



UNIVERSIDADE
LUSÓFONA

Classificação do Estado de Funcionamento de
Turbinas Éolicas Offshore a partir de Imagens
de Satélite e Dados Auxiliares usando Métodos
de Inteligência Artificial

Trabalho Final de Curso

Relatório Intercalar 1º Semestre

Tiago Casto Mota
Professor João Carvalho

Trabalho Final de Curso | LEI

Direitos de cópia

Classificação do Estado de Funcionamento de Turbinas Eólicas Offshore a partir de Imagens de Satélite e Dados Auxiliares usando Métodos de Inteligência Artificial,
Copyright de Tiago Castro Mota, Universidade Lusófona.

A Escola de Comunicação, Arquitectura, Artes e Tecnologias da Informação (ECATI) e a Universidade Lusófona (UL) têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Resumo

Nos últimos anos, a Europa aumentou significativamente os seus investimentos em energias renováveis, impulsionada pela necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis, cumprir as metas climáticas e reforçar a resiliência energética. Com os mercados globais de energia a enfrentar volatilidade, fontes de energia renovável como a eólica e a solar desempenham um papel crucial na garantia de um futuro energético sustentável e independente para o continente. Os parques eólicos offshore, em particular, tornaram-se um pilar da estratégia europeia para as energias renováveis, oferecendo um enorme potencial devido aos vastos recursos de vento disponíveis ao longo das suas costas. Projetos como o WindFloat Atlantic, localizado ao largo da costa de Viana do Castelo, em Portugal, são exemplos desta transição, demonstrando a crescente importância da energia eólica offshore no mix energético europeu.

Um aspecto crucial para maximizar a eficiência e a sustentabilidade destes projetos renováveis é garantir a operação fiável das turbinas eólicas offshore. Práticas eficientes de operação e manutenção (O&M) são essenciais para prevenir paragens das turbinas, reduzir custos operacionais e otimizar a produção de energia. Contudo, devido ao ambiente remoto e adverso onde estas instalações estão localizadas, monitorizar e prever o estado de funcionamento das turbinas apresenta desafios únicos.

Este trabalho procura responder a esta necessidade, propondo uma abordagem inovadora para prever o estado operacional das três turbinas do cluster WindFloat Atlantic, utilizando dados de código aberto e imagens de satélite avançadas. Tirando partido dos dados de alta resolução fornecidos pelo SENTINEL-2, parte do programa europeu de observação terrestre Copernicus, juntamente com informações da European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E), o algoritmo desenvolvido permitirá previsões mais precisas do desempenho das turbinas. Este modelo tem como objetivo fornecer informações valiosas que possam melhorar as estratégias de O&M, assegurando a fiabilidade e eficiência a longo prazo destes ativos críticos de energia renovável.

Ao utilizar estas fontes de dados de código aberto, esta investigação contribui para melhorar a sustentabilidade e a resiliência operacional da energia eólica offshore, apoiando os objetivos mais amplos da Europa de independência energética e responsabilidade ambiental.

Abstract

In recent years, Europe has significantly ramped up its investments in renewable energy, driven by the need to reduce dependency on fossil fuels, meet climate targets, and enhance energy resilience. With global energy markets facing volatility, renewable energy sources like wind and solar are playing a pivotal role in securing a sustainable and independent energy future for the continent. Offshore wind farms, in particular, have emerged as a cornerstone of Europe's renewable energy strategy, offering immense potential due to the vast wind resources available along its coastlines. Projects like WindFloat Atlantic, located off the coast of Viana do Castelo, Portugal, are examples of this transition, demonstrating the increasing importance of offshore wind in Europe's energy mix.

A crucial aspect of maximizing the efficiency and sustainability of these renewable projects is ensuring the reliable operation of offshore wind turbines. Efficient operation and maintenance (O&M) practices are essential to prevent turbine downtime, reduce operational costs, and optimize energy output. However, due to the remote and harsh environment of offshore installations, monitoring and predicting the functioning state of turbines present unique challenges.

This work focuses on addressing this need by proposing an innovative approach to predict the operational state of the three turbines in the WindFloat Atlantic cluster using open-source data and advanced satellite imagery. Leveraging the high-resolution data provided by SENTINEL-2, part of the European Copernicus Earth observation program, alongside information from the European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E), the developed algorithm will enable more accurate predictions of turbine performance. This model aims to provide valuable insights that can enhance O&M strategies, ensuring the long-term reliability and efficiency of these critical renewable energy assets.

By utilizing these open-source data sources, this research contributes to improving the sustainability and operational resilience of offshore wind energy, supporting Europe's broader goals of energy independence and environmental responsibility.

Índice

Resumo	2
Abstract	3
Índice	4
Lista de Figuras	5
Lista de Tabelas	6
1 - Introdução	7
0.1 Identificação do problema	7
0.2 Questão de pesquisa e hipótese	9
0.2.1 Questão de pesquisa	10
0.2.2 Hipótese	10
2 - Estado da Arte	12
0.3 Benchmarking	12
0.4 Background	14
3 - Viabilidade e Pertinência	16
0.5 A Importância da Monitorização Operacional em Plataformas Eólicas Off-shore	16
0.6 Potencial de Aplicações Derivadas	16
0.6.1 Previsão de Produção de Energia	16
0.6.2 Previsão de Velocidade do Vento no Local	16
0.6.3 Identificação de Anomalias e Manutenção Preditiva	16
0.7 Contributos para a Gestão de Parques Offshore	17
0.8 Base para Estudos Futuros	17
4 - Solução Proposta	18
5 - Calendário	21
Bibliografia	25

Lista de Figuras

1	Tipos diferentes de configuração de Turbinas éolicas offshore.	8
2	Sistema de amarração de uma plataforma eólica semi-subermsível.	8
3	Ângulos de pitch e yaw de uma turbina élica	9
4	Curva de potência da turbina eólica Vestas V164-8.0 MW	10
5	Relação da força de drag aplicada numa turbina eólica com a sua àrea frontal	11
6	Forças de drag nas turbinas éolicas do parque em diferentes estados de funcionamento	11
7	Satélite Sentinel-2. [6]	12
8	Índice de Viabilidade de ORE-Satélite- Este índice foi desenvolvido como um resumo dos fatores analisados neste artigo e inclui diferentes características-chave necessárias para o desenvolvimento de um projeto de ORE (Offshore Renewable Energy) bem-sucedido. O índice pode ser classificado como "baixo", "médio" ou "alto", dependendo do potencial para obter as informações necessárias a partir de dados de satélite. [7]	13
9	Fluxograma da recolha e preparação dos dados a utilizar.	18
10	Integração com o trabalho anteriormente desenvolvido.	19
11	Desenvolvimento e treino do modelo.	20
12	Esquema de Gantt para o TFC	24

Lista de Tabelas

1	Características do parque eólico WindFloat Atlantic	7
2	Comparação entre os métodos de classificação	15

1 - Introdução

A União Europeia apontava no briefing de 2020 que a energia eólica offshore [1] poderia vir a contribuir significativamente para os esforços globais e europeus de descarbonização da economia até 2050. Atualmente, é a única fonte de energia renovável offshore implementável em escala comercial, apresentando um vasto potencial inexplorado nos oceanos e mares, ainda que apenas alguns locais sejam viáveis para desenvolvimento. A energia eólica offshore oferece maior capacidade e uma produção mais consistente do que outras fontes renováveis variáveis, sendo descrita pela Agência Internacional de Energia como uma tecnologia única de "carga base variável". No entanto, a operação e manutenção (O&M) de parques eólicos offshore continua a enfrentar desafios consideráveis, particularmente devido à localização remota e às condições ambientais adversas que dificultam o acesso às turbinas.

