



# Relatório Final

Miguel Pinéu, Hugo Bizarro, João Castro

16/09/2024 a 25/05/2025

# Índice

Resumo.....	3
Palavras-chave.....	3
Introdução.....	4
Metodologias.....	5
Materiais.....	5
Técnicas/Procedimentos.....	5
Cronograma.....	11
Contributos.....	14
Evolução do projeto e dos resultados.....	14
Considerações Finais.....	14

## Resumo

O projeto apresentado propõe a construção de um ekranoplano, uma aeronave projetada de modo a utilizar o efeito solo para gerar sustentação, permitindo que se desloque de forma eficiente a baixas altitudes. Com o desenvolvimento deste projeto, pretendemos explorar e aplicar os conceitos físicos fundamentais envolvidos na construção deste tipo de veículos, além de analisar as suas vantagens, como a eficiência energética, economia de combustível, capacidade de operação em zonas costeiras e segurança operacional.

O projeto teve início com uma intensa fase de pesquisa, essencial para reunir as informações teóricas e práticas necessárias ao desenvolvimento do modelo. Durante esta etapa, tomámos decisões fundamentais, como a escolha dos materiais e a definição do modelo estrutural, garantindo que a aeronave seja funcional e otimizada para o seu propósito.

Após esta fase inicial, o trabalho foi dividido em duas tarefas principais, desenvolvidas em simultâneo:

- A programação do ESP32, responsável pelo controlo dos servos (com base nas indicações do giroscópio) e dos motores
- A construção física do modelo, utilizando os materiais previamente selecionados

Concluídas estas duas fases, juntámos a eletrónica ao modelo físico e testámos o mesmo.

## Palavras-chave

Ekranoplano, efeito solo, coeficiente de sustentação, eficiência, ESP32

## Introdução

A evolução dos meios de transporte tem sido impulsionada pela necessidade de maior eficiência energética, redução de custos operacionais e impacto ambiental minimizado. Neste contexto, o presente projeto foca-se no estudo e construção de um ecranoplano, uma aeronave que utiliza o efeito solo para gerar sustentação e deslocar-se de forma eficiente a baixas altitudes.

O principal objetivo deste projeto é desenvolver um modelo funcional de um ecranoplano, aplicando conceitos físicos fundamentais como a aerodinâmica e estabilidade em voo. Através deste estudo, pretende-se analisar as vantagens deste tipo de veículo, incluindo a redução do consumo de energia, a capacidade de operação em áreas costeiras e fluviais e a segurança inerente à sua baixa altitude de voo. Além disso, o projeto visa compreender os desafios da sua implementação e avaliar a viabilidade da tecnologia em cenários reais.

Os ecranoplanos são veículos que aproveitam o efeito solo, um fenómeno aerodinâmico que ocorre quando uma aeronave voa a uma altitude muito baixa, próxima a uma superfície plana, como a água. Este efeito reduz o arrasto induzido e aumenta a sustentação, tornando o voo mais eficiente em termos de consumo energético.

Ao contrário das aeronaves convencionais, que dependem de grandes quantidades de energia para permanecer em voo, os ecranoplanos combinam características de aviões e embarcações, podendo deslocar-se rapidamente sobre superfícies aquáticas sem a necessidade de pistas de aterragem extensas. Esta tecnologia tem sido estudada para aplicações em transporte de carga e passageiros, especialmente em regiões costeiras, onde pode servir como alternativa aos meios de transporte tradicionais.

O projeto desenvolvido baseia-se no modelo reverse-delta WIG (Wing In Ground), caracterizado por uma configuração de asa que maximiza a estabilidade e eficiência dentro do efeito solo. A estrutura será construída com materiais leves, como foamboard, e contará com um sistema de controlo baseado num ESP32, responsável pela gestão dos motores e superfícies de controlo através de sensores.

