retrieved from <https://response.restoration.noaa.gov/gnomesuite>
- NOAA. (2020). *Oil spills | national oceanic and atmospheric administration*. Retrieved from <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/ocean-coasts/oil-spills>
- Parrott, A., & Warshaw, L. (2022). *Industry 4.0 and the digital twin technology | deloitte insights*. Retrieved from <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/industry-4-0/digital-twin-technology-smart-factory.html>
- Peffer, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A., & Chatterjee, S. (2007). A design science research methodology for information systems research. *Journal of Management Information Systems*, 24(3), 45-77. Retrieved from <https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302> doi: 10.2753/MIS0742-1222240302
- Piasek, B., Vickers, J., Lowry, D., Scotti, S., Stewart, J., & Calomino, A. (2010). Draft materials, structures, mechanical systems, and manufacturing roadmap technology area 12.



- Pisces ii.* (2020). Retrieved from <https://www.csum.edu/industry/simulation-center/pisces.html>
- Power, B. (2014). Writing good risk statements. *ISACA*, 3. Retrieved from <https://www.isaca.org/resources/isaca-journal/past-issues/2014/writing-good-risk-statements>
- Qualiseg. (2022). *Mpcs - qualiseg*. Retrieved from <https://grupoqualiseg.com/en/mpcs-2/>
- Sim, L., Graham, J., Rose, K., Duran, R., Nelson, J., Umhoefer, J., & Vielma, J. (2015). Developing a comprehensive deepwater blowout and spill model. *US Department of Energy, National Energy Technology Laboratory: Albany, NY, USA*, 44.
- Simrec.* (2020). Retrieved from <https://www.xamk.fi/en/research-and-development/simrec-simulators-for-improving-cross-border-oil-spill-response-in-extreme-conditions/>
- Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E. P., Qiao, Y., Murray, N., & Devine, D. (2021). *Digital twin: Origin to future* (Vol. 4). MDPI AG. doi: 10.3390/asi4020036
- Sommerville, I. (2016). *Software engineering (tenth edn. global edition)*. Boston, MA: Pearson Education, Inc.
- Spanoudaki, K., Kozyrakis, G., Metheniti, V., Parasyris, A., & Kampanis, N. (2023). *The cretan sea oil spill digital twin pilot for the iliad digital twin of the ocean* (Tech. Rep.). Copernicus Meetings.
- Spaulding, M., Kolluru, V., Anderson, E., & Howlett, E. (1994). Application of three-dimensional oil spill model (wosm/oilmap) to hindcast the braer spill. *Spill Science & Technology Bulletin*, 1(1), 23–35.
- spring. (2013). *Spring boot*. Retrieved from <https://spring.io/projects/spring-boot/>
- Stark, R., & Damerau, T. (2019). Digital twin. In S. Chatti & T. Tolio (Eds.), *Cirp encyclopedia of production engineering* (pp. 1–8). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Retrieved from [https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7\\_16870-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_16870-1) doi: 10.1007/978-3-642-35950-7\_16870-1
- Tao, F., Zhang, M., Liu, Y., & Nee, A. (2018). Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment. *CIRP Annals*, 67(1), 169–172. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850618300799> doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.055>
- UNEP. (2021). *How to manage the damage from oil spills*. Retrieved from <https://www.unep.org/news-and-stories/story/how-manage-damage-oil-spills>
- VanDerHorn, E., & Mahadevan, S. (2021). Digital twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems*, 145, 113524. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923621000348> doi: <https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524>

- Vom Brocke, J., & Maedche, A. (2019). The dsr grid: six core dimensions for effectively planning and communicating design science research projects. *Electronic Markets*, 29, 379–385.
- Wang, K.-J., Lee, Y.-H., & Angelica, S. (2021). Digital twin design for real-time monitoring—a case study of die cutting machine. *International Journal of Production Research*, 59(21), 6471–6485.
- Yapa, P. D., Wimalaratne, M. R., Dissanayake, A. L., & DeGraff Jr, J. A. (2012). How does oil and gas behave when released in deepwater? *Journal of Hydro-Environment Research*, 6(4), 275–285.
- Zelenke, B., O'Connor, C., Barker, C. H., Beegle-Krause, C., & Eclipse, L. (2012). General noaa operational modeling environment (gnome) technical documentation.

# Apêndices



# Apêndice A

## Plano de trabalho

Neste apêndice são apresentados os Diagramas de Gantt com os planos de trabalho previstos e realizados durante o período de desenvolvimento.