0.1 Identificação do problema

Este contexto gera uma necessidade crítica de desenvolver ferramentas que permitam monitorizar e prever o estado operacional das turbinas de forma eficiente e em tempo real, otimizando assim as intervenções de O&M e minimizando o tempo de inatividade. Alinhado com as tendências atuais descritas [2] este trabalho tencionar dar uma abordagem nova ao controlo do estado operacional destas turbinas eólicas, utilizando para isso um método replicável baseado em tecnologias abertas ao público.

O presente trabalho é a continuação do trabalho previamente realizado na instituição WavEC - Offshore Renewables que visa a obtenção da posição absoluta de cada turbina de um parque eólico através do uso de imagens de satélite abertas ao público(imagens do satélite Sentinel). Com estes dados de posição pretende-se neste trabalho, juntamente com outros dados de fontes abertas, retirar conclusões sobre o estado operacional de cada turbina. Como objeto de estudo utilizou-se o único parque eólico flutuante português. O WindFloat Atlantic, cujas características estão descritas na tabela 1, está localizado ao largo da costa de Viana do Castelo, em Portugal e é um exemplo de inovação na exploração de energia eólica offshore neste país. Composto por três turbinas flutuantes, este parque é pioneiro na utilização de plataformas flutuantes em águas profundas, representando uma nova fronteira no setor.

Característica	Descrição
Localização	Ao largo da costa de Viana do Castelo, Portugal
Número de Turbinas	3 Turbinas Flutuantes
Capacidade Total	25 MW
Tipo de Turbina	Vestas V164-8.4 MW
Altura da Torre	105 metros
Diâmetro do Rotor	164 metros
Profundidade de Instalação	100 metros (em águas profundas)
Distância da Costa	20 km
Início de Operação	2020
Tecnologia de Fundação	Plataformas flutuantes semissubmersíveis

Table 1: Características do parque eólico WindFloat Atlantic

Antes de se dar início à explicação do trabalho, é necessário entender as premissas

nos quais este mesmo se fundamenta. Como tal são apresentados alguns conceitos operacionais e teóricos deste tipo de estrutura. Cada turbina eólica pertencente a este parque é do tipo sub-submersível como apresentado na figura 1. É importante para os capítulos seguintes destacar que esta configuração permite movimento em todas as direções na superfície da água, movimento esse que é gerado por perturbações externas, tais como corrente, ondas e vento. A esta condições de meteorologicas e do estado do mar dá-se o nome de dados metoceânicos. . Esse tópico será abordado em capítulos posteriores.

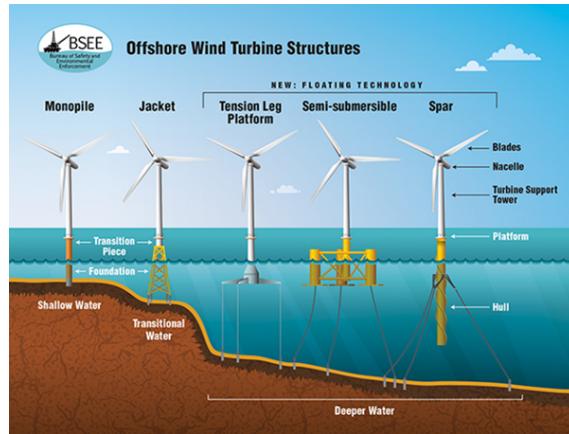


Figure 1: Tipos diferentes de configuração de Turbinas eólicas offshore.

O mecanismo que evita a situação de deriva da plataforma semi-submersível é o sistema de amarração. As linhas de amarração permitem que a plataforma se move na superfície do oceano, mas evitam que a estrutura entre à deriva ou tombe. Como tal, as linhas de amarração estão sujeitas a carregamentos cíclicos intimamente ligado com a metoceânica do local. Um exemplo do tipo de semelhante ao do WindFloat Atlantic é o da figura 2.

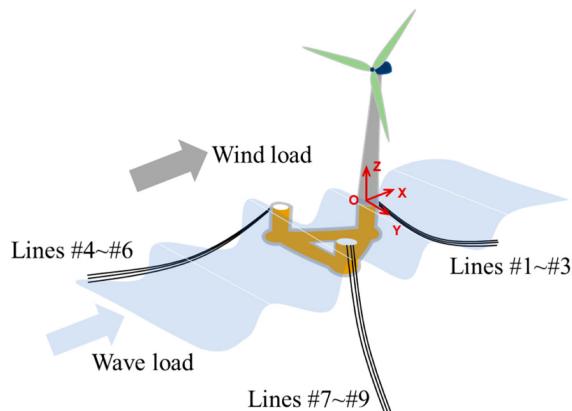


Figure 2: Sistema de amarração de uma plataforma eólica semi-submersível.

Este sistema é ciclicamente esforçada pela resposta dinâmica da plataforma flutuante aos carregamentos metoceânicos/ambientais. Entre os principais carregamentos encontram-se os carregamentos das ondas, as correntes oceânicas e os carregamentos aerodinâmicos.

A presença da plataforma em águas profundas leva a que o carregamento das ondas exerça forças cíclicas sobre a plataforma, provocando movimentos de translação (heave, surge, sway) e de rotação (pitch, roll, yaw). Estes movimentos impactam a estabilidade

da plataforma, uma vez que ondas de grande amplitude ou período longo podem causar oscilações significativas. As correntes oceânicas geram forças constantes ou variáveis sobre a base da plataforma e os cabos de amarração. Este tipo de carregamento pode causar deslocamentos da posição da plataforma em relação ao ponto de equilíbrio estático, aumentando o offset.