Com este estudo pretende-se não apenas demonstrar a viabilidade do conceito, mas também explorar as suas aplicações no contexto dos transportes sustentáveis, destacando o potencial dos ecranoplanos na redução das emissões de carbono e na eficiência logística em ambientes aquáticos.

## Metodologias

### Materiais

- Foamboard
- 2 motores 2200Kv
- 2 ESC 30A
- NodeMCU ESP 32
- 2 Baterias LiPo 3S 11.1V
- Módulo Grove- IMU 9DOF
- Madeira balsa
- 3 Micro Servos 9G
- Comando Futaba T-FHSS

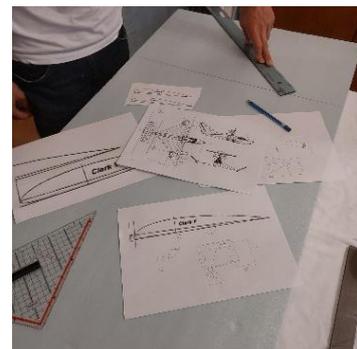
### Técnicas/procedimentos

No primeiro período, como detalhado no relatório inicial, tratámos inicialmente de realizar uma longa pesquisa de forma a compreender os conceitos teóricos físicos necessários para a construção do ekranoplano. Esta pesquisa levou à tomada de várias decisões, desde os materiais à escolha do design do modelo.

O design pelo qual optámos acabou por ser o reverse-delta WIG (Wing In Ground), por ser um modelo que oferece vantagens significativas, especialmente em termos de estabilidade, eficiência e versatilidade operacional. É também um design que permite otimizar a interação com o efeito solo e ideal para modelos de pequena escala.



*Figura 1: Reverse-Delta WIG*



*Figura 2: Sketches do modelo*

O coeficiente de sustentação ( $C_L$ ) é uma grandeza fundamental na aerodinâmica, essencial para a realização deste projeto, que mede a eficiência com que uma asa (ou uma superfície aerodinâmica) gera sustentação em relação à densidade do fluido (ar), à área da asa e à velocidade do fluxo. Ele é parte integrante da seguinte equação:

$$L = C_L \frac{\rho}{2} S V^2$$

Esta grandeza é diretamente afetada pelo ângulo de ataque. Conforme o ângulo de ataque aumenta, o coeficiente de sustentação também aumenta, até um certo ponto, chamado de ângulo de estol, onde a sustentação diminui abruptamente devido à separação do fluxo de ar na asa. Assim, é fundamental operar abaixo do ângulo de estol para evitar a perda de sustentação. Tendo tudo isto em conta, o ângulo de ataque que definimos foi de entre 3° e 4°.

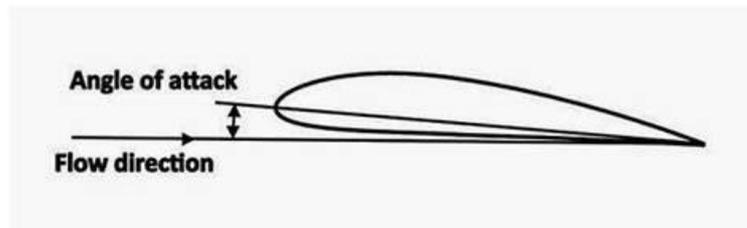


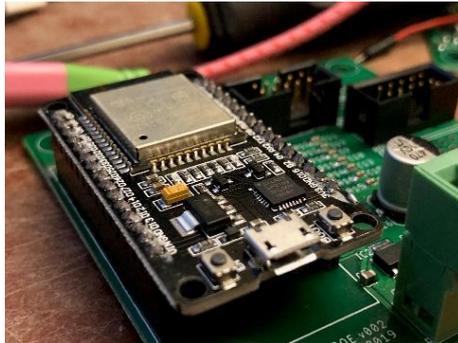
Figura 3: Ângulo de ataque

Através das medições da área, da massa, velocidade e área das asas do ecranoplano conseguimos calcular o coeficiente de sustentação (substituindo estes mesmos valores na fórmula apresentada acima). Estes foram os valores utilizados:

Sustentação	7.161N
Densidade média do ar	1.225Kg/m <sup>3</sup>
Massa total	0.730Kg
Velocidade	10m/s
Área das asas	0.0961m <sup>2</sup>
Área total	0.2911m <sup>2</sup>
<b>Coeficiente de sustentação</b>	<b>1.2</b>

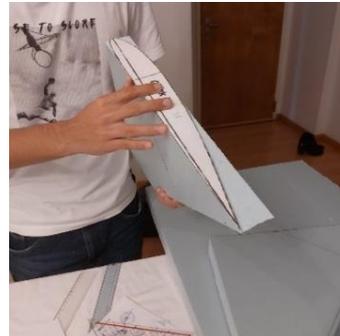
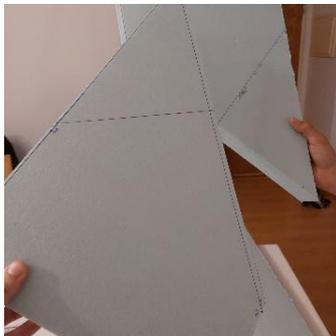
O valor obtido é bastante positivo e vai ao encontro das nossas expectativas, visto que idealmente o valor do coeficiente para um ecranoplano estaria entre 1 e 1.5.

Para um ekranoplano com mais estabilidade, controlo e automação, nós optámos pelo uso de um ESP32. Este componente, combinado com outros (Módulo Grove, ESC...) oferece inúmeras vantagens. Em termos de estabilidade, permite a correção automática de desvios; em termos de controlo, oferece respostas rápidas e precisas aos comandos dados; em termos de automação, apresenta a possibilidade de modos automáticos, como manutenção de altitude e outro tipo de correções e ajustes. É também bastante eficiente e apresenta um excelente custo-benefício.



*Figura 5: ESP32*

Ainda no primeiro período demos início à construção do modelo do ekranoplano. Para a sua construção utilizámos hot-wire cutting, tendo finalizado as asas e grande parte do corpo do mesmo.



*Figuras 6 e 7: Criação do modelo*

No segundo período houve uma divisão de tarefas a ser realizadas em simultâneo: a programação do ESP32 e a continuação da criação do modelo.

A programação foi desenvolvida na plataforma Arduino IDE (Integrated Development Environment). Iniciámos pela comunicação entre os motores e o ESP32, passando depois para a comunicação com os servos, que funcionam a partir das indicações do Módulo Grove (um sensor composto por giroscópio, acelerómetro e bússola eletrónica). Por fim, os códigos foram integrados numa única programação funcional.

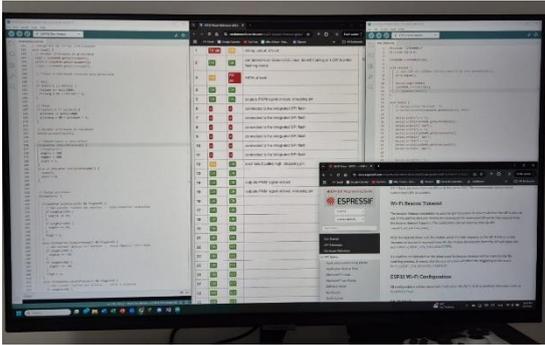


Figura 8: código de programação do ESP32

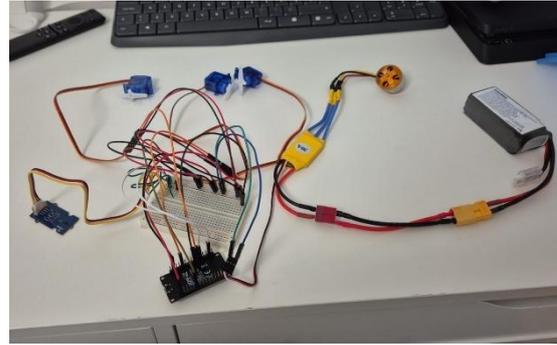


Figura 9: Circuito elétrico (servos e um motor)