Como se pode verificar após a análise dos diagramas apresentados nas figuras A.1 e A.2, as estimativas feitas inicialmente não foram cumpridas uma vez que algumas das tarefas apresentadas se estenderam para além da data que estava definida, nomeadamente o processo de investigação que se revelou mais demorado do que o planeado inicialmente. Este atraso afetou a escrita da dissertação.

Partindo da análise das figuras A.3 e A.4 podemos verificar algumas alterações significativas. Em primeiro lugar, a elaboração do modelo de dados prolongou-se um pouco mais do que o previsto, assim como o desenvolvimento do Digital Twin e consequentemente a escrita da dissertação. Devido aos atrasos verificados ao longo do semestre e à alocação de tempo para escrita de um artigo (não contemplada no planeamento inicial), não foi possível desenvolver a parte da metodologia para avaliação de desempenho dentro do tempo previsto. Foi equacionada a opção de entregar a dissertação com os resultados alcançados até setembro de 2023. Porém, a oportunidade de se prosseguir os trabalhos com uma bolsa do MPCS, melhorando os resultados, levou à decisão de entregar a dissertação apenas em janeiro de 2024, permitindo um teste e demonstração integrada do Digital Twin com os restantes componentes.

## Plano trabalho previsto Investigação

Entrega: 16 de janeiro de 2023

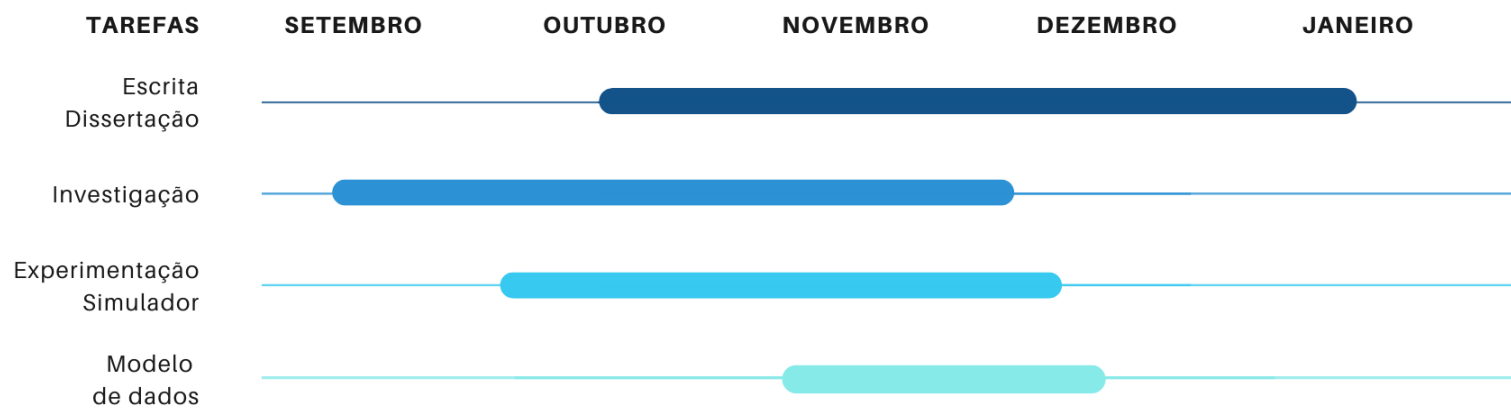


Figura A.1: Diagrama de Gantt previsto para a fase de investigação



Figura A.2: Diagrama de Gantt realizado na fase de investigação

### Plano de trabalho previsto Implementação

Meta: julho de 2023

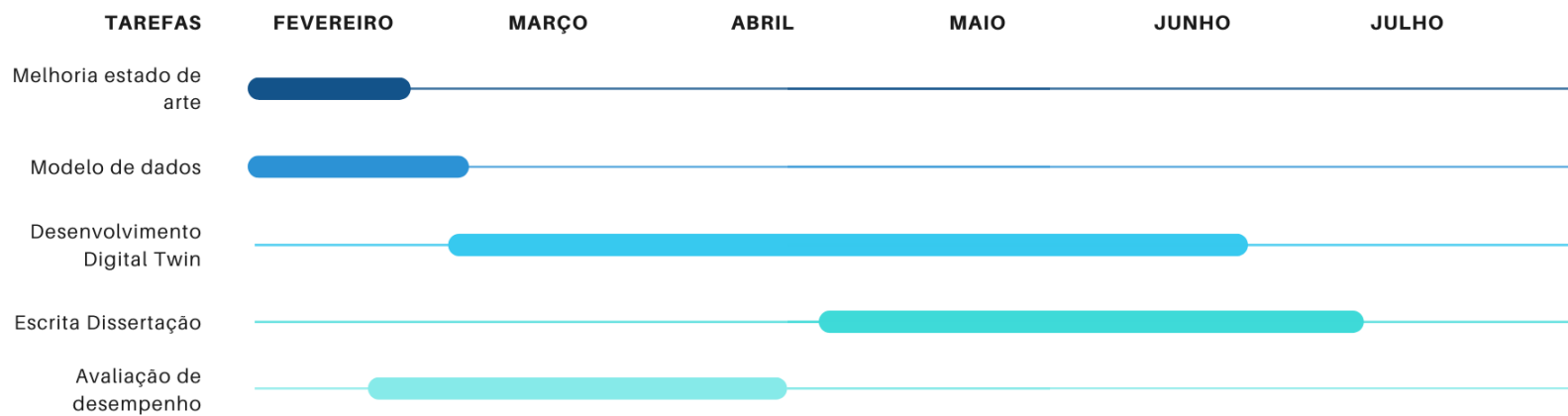


Figura A.3: Diagrama de Gantt previsto para a fase de implementação



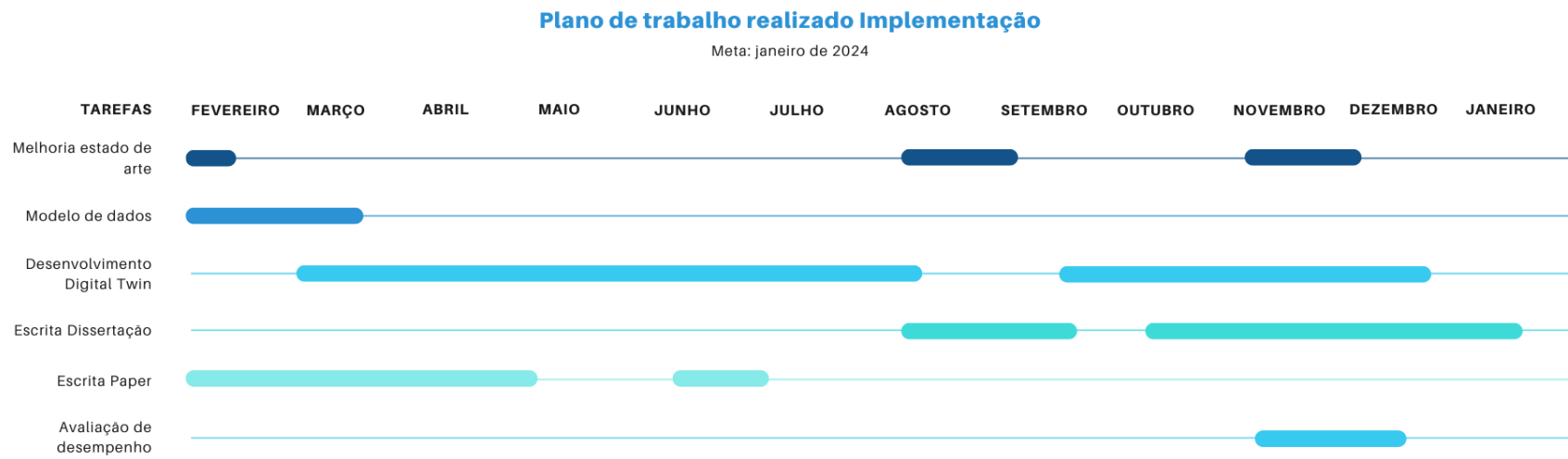


Figura A.4: Diagrama de Gantt realizado na fase de implementação



# **Apêndice B**

## **Modelo ER**

Neste apêndice é apresentado o modelo ER elaborado para o projeto MPCs.