Relativamente ao carregamento aerodinâmico, este resulta da ação do vento, a principal fonte de energia para as turbinas eólicas, mas que também exerce forças consideráveis sobre as pás, como forças de sustentação e arrasto. Estes carregamentos afetam a estabilidade dinâmica da plataforma, uma vez que ventos fortes podem ampliar os movimentos oscilatórios da estrutura, e a eficiência energética da turbina, pois a força do vento determina o torque no rotor e, consequentemente, a energia gerada. Na figura 3 é possível ver os eixos de rotação associados à mudança de pitch. O controlo do

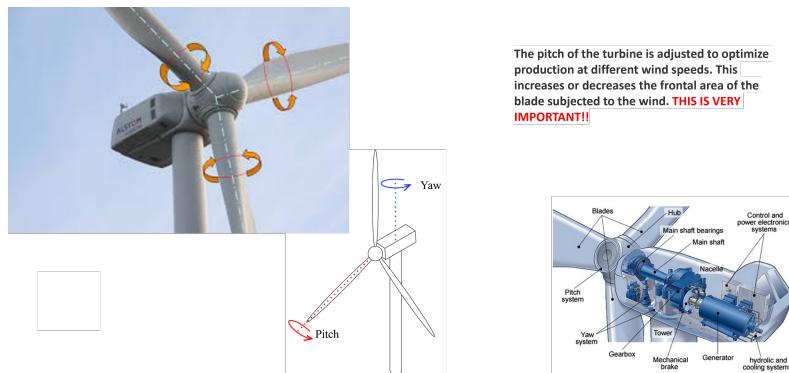


Figure 3: Ângulos de pitch e yaw de uma turbina éolica

pitch (ângulo de inclinação das pás em relação ao vento) é crucial para o desempenho da turbina. Este ângulo é ajustado ativamente para otimizar a eficiência em velocidades moderadas de vento, maximizando a extração de energia, e proteger a turbina em ventos fortes, reduzindo a força de sustentação para evitar sobrecargas e danos estruturais. As turbinas eólicas operam dentro de um intervalo de velocidades de vento, delimitado por dois valores principais: a velocidade de cut-in, que representa o mínimo necessário para iniciar a geração de energia (geralmente entre 3 e 5 m/s), e a velocidade de cut-off, que é o máximo permitido para operação segura (normalmente cerca de 25 m/s). Acima deste limite, a turbina é desligada para evitar danos. A relação entre a velocidade do vento e a energia gerada é representada pela curva de potência da turbina (visível na figura). Esta curva apresenta diferentes regiões: uma região subótima, que corresponde a velocidades abaixo do cut-in, onde não há geração de energia; uma região de crescimento, entre o cut-in e a velocidade nominal, em que a potência aumenta com o cubo da velocidade do vento; uma região de potência constante, acima da velocidade nominal, onde a geração é limitada pela capacidade máxima da turbina; e uma região de desligamento, que ocorre acima do cut-off para evitar sobrecargas. Na figura 4 é apresentada a curva de potência de uma turbina éolica semelhante à instalada no parque eólico do Wind-Float Atlantic. Segundo [3] as curvas de potências de ambas as turbinas são bastante semelhantes pelo que podem ser intermutáveis.

Todas a fontes de dados, inferências e conclusões sobre esses mesmos são explicados no capítulo Solução Proposta.

0.2 Questão de pesquisa e hipótese

A formulação da questão de pesquisa e da hipótese é um passo fundamental no desenvolvimento de qualquer trabalho científico.

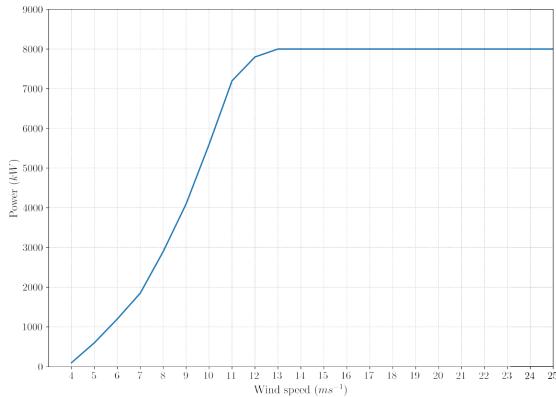


Figure 4: Curva de potência da turbina eólica Vestas V164-8.0 MW

0.2.1 Questão de pesquisa

A pergunta de investigação é responsável por guiar o estudo, definindo claramente o problema a ser abordado e direcionando os esforços de análise. Esta pergunta deve ser específica, clara e relevante, de forma a proporcionar uma base sólida para a realização de um estudo estruturado. Como mencionado anteriormente, a nossa questão em estudo é a seguinte: **Será possível prever o estado operacional de uma turbina através do uso de dados metoceânicos e de satélite?**

0.2.2 Hipótese

Já a hipótese é uma declaração testável que procura oferecer uma possível explicação ou previsão em relação à questão levantada. Baseia-se no conhecimento prévio e no contexto do problema, servindo como ponto de partida para o desenvolvimento da análise. Enquanto a pergunta de investigação define o que será explorado, a hipótese estabelece o que se espera encontrar, permitindo que o estudo seja conduzido de forma objetiva e com um foco claro nos resultados.

Dito isto, faz-se o seguinte raciocínio: Se o pitch é variável e está associado ao estado de operação (o pitch ajusta-se para alinhar a pás da turbina com a direção do vento - **"feathered state"** - quando a turbina está desligada, e orienta-se progressivamente contra a direção do vento quando a turbina está ligada e a produzir energia) e se o pitch influencia a área frontal da turbina sujeita à ação do vento, então a força exercida pelo vento varia de acordo com a condição do pitch. Como se trata de uma turbina eólica flutuante, a sua posição relativa varia mais quanto maior for a força do vento exercida, como evidenciado na figura 5.

Podemos, assim, estabelecer uma relação entre a posição da turbina e a força do vento, sendo esta força dependente da área frontal, que, por sua vez, está relacionada com o pitch, e consequentemente, com o estado de operação (ligada ou desligada).