Durante esta fase, surgiram dificuldades, principalmente na comunicação entre o ESP32 e o Módulo Grove, devido à complexidade da programação. Estes problemas causaram alguns atrasos, mas foram resolvidos com sucesso, e toda a programação está agora concluída. Além disso, conseguimos atingir um dos nossos objetivos: permitir o controlo do ESP32 via telemóvel através da aplicação Dabble, possibilitando a manipulação remota dos servos e motores.

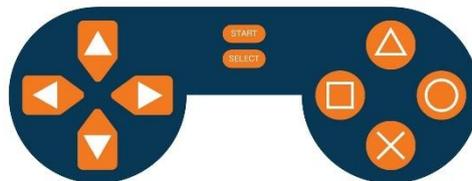


Figura 10: Aplicação Dabble- comando

Na construção do modelo, desenhámos num software de CAD (computer-assisted design) chamado MicroStation os perfis das asas e os fins (suportes do estabilizador horizontal que vão ser colocados no corpo para dar mais estabilidade) e levámos essas peças a uma loja para serem cortados a laser no contraplacado leve que escolhemos. Também criámos outras peças, como a peça de encaixe das asas, que foi exportada para formato .stl para ser impressa em 3D.

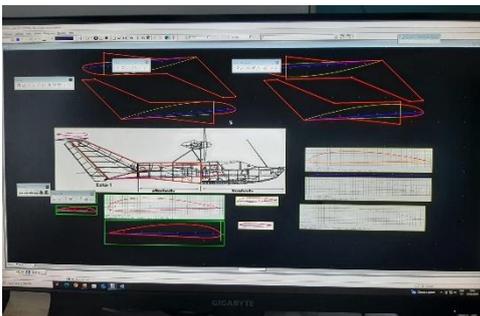


Figura 11: MicroStation- perfil asas e fins

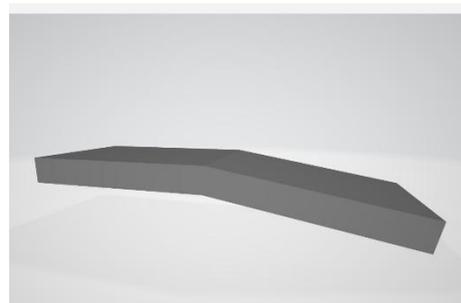
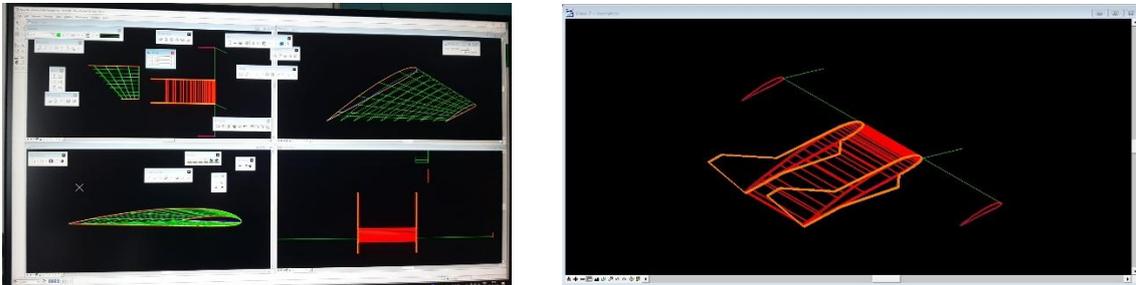