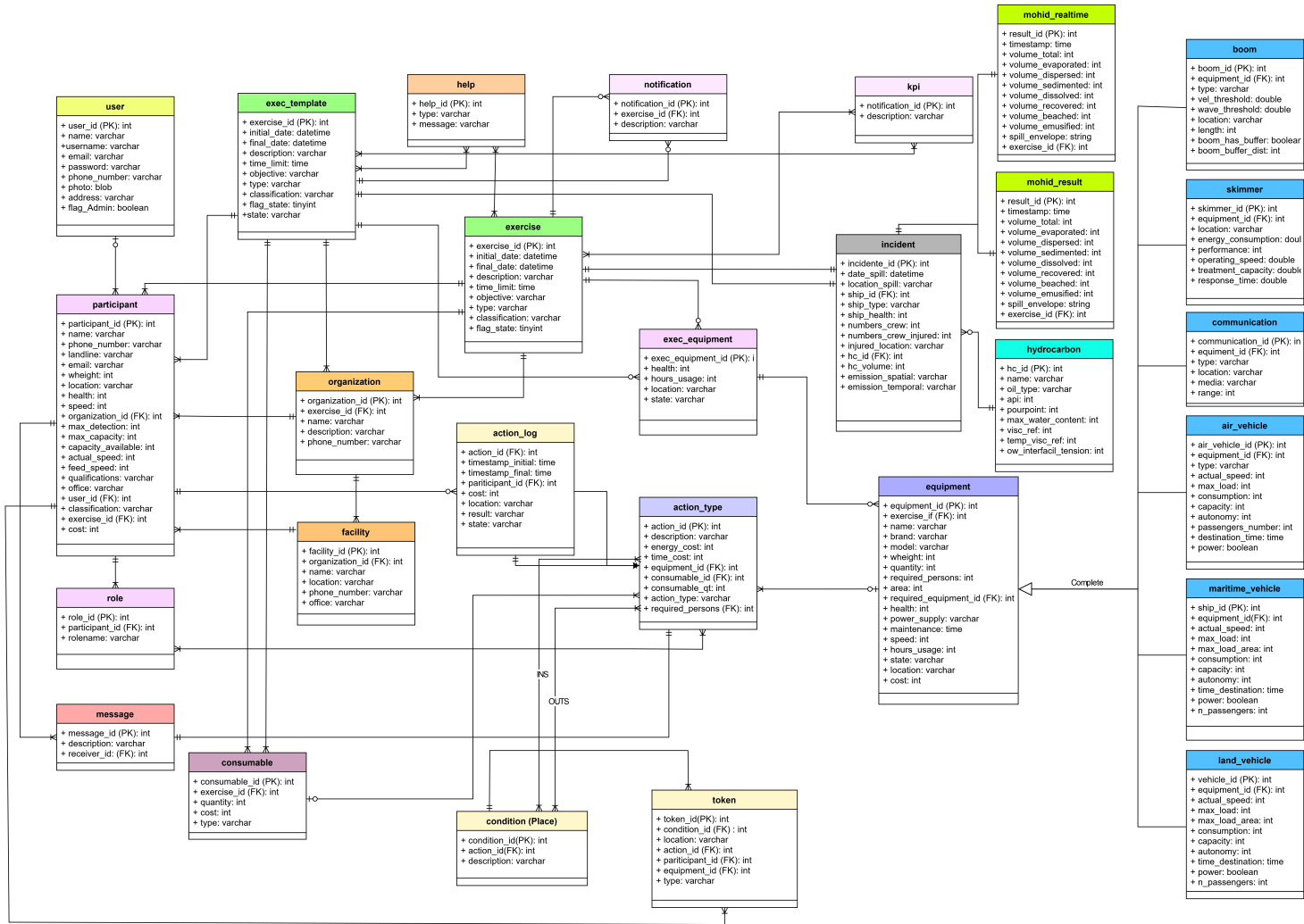


Figura B.1: Modelo de dados

# Apêndice C

## Extração métricas necessárias ao Digital Twin

```
def readFileOutput(dir, exe):  
  
    #Change directory to MOHID\ + dir + \res  
    os.chdir("../\\res")  
  
    #try to open, if it fails return code error  
    try:  
        #file with data obtained from MOHID  
        fileF = open("Run" + exe + "\\Output.sro", "r")  
  
        #csv file to put data  
        fileO = open("Run" + exe + "\\data.csv", "w")  
  
        i = 1  
        flag = 0  
        #global indexes  
        indexes = []  
        date = []  
        time = []  
        for line in fileF:  
  
            columns = line.split()  
            #exit when reach the end of the information  
            if line == "<EndTimeSerie>\n":  
                flag = 0  
                i += 1  
                break  
            #Obtain information to write  
            elif flag:  
                #information to write:  
                # timestamp, volume_total, volume_evaporated, volume_  
                timestamp = ""
```

```

    for j in range(len(date) - 1):
        timestamp += columns[date[j]] + "-"
    timestamp += columns[date[len(date)-1]] + "_"
    for j in range(len(time) - 1):
        timestamp += columns[time[j]] + ":"
    timestamp += columns[time[len(time)-1]]

    #Obtain Spills Envelope (location)
    aux = spill.envelope(timestamp, "Lagrangian_" + exe + ".h")

    #write envelope information, if found
    if (aux):
        fileO.write(timestamp + ";")
        for j in indexes:
            fileO.write(columns[j] + ";")
        fileO.write(aux + "\n")

    i += 1
#Write file headers
elif i == 5:

    max = len(columns)
    fileO.write("TimeStamp;")
    for j in range(max):
        if columns[j] == "YY" or columns[j] == "MM" or column
            date.append(j)
        elif columns[j] == "hh" or columns[j] == "mm" or column
            time.append(j)
        elif columns[j] == "VEvaporated" or columns[j] == "VL
== "VolumeBeached" or columns[j] == "VWaterContent" or columns[j] == "Vol
            indexes.append(j)
        fileO.write(columns[j] + ";")
    fileO.write("Envelope\n")
    i += 1
elif line == "<BeginTimeSerie>\n":
    flag = 1
    i += 1
else:
    i += 1

fileF.close()
fileO.close()

return 1
except IOError:

print("Error_opening_the_file")
return 0