A nossa hipótese, ilustrada na figura 6 é a seguinte: **"Quando a turbina está ligada, esta apresenta um maior deslocamento face à sua posição de equilíbrio do que na condição de estar desligada. Assim, é possível prever o estado de funcionamento da turbina com base na sua posição absoluta e nas condições do vento."**

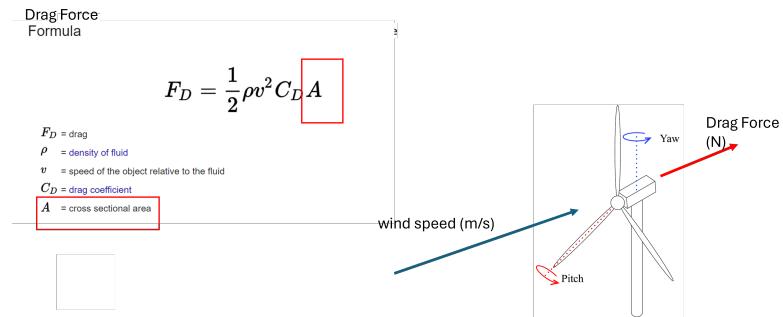


Figure 5: Relação da força de drag aplicada numa turbina eólica com a sua área frontal

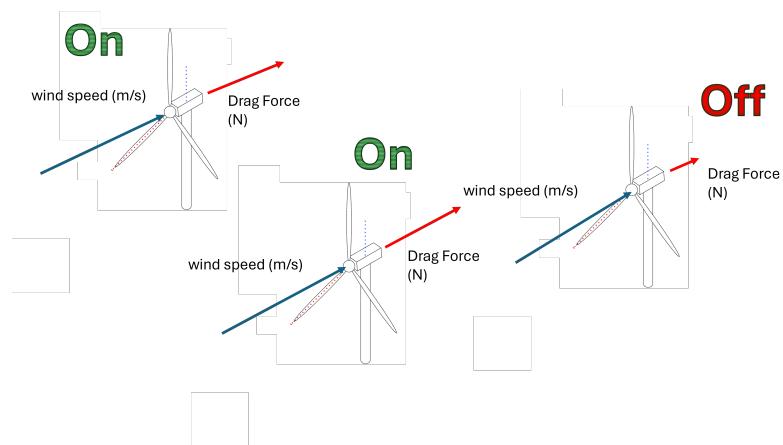


Figure 6: Forças de drag nas turbinas eólicas do parque em diferentes estados de funcionamento

2 - Estado da Arte

Os avanços na tecnologia de imagens de satélite têm ampliado significativamente a capacidade humana de observar e analisar a crosta terrestre. Esforços conjuntos europeus, como os das missões Sentinel-2 e Sentinel-1, têm disponibilizado à comunidade científica ferramentas cruciais para estudar fenómenos anteriormente acessíveis apenas a um grupo restrito de especialistas. Os objetivos da missão Sentinel-2 incluem fornecer aquisições globais sistemáticas de imagens multiespectrais de alta resolução com elevada frequência de revisita, garantir a continuidade das imagens multiespectrais e apoiar a geração de produtos operacionais, como mapas de cobertura do solo, mapas de deteção de mudanças e variáveis geofísicas [4]. Segundo [5], os métodos de classificação destacam-se como as técnicas mais relevantes para a extração e análise de dados de imagens de satélite. Embora este trabalho não recorra diretamente a métodos de classificação, é importante mencionar que os dados de posicionamento das turbinas eólicas no parque WindFloat Atlantic resultam da aplicação de tais métodos em imagens de satélite.

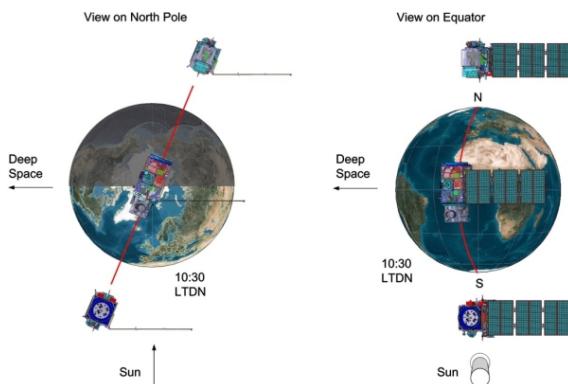


Figure 7: Satélite Sentinel-2. [6]

Nos últimos anos, a crescente importância das energias renováveis, especialmente da energia eólica offshore, assim como os desafios associados a estas tecnologias, tem impulsionado o desenvolvimento de trabalhos que utilizam dados de satélite e APIs meteorológicas como forma de superar esses obstáculos. Estes dados desempenham um papel crucial no suporte à tomada de decisão para a gestão sustentável de recursos energéticos e no desenvolvimento de soluções que melhorem a eficiência operacional dos parques eólicos. Apesar do progresso científico e tecnológico alcançado, o uso de dados de satélite para monitorizar o estado operacional das turbinas eólicas ainda é uma área que permanece insuficientemente explorada. [7] aponta o exemplo do uso de imagens de satélite para realizar medições in-situ como uma área promissora para o desenvolvimento de tecnologias neste âmbito. Mais relacionado com este trabalho, na Figura 8 destaca-se a área de Operações e Manutenção (O&M) para energia eólica como uma das mais promissoras para começar um projeto baseado em dados de satélite.

0.3 Benchmarking

Alinhado com [7], a literatura atual sobre eólica offshore pode ser dividida nas abordagens principais consideradas no artigo e visíveis na 8. Na análise do recurso eólico ("site selection") utilizando dados de satélite para estimar a velocidade e a direção do vento,

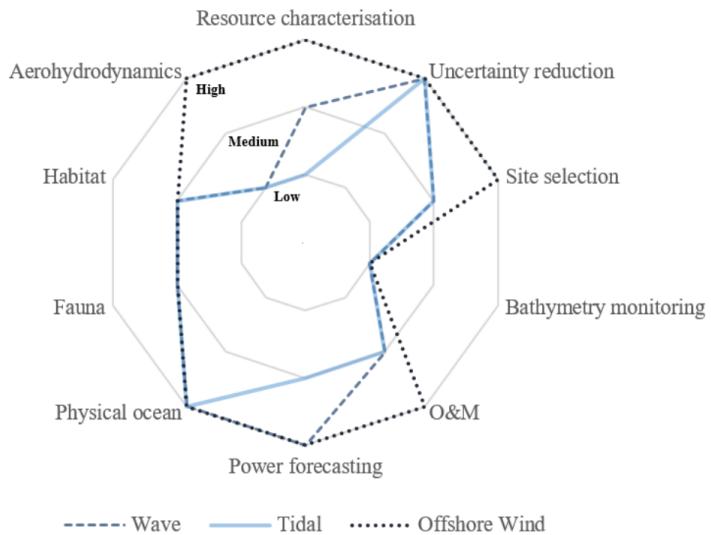


Figure 8: Índice de Viabilidade de ORE-Satélite- Este índice foi desenvolvido como um resumo dos fatores analisados neste artigo e inclui diferentes características-chave necessárias para o desenvolvimento de um projeto de ORE (Offshore Renewable Energy) bem-sucedido. O índice pode ser classificado como "baixo", "médio" ou "alto", dependendo do potencial para obter as informações necessárias a partir de dados de satélite. [7]

além de prever o potencial de geração de energia temos trabalhos como os de Xu et al. [8]. Estes demonstram a importância de séries temporais de imagens de satélite para mapear e monitorizar a expansão de parques eólicos. Neste estudo, os autores analisaram a proliferação de turbinas eólicas offshore no Mar do Norte, uma região estratégica para o setor de energia renovável. Através de algoritmos avançados de detecção de saliência visual, foi possível identificar não apenas as localizações das turbinas, mas também avaliar tendências de crescimento e impactos ambientais ("Habitat" e "Fauna"). Este trabalho sublinha a relevância de metodologias baseadas em satélite para análises macroespaciais, mas não aborda o uso de tais dados na monitorização detalhada do estado operacional das turbinas.