Figura 12: Encaixe das asas- .stl

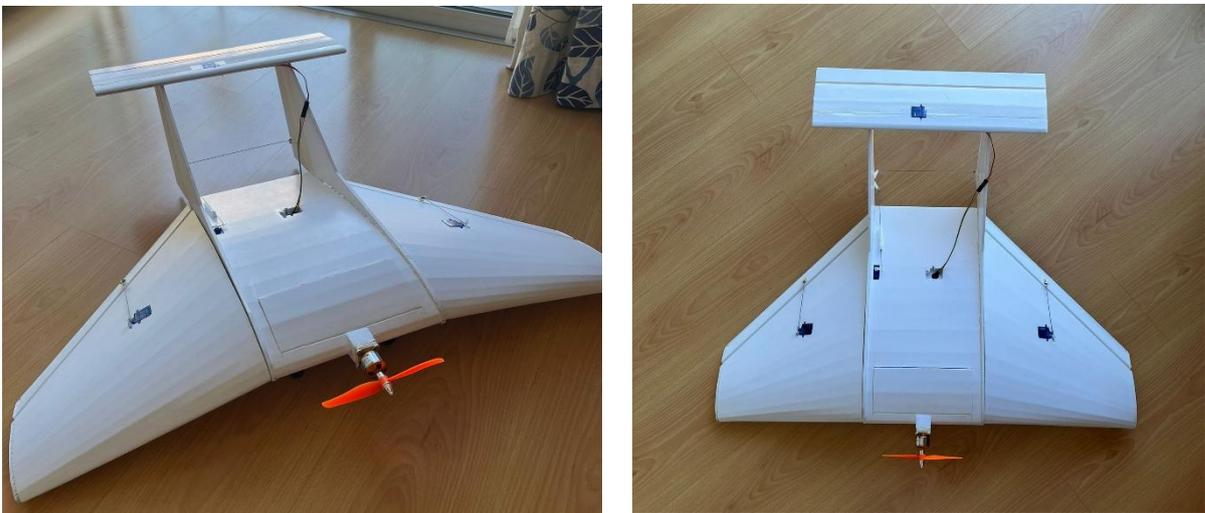
No seguimento disto, começámos a desenvolver um modelo completo do ekranoplano no MicroStation, para posterior simulação no XFLR5 (um software para design e análise de modelos de aeronaves baseado no programa XFOIL) e teste da aerodinâmica (servindo, entre outras coisas, como mais uma prova teórica de que o ekranoplano voa).



*Figuras 13 e 14: MicroStation- modelo do ekranoplano*

É também importante referir algumas mudanças que fizemos devido a problemas encontrados. O arame de corte do XPS revelou-se difícil de operar, libertava fumos desagradáveis e não permitia substituir peças sem repetir todo o processo de corte, que era demorado e complexo. Como solução, decidimos alterar material de diversas partes do modelo para foamboard, uma alternativa que já tínhamos considerado inicialmente.

Entretanto, já no terceiro período, o modelo físico foi finalizado e a eletrónica foi adicionada ao mesmo.