```

# Apêndice D

## Dados de teste de adequabilidade do modelo matemático

Neste apêndice são apresentados os dados de validação do modelo matemático, usados para executar as simulações para incluir no deliverable 4.2 - Mathematical Models Validation Report.

Todas as simulações foram realizadas utilizando um hidrocarboneto com as seguintes propriedades:

- **Nome do hidrocarboneto:** Heavy Oils (Heavy Crude Oils. No. 6 Fuel Oil. Bunker C)
- **Volume:** 400  $m^3$
- **Tipo do hidrocarboneto:** Crude
- **Api:** 13
- **Temperatura a partir da qual o hidrocarboneto perde as suas propriedades de fluido:** -30 °C
- **Conteúdo máximo de água:** 80%
- **Viscosidade dinâmica de referência:** 3603  $cP$
- **Temperatura à qual foi determinada a viscosidade dinâmica de referência:** 15 °C
- **Tensão interfacial água-óleo:** 20  $Dyne/cm$

As simulação realizadas podem ser acedidas através do seguinte link:

<http://tinyurl.com/5y9mxt6y>. As simulações realizadas para alto mar podem ser consultadas na pasta Caso1\_AltoMar e foram obtidas usando as seguintes características:

**altomar1.mp4**

- **Data início simulação:** 2021/10/01 0:00:00
- **Localização:** (38.709329, -9.692918)

**altomar2.mp4**

- **Data início simulação:** 2021/10/11 0:00:00
- **Localização:** (38.709329, -9.692918)

As simulações realizadas para junto e a chegar à costa podem ser consultadas na pasta Caso2\_Costa e foram obtidas usando as seguintes características:

**costa1.mp4**

- **Data início simulação:** 2021/10/01 0:00:00
- **Localização:** (38.543447, -9.196246)

**costa2.mp4**

- **Data início simulação:** 2021/10/11 0:00:00
- **Localização:** (38.543447, -9.196246)

As simulações realizadas no porto de Lisboa podem ser consultadas na pasta Caso3\_Porto e foram obtidas usando as seguintes características:

**porto1.mp4**

- **Data início simulação:** 2021/10/01 0:00:00
- **Localização:** (38.702958, -9.155112)

**porto2.mp4**

- **Data início simulação:** 2021/10/11 0:00:00
- **Localização:** (38.702958, -9.155112)

**porto3.mp4**

- **Data início simulação:** 2021/10/01 0:00:00
- **Localização:** (38.698041, -9.168848)

A simulação realizada no porto de Lisboa, com 2 barreiras iguais pode ser consultada na pasta Caso4\_Barreiras e foi obtida usando as seguintes características:

**porto2barreiramapa.mp4**



- **Data início simulação:** 2021/10/11 0:00:00
- **Localização inicial do derrame:** (38.702958, -9.155112)
- **Localização barreira1:** [(38.695465, -9.188346), (38.694982, -9.188571), (38.694410, -9.188775), (38.693637, -9.188619)]
- **Localização barreira2:** [(38.693694, -9.200053), (38.693217, -9.200557), (38.692648, -9.200707), (38.691986, -9.200621)]
- **Velocidade da corrente a partir da qual as barreiras não conseguem conter partículas:** 1 *m/s*
- **Altura significativa das ondas a partir da qual as barreiras não conseguem conter partículas:** 0.6 *m*

A simulação realizada na costa, com 2 recuperadores iguais pode ser consultada na pasta Caso5\_Recuperadores e foi obtida usando as seguintes características:

**costa1recuperadoresmapa.mp4**

- **Data início simulação:** 2021/10/01 0:00:00
- **Localização inicial do derrame:** (38.543447, -9.196246)
- **Taxa de petróleo removido mecanicamente (cada um):** 30000 *l/h*
- **Data colocação recuperadores:** 2021/10/01 6:00:00
- **Data remoção recuperadores:** 2021/10/01 12:00:00