De maneira complementar, Hadjipetrou et al. [9] utilizaram dados SAR do Sentinel-1 para avaliar o recurso eólico na área ao redor de Chipre. O estudo incluiu uma validação rigorosa com medições *in-situ*, provenientes de estações meteorológicas costeiras. A pesquisa adotou distribuições Weibull para modelar estatisticamente as velocidades do vento, destacando padrões sazonais e áreas com elevado potencial de geração de energia. No entanto, os autores também enfatizaram limitações no uso de séries temporais curtas e a ausência de integração com APIs meteorológicas em tempo real, que poderiam enriquecer as análises.

Por outro lado, Medina-Lopez et al. [10] exploraram sinergias entre dados de satélite e APIs meteorológicas, propondo uma integração inovadora para melhorar a caracterização de locais e otimizar processos de manutenção. O estudo apresenta um panorama abrangente sobre como dados remotos podem ser usados em fases do ciclo de vida de projetos eólicos offshore, desde a caracterização inicial até operações e manutenção. Apesar de destacar o potencial da integração de dados, os autores sugerem que o uso de dados satélite ainda é limitado em análises preditivas de falhas operacionais.

A segunda abordagem principal está relacionada à quantificação e caracterização de turbinas eólicas em áreas geográficas específicas, geralmente para avaliar impactos

ambientais, visuais ou estruturais. Trabalhos como os de Wilson [11] empregam imagens de satélite de alta resolução para analisar o impacto visual de parques eólicos na Europa, utilizando técnicas de processamento de imagens. Por sua vez, Ramos et al. [12] avaliaram a integração de dispositivos de captura de energia das ondas (*Wave Energy Converters, WECs*) com turbinas eólicas offshore, destacando a viabilidade técnica e econômica dessa abordagem combinada. Embora esses estudos sejam importantes para a expansão sustentável da energia eólica, eles não exploram diretamente o estado operacional das turbinas, mas sim aspectos relacionados à sua caracterização ou integração com outras tecnologias. Apesar dos avanços mencionados, ainda há lacunas significativas na literatura quando se trata de monitorizar o estado operacional de turbinas eólicas offshore utilizando dados de satélite. A maioria dos estudos existentes foca-se na estimativa do recurso eólico ou na caracterização estrutural de turbinas, mas falha em abordar como dados de satélite podem ser combinados com informações meteorológicas em tempo real para fornecer uma visão detalhada do desempenho operacional. Em particular, o potencial de uso de dados de satélite para prever falhas, otimizar manutenção preventiva e reduzir custos operacionais permanece amplamente inexplorado. Essa lacuna torna-se especialmente relevante quando se considera a complexidade dos ambientes offshore. Turbinas eólicas instaladas no mar estão sujeitas a condições extremas de vento, ondas e correntes oceânicas, o que aumenta os desafios relacionados à sua operação e manutenção. Embora APIs meteorológicas, como o *Copernicus Marine Service*, ofereçam informações valiosas sobre as condições do mar, sua integração com dados de satélite para análises preditivas ainda é limitada. Essa integração poderia permitir a identificação de anomalias operacionais antes que estas se traduzissem em falhas críticas, otimizando não apenas a eficiência dos parques eólicos, mas também a sua sustentabilidade econômica.

0.4 Background

Os dados disponíveis para este estudo incluem informações sobre a posição da turbina, condições de vento e dados oceanográficos. Estes dados chegam sob a forma de *datasets*, e cabe-nos utilizar métodos de classificação para prever o estado operacional da turbina, ou seja, se está parada (0) ou funcional (1). Trata-se, portanto, de um problema de classificação aplicado a dados numéricos (*floats*).

Para resolver este problema, é importante compreender os diferentes métodos de classificação disponíveis, cada um com suas vantagens e limitações. Os principais métodos utilizados em problemas de classificação incluem:

- **Régressão Logística:** Um modelo estatístico que utiliza uma função logística para prever a probabilidade de uma classe com base nas variáveis de entrada. É simples e eficiente, especialmente para dados linearmente separáveis.
- **K-Nearest Neighbors (KNN):** Um método baseado em distância que classifica os dados com base nos rótulos das observações mais próximas. É eficaz em problemas não lineares, mas pode ser computacionalmente intensivo para grandes conjuntos de dados.
- **Árvores de Decisão:** Algoritmos baseados em regras hierárquicas que dividem o espaço de decisão em regiões. São interpretáveis e adaptáveis a problemas complexos, mas podem sofrer de *overfitting*.
- **Random Forest:** Uma combinação de várias árvores de decisão para reduzir o *overfitting* e aumentar a precisão. É robusto e funciona bem com dados heterogêneos.

- **Support Vector Machines (SVM)**: Utiliza hiperplanos para separar as classes no espaço de características. É eficaz em problemas de alta dimensão, mas pode ser difícil de ajustar.
- **Redes Neuronais**: Modelos inspirados no funcionamento do cérebro humano que capturam padrões complexos em dados. São altamente precisos, mas requerem grandes quantidades de dados e poder computacional.

Segue-se uma tabela comparativa resumida entre os métodos de classificação:

Table 2: Comparação entre os métodos de classificação

Método	Vantagens	Desvantagens	Aplicabilidade
Regressão Logística	Simples, fácil de interpretar	Ineficaz para dados não lineares	Dados linearmente separáveis
K-Nearest Neighbors (KNN)	Eficaz em problemas não lineares	Computacionalmente intensivo	Pequenos conjuntos de dados
Árvores de Decisão	Interpretação fácil	Propenso a <i>overfitting</i>	Problemas hierárquicos
Random Forest	Reduz <i>overfitting</i> , robusto	Menos interpretável	Dados heterogéneos
Support Vector Machines (SVM)	Eficaz em alta dimensão	Difícil de ajustar	Dados de alta dimensão
Redes Neuronais	Captura padrões complexos	Requer muitos dados e recursos	Grandes volumes de dados

Com base nesta análise, a escolha do método mais adequado será feita considerando a natureza dos dados disponíveis e o objetivo do estudo, assegurando o equilíbrio entre precisão e eficiência computacional.