*Figura 15: Modelo Finalizado*

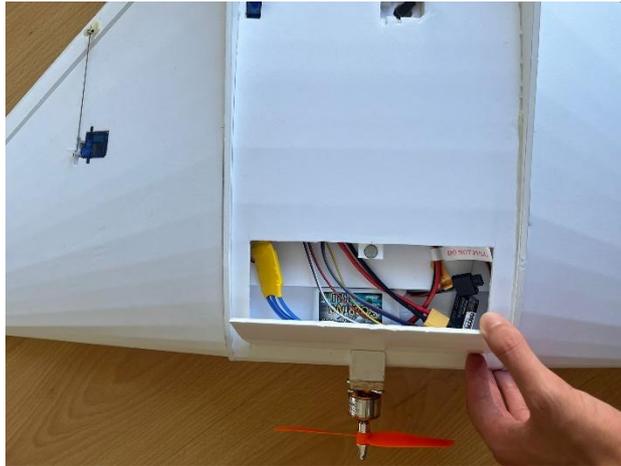
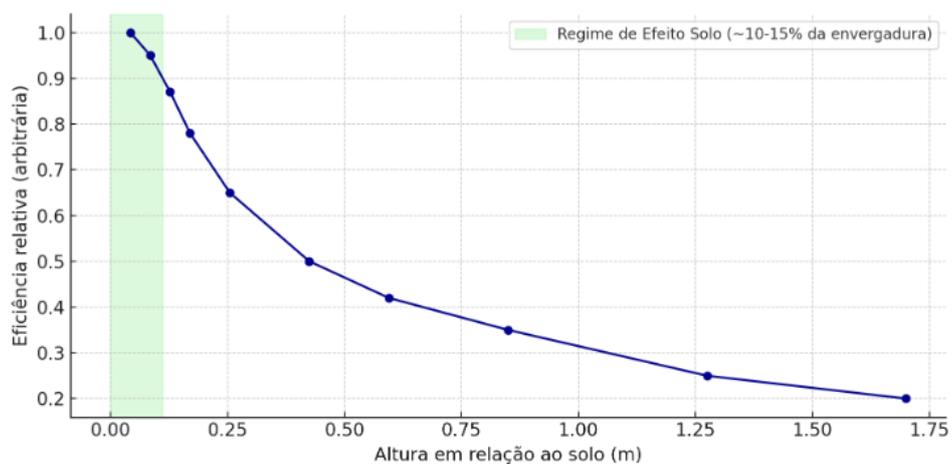


Figura 16: Implementação da eletrônica no modelo

Importante referir que ao longo deste período surgiu também outro problema, percebemos que usar a aplicação Dabble para controlar o ecranoplano não era uma opção viável, pois o seu alcance era pequeno. Para resolver esta situação tínhamos duas opções, ou comprávamos mais um ESP32 (que permitia aumentar bastante o alcance), ou arranjávamos um comando através do qual controlaríamos o ecranoplano. A opção que escolhemos foi a segunda, através de um comando T-FHSS. Para além disto, também durante este período, foi feita uma reformulação de toda a programação, o que permitiu otimizar e simplificar o seu funcionamento.

Para finalizar foram feitos os testes necessários ao modelo e foi confirmado o seu funcionamento. (Que pode ser visualizado no vídeo enviado juntamente com o relatório)

Após a garantia do funcionamento da aeronave decidimos também testar um aspeto fundamental da mesma: a eficiência. A característica mais fundamental e importante do ecranoplano é a sua capacidade de ser mais eficiente, ao aproveitar o efeito solo. Assim, verificámos a existência de um comportamento que se enquadra com as tendências típicas observadas em estudos de ecranoplanos, e que pode ser visualizado através do seguinte gráfico:



No gráfico apresentado, o termo eficiência relativa é utilizado para representar o desempenho aerodinâmico do ecranoplano em diferentes alturas. Este valor reflete a capacidade do modelo gerar mais sustentação com menos energia e avalia a redução do arrasto induzido. Assim, este valor não apresenta unidades físicas, mas demonstra de forma qualitativa como o voo próximo ao solo permite maior eficiência, reduzindo o arrasto e aumentando a sustentação.

Ao interpretar o gráfico é possível concluir que a eficiência relativa é maior quando o ecranoplano voa dentro do efeito solo – até cerca de 10-15% da envergadura (no nosso caso, 8,5 a 11,5cm de altura). À medida que o veículo se afasta do solo, essa eficiência diminui significativamente, pois perde os benefícios do efeito solo. A área a verde marca a zona de voo ideal para aproveitar o efeito solo.

## Cronograma

### Semana 1 (15 de setembro - 21 de setembro)

Pesquisa e análise de potenciais modelos para o ecranoplano.

### Semana 2 (22 de setembro - 28 de setembro)

Pesquisa aprofundada sobre conceitos físicos e teóricos necessários à construção do modelo. Início dos cálculos para as proporções do ecranoplano.