3 - Viabilidade e Pertinência

0.5 A Importância da Monitorização Operacional em Plataformas Eólicas Offshore

O estudo anteriormente mencionado [7] sublinha a relevância de trabalhos que utilizam dados concretos para avaliar o estado operacional, as condições de funcionamento e o estado de saúde de plataformas eólicas offshore. Este tipo de abordagem não só permite monitorizar e prever o desempenho das turbinas, como também apoia a tomada de decisão em processos de manutenção preventiva e corretiva. A aplicação de tais metodologias contribui diretamente para a redução de custos operacionais e para a otimização da eficiência dos parques eólicos offshore, que enfrentam desafios significativos devido à complexidade do ambiente em que operam.

Neste contexto, os dados recolhidos, como a posição da turbina, a força do vento e outras variáveis ambientais, desempenham um papel crucial na compreensão das condições operacionais. Embora o objetivo principal deste trabalho seja a previsão do estado operacional da turbina (se está ligada ou desligada), o modelo desenvolvido possui um potencial significativo para gerar novas inferências e possibilitar aplicações adicionais no futuro.

0.6 Potencial de Aplicações Derivadas

0.6.1 Previsão de Produção de Energia

Conhecendo o estado operacional das turbinas e as condições de vento, é possível prever a produção total do parque eólico. A correlação entre o estado ligado/desligado, a direção e a velocidade do vento, e a posição da turbina fornece uma estimativa da energia gerada em tempo real, o que é vital para a gestão eficiente da produção.

0.6.2 Previsão de Velocidade do Vento no Local

Ao relacionar os dados de vento medidos com a posição da turbina e o seu estado operacional, é possível prever com maior precisão a velocidade do vento em locais onde não existem medições diretas. Este tipo de inferência é particularmente útil para:

- otimizar a distribuição de turbinas em novos projetos;
- ajustar a operação de parques existentes para maximizar a eficiência.

0.6.3 Identificação de Anomalias e Manutenção Preditiva

Os padrões de deslocamento da turbina em relação à sua posição de equilíbrio, associados ao estado do vento e às condições de operação, podem ser utilizados para identificar anomalias que indicam desgaste ou falhas iminentes. Com esta informação, é possível implementar sistemas de manutenção preditiva, que:

- aumentam a fiabilidade do parque;
- reduzem o tempo de inatividade;
- permitem uma gestão mais eficaz dos recursos de manutenção.

0.7 Contributos para a Gestão de Parques Offshore

O uso de dados concretos e a aplicação de modelos preditivos têm o potencial de transformar a gestão de parques eólicos offshore. A análise contínua do estado operacional, combinada com dados ambientais, pode fornecer informações valiosas para:

- **Planeamento Operacional:** Melhorar a alocação de recursos, como navios de manutenção, ao prever quando e onde serão necessárias intervenções.
- **Gestão de Risco:** Identificar condições extremas que possam afetar a operação das turbinas, permitindo uma resposta mais rápida e eficaz.
- **Otimização da Eficiência Energética:** Maximizar a produção de energia ao ajustar automaticamente a operação das turbinas com base nas condições do vento e no seu estado operacional.

0.8 Base para Estudos Futuros

Embora este estudo se concentre na previsão do estado operacional das turbinas, os dados recolhidos e o modelo desenvolvido estabelecem uma base sólida para investigações futuras. Exemplos incluem:

- **Correlações entre Fatores Ambientais e Desempenho Operacional:** Explorar como variáveis como correntes oceânicas, altura das ondas e condições meteorológicas afetam a operação das turbinas.
- **Modelos Híbridos de Previsão:** Combinar dados de sensores locais com imagens de satélite para criar modelos mais robustos e precisos.
- **Expansão para Outros Contextos:** Aplicar os mesmos princípios de monitorização e previsão a outros tipos de infraestruturas offshore, como plataformas de petróleo e gás ou sistemas híbridos de energia renovável.

4 - Solução Proposta

Para o desenvolvimento deste Trabalho Final de Curso (TFC), será seguido o pipeline tradicional de Data Science, que consiste nas seguintes etapas principais:

- **Definição do Problema:** Identificação clara do problema a ser resolvido e das perguntas de investigação a serem respondidas.
- **Recolha de Dados:** Aquisição de dados provenientes de satélites e de APIs meteorológicas para a análise.
- **Preparação de Dados:** Limpeza, transformação e integração dos dados brutos para garantir a qualidade e consistência necessárias para a análise.
- **Exploração de Dados:** Análise exploratória para identificar padrões, tendências e anomalias que possam orientar o processo de modelação.
- **Modelação:** Desenvolvimento de modelos preditivos utilizando algoritmos de *machine learning*.
- **Avaliação:** Teste e validação dos modelos para garantir a precisão e a capacidade de generalização adequadas.
- **Implementação:** Implementação de uma solução prática e funcional que permita prever o estado operacional das turbinas eólicas offshore.
- **Manutenção e Ajustes:** Monitorização contínua para realizar ajustes no modelo, à medida que novos dados forem recolhidos.

Na Figura 9, é apresentado um fluxograma que explica como serão recolhidos os dados e quais as principais *features* a serem extraídas.

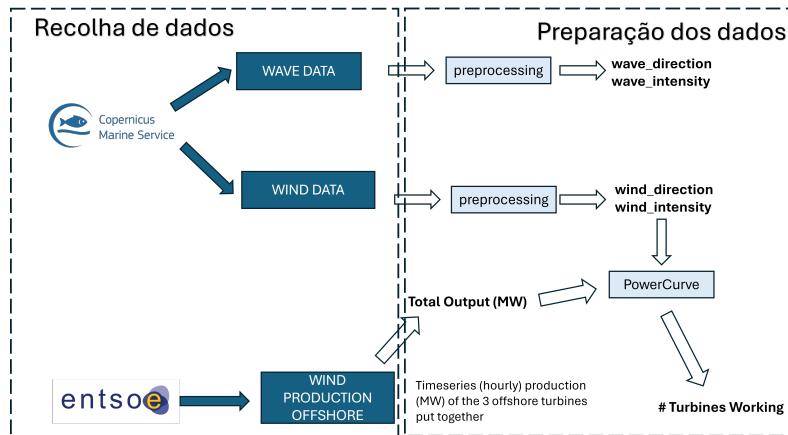


Figure 9: Fluxograma da recolha e preparação dos dados a utilizar.

Os dados provenientes de APIs serão integrados com os dados já trabalhados pelos meus colegas, utilizando o *timestamp* de cada entrada nos datasets como meio de ligação, conforme ilustrado na Figura 10.

O desenvolvimento da solução será realizado em Python, dada a sua popularidade e eficiência na área de *Data Science*. Serão utilizados pacotes amplamente reconhecidos, tais como:

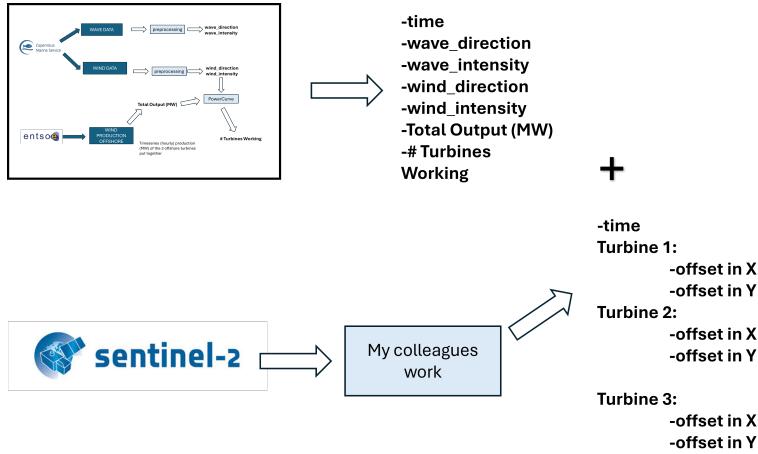


Figure 10: Integração com o trabalho anteriormente desenvolvido.

- **NumPy e pandas:** Para manipulação e análise de dados estruturados.
- **Matplotlib e seaborn:** Para visualização de dados e identificação de padrões.
- **scikit-learn:** Para desenvolvimento de modelos de *machine learning*.
- **TensorFlow ou PyTorch:** Para a implementação de redes neurais profundas, caso necessário, para resolver problemas mais complexos.
- **GeoPandas e rasterio:** Para manipulação de dados geoespaciais provenientes de satélites.
- **APIs meteorológicas:** Como o *Copernicus Marine Service*, para integrar dados adicionais relevantes às condições operacionais.

A escolha do pipeline tradicional de Data Science permite a aplicação de um processo estruturado e amplamente utilizado na indústria, garantindo que as etapas necessárias ao sucesso do projeto sejam seguidas de forma lógica e eficaz.

A utilização de Python e dos seus pacotes é justificada pela vasta gama de bibliotecas disponíveis, pela simplicidade e eficiência no processamento de dados e pela forte comunidade de suporte, que facilita a resolução de problemas e o acesso a recursos de aprendizagem. Além disso, Python é amplamente ensinado e utilizado em disciplinas do curso, reforçando a integração com os conhecimentos adquiridos durante a licenciatura.

Por fim, o modelo será treinado e avaliado, conforme apresentado na Figura 11.

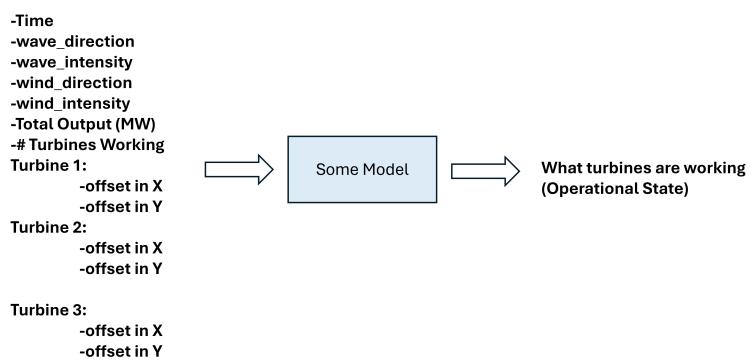


Figure 11: Desenvolvimento e treino do modelo.

5 - Calendário

Os diagramas PERT apresentados a seguir representam um modelo de fluxo de trabalho que é comumente seguido em projetos de Data Science e em teses de mestrado, com o objetivo de planejar e organizar as etapas do processo de análise de dados. Em projetos de Data Science, o processo envolve uma sequência de etapas interdependentes, que vão desde a obtenção de dados até à construção e validação de modelos preditivos, seguido pela análise de resultados e conclusões. Este pipeline, muitas vezes repetido de forma iterativa, inclui tarefas como a recolha e preparação de dados, análise exploratória, treino e teste de modelos, e a extração de insights.

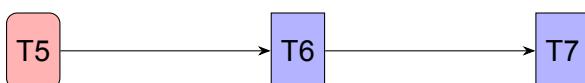
No contexto de uma tese de mestrado, o fluxo de trabalho pode ser estruturado de forma semelhante, com um foco adicional na revisão bibliográfica e na definição clara de objetivos e hipóteses. A primeira parte do processo geralmente envolve uma análise profunda do que já foi feito na área de estudo, seguida pela definição dos dados necessários para a pesquisa e pela preparação dos mesmos para análise.

Para facilitar a leitura e compreensão do processo, dividiu-se os diagramas PERT em grupos, com cada grupo representando uma fase distinta do trabalho. Esta divisão visa melhorar a clareza e facilitar o acompanhamento do progresso de cada etapa. Os grupos foram organizados conforme a sequência natural do fluxo de trabalho: Revisão Bibliográfica, Obtenção de Dados Brutos, Preparação do Dataset, Análise Exploratória, Treino de Modelos e Testes e Conclusões. Cada um desses grupos contém um conjunto de tarefas específicas, que são interligadas e seguem uma ordem lógica para garantir o sucesso da análise.



Revisão Bibliográfica

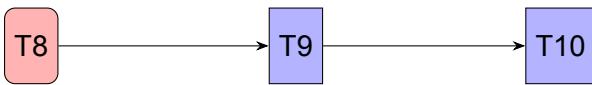
- **T1:** Início da tarefa.
- **T2:** Revisão Bibliográfica - Avaliar o que foi feito em trabalhos anteriores.
- **T3:** Obter características do parque eólico.
- **T4:** Estudar melhores fontes de dados para análise.



Obtenção de Raw Data

- **T5:** Obter dados de posição de cada turbina.
- **T6:** Obter dados meteoceanográficos para o mesmo espaço temporal.

- **T7:** Obter dados de produção do parque eólico.



Preparação do Dataset

- **T8:** Obter posição de equilíbrio de cada turbina.
- **T9:** Calcular offsets de cada turbina em relação ao seu ponto de equilíbrio.
- **T10:** Juntar os dados meteoceanográficos, de produção e de posição em um dataset temporal.



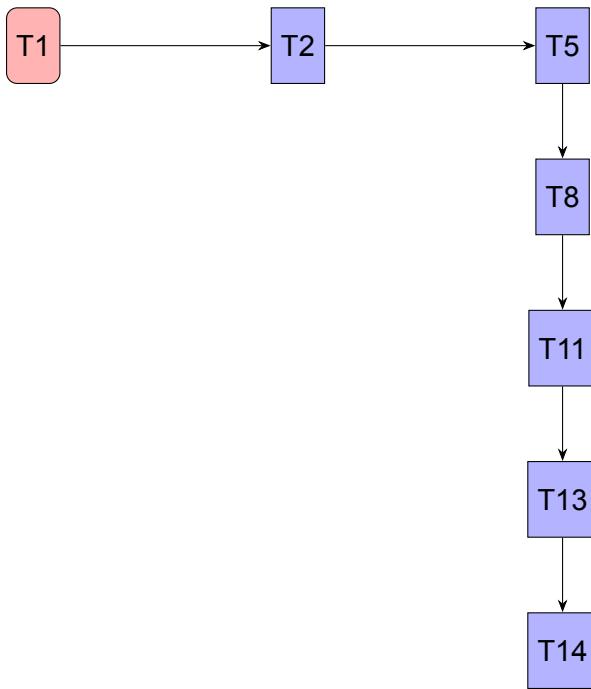
Análise Exploratória

- **T11:** Visualizar os dados.
- **T12:** Explorar correlações e realizar regressões lineares.



Treino do Modelo

- **T13:** Selecionar dados de treino e teste.
- **T14:** Extrair modelos da revisão bibliográfica.
- **T15:** Treinar modelos.
- **T16:** Testar modelos.
- **T17:** Retirar conclusões.



Coneção entre Grupos

- **T1:** Início da tarefa.
- **T2:** Revisão Bibliográfica - Avaliar o que foi feito em trabalhos anteriores.
- **T5:** Obter dados de posição de cada turbina.
- **T8:** Obter posição de equilíbrio de cada turbina.
- **T11:** Visualizar os dados.
- **T13:** Selecionar dados de treino e teste.
- **T14:** Extrair modelos da revisão bibliográfica.

Gráfico de Gantt - Pipeline do Projeto

O gráfico de Gantt a seguir, 12 , descreve as tarefas que compõem o pipeline do projeto, divididas em grupos com base nas diferentes fases do trabalho. Cada tarefa está alocada a um intervalo de tempo, indicando quando é iniciada e quando é concluída.

Conclusão relativa ao planeamento

Em resumo, o presente trabalho foca-se na utilização de dados de satélite e APIs meteorológicas para abordar e tentar mitigar desafios operacionais na energia eólica off-shore, com ênfase na previsão do estado operacional das turbinas. Após a análise das metodologias disponíveis para problemas de classificação, destaca-se a necessidade de um equilíbrio entre precisão, interpretabilidade e eficiência computacional para escolher o método mais adequado ao problema. A integração de dados de satélite com informações meteorológicas em tempo real será um elemento central, visando preencher lacunas existentes na literatura e desenvolver soluções inovadoras para a gestão sustentável de recursos energéticos renováveis.

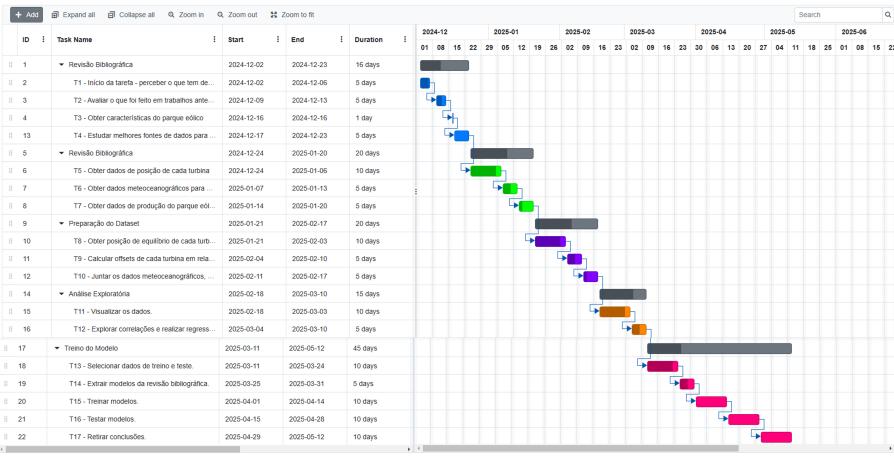


Figure 12: Esquema de Gantt para o TFC

Bibliografia

- [1] Alex Benjamin Wilson. "Offshore wind energy in Europe". In: (2020).
- [2] Philipp R. Thies Giovanni Rinaldi and Lars Johanning. "Current Status and Future Trends in the Operation and Maintenance of Offshore Wind Turbines: A Review". In: *Energies* 14.9 (2021), p. 2484. DOI: [10.3390/en14092484](https://doi.org/10.3390/en14092484).
- [3] Victor Ramos et al. "Assessing the Effectiveness of a Novel WEC Concept as a Co-Located Solution for Offshore Wind Farms". In: *Journal of Marine Science and Engineering* 10.2 (2022). Ed. by Constantine Michailides and Domenico Curto, p. 267. DOI: [10.3390/jmse10020267](https://doi.org/10.3390/jmse10020267).
- [4] Francois Spoto; Omar Sy; Paolo Laberinti; Philippe Martimort; Valerie Fernandez; Olivier Colin. "Overview Of Sentinel-2". In: *2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (2012). DOI: [10.1109/IGARSS.2012.6351195](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6351195).
- [5] Hafsa Ouchra; Abdessamad Belangour; Allae Erraissi. "Machine learning for satellite image classification: A comprehensive review". In: *2022 International Conference on Data Analytics for Business and Industry (ICDABI)* (2023). DOI: [10.1109/ICDABI56818.2022.10041606](https://doi.org/10.1109/ICDABI56818.2022.10041606).
- [6] ASTRIUM GmbH. *The Twin-Satellite Sentinel-2 Orbital Configuration*.
- [7] E. Medina-Lopez et al. "Satellite data for the offshore renewable energy sector: Synergies and innovation opportunities". In: *Remote Sensing of Environment* Volume 264 (2021). DOI: [10.48550/arXiv.2103.00872](https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.00872).
- [8] Wenxuan Xu et al. "Proliferation of offshore wind farms in the North Sea and surrounding waters revealed by satellite image time series". In: (2024).
- [9] Stylianos Hadjipetrou, Stelios Liodakis, Anastasia Sykoti, et al. "Evaluating the suitability of Sentinel-1 SAR data for offshore wind resource assessment around Cyprus". In: *Renewable Energy* 182 (2022), pp. 1228–1239. DOI: [10.1016/j.renene.2021.10.100](https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.100).
- [10] E. Medina-Lopez et al. "Satellite data for the offshore renewable energy sector: Synergies and innovation opportunities". In: (2024).
- [11] Alex Benjamin Wilson. "Offshore wind energy in Europe". In: (2020).
- [12] Victor Ramos, Constantine Michailides, and Domenico Curto. "Assessing the Effectiveness of a Novel WEC Concept as a Co-Located Solution for Offshore Wind Farms". In: *Journal of Marine Science and Engineering* 10.2 (2022), p. 267. DOI: [10.3390/jmse10020267](https://doi.org/10.3390/jmse10020267).