Problema encontrado: devido à falta de conhecimentos relativos a esta área, foram encontradas muitas dificuldades quanto aos cálculos para a materialização do modelo, que provocaram severos atrasos no projeto

### Semana 3 (29 de setembro - 5 de outubro)

Tentativa de contacto com Bruno Silva (antigo aluno do colégio Valsassina) e com ex-alunos do curso de engenharia Aeroespacial do Instituto Superior Técnico (IST), para nos orientarem relativamente à parte teórica do projeto.

### Semana 4 (6 de outubro - 12 de outubro)

Finalização dos sketches para o modelo: as asas terão um formato de reverse-delta.

### Semana 5 (13 de outubro - 19 de outubro)

Tentativa de utilização da plataforma XFLR5. Mais uma vez, a falta de conhecimentos mais aprofundados nesta área tornou impossível o progresso do projeto neste aspeto.

### Semana 6 (20 de outubro - 26 de outubro)

Tentativa bem-sucedida de contacto com os ex-alunos do IST e consequente progresso teórico no projeto.

### Semana 7 (27 de outubro - 2 de novembro)

Finalização dos cálculos necessários à construção do protótipo. Escolha de Clark Y como perfil da asa.

### Semana 8 (3 de novembro - 9 de novembro)

Escolha de XPS como principal material para a fuselagem da aeronave.

### Semana 9 (10 de novembro - 16 de novembro)

Encomenda/compra de elementos essenciais para o ekranoplano (motores, controladores de velocidade eletrónicos e XPS).

### Semana 10 (17 de novembro - 23 de novembro)

Começo da utilização de *hot-wire cutting* para construção do protótipo. A curvatura necessária para fazer a asa revelou-se difícil de criar usando as condições disponíveis.

### Semanas 11-12 (24 de novembro - 7 de dezembro)

Encomenda/compra de elementos essenciais para o ekranoplano (baterias e servos).

### Semanas 12-14 (8 de dezembro – 28 de dezembro)

Finalização das asas e parte do corpo do modelo.

### Semanas 16-18 (29 de dezembro – 18 de janeiro)

Início da programação do ESP32, começando pela comunicação com os motores e, posteriormente, avançando para a comunicação com os servos.

Problema encontrado: surgiram dificuldades, principalmente na comunicação entre o ESP32 e o Módulo Grove, devido à complexidade da programação.

### Semanas 19-20 (19 de janeiro – 1 de fevereiro)

Desenho do perfil das asas e fins no MicroStation. Início do desenvolvimento do modelo completo no MicroStation.

### Semanas 21-22 (2 de fevereiro – 15 de fevereiro)

Resolução dos problemas relacionados com a programação e integração dos códigos num único programa funcional. Controlo do ESP32 via telemóvel através da aplicação Dabble.

### Semanas 23-25 (16 de fevereiro – 08 de março)

Criação de mais peças para o modelo, tais como os fins, um estabilizador horizontal, o encaixe das asas...

Problema encontrado: o arame de corte do XPS revelou-se difícil de operar, libertava fumos desagradáveis e não permitia substituir peças sem repetir todo o processo de corte, que era demorado e complexo.

Solução: alterar o material de diversas partes do modelo para foamboard

### Semanas 26-31 (09 de março – 12 de abril)

Finalização da totalidade do modelo físico, reformulação da programação e finalização do desenvolvimento do modelo no MicroStation para simular no XFLR5.

## Semanas 32-36 (20 de abril – 24 de maio)

Junção da eletrónica ao modelo. Teste do ecranoplano e confirmação do seu funcionamento.

## Contributos

Ao longo do projeto, houve fases realizadas em conjunto e outras de forma mais individual, no fim, estes foram os contributos por etapas:

- Pesquisa e escolha dos materiais- Miguel Pinéu, Hugo Bizarro, João Castro
- Programação- Hugo Bizarro
- Criação do modelo- Miguel Pinéu, João Castro
- Modelo no Microstation- João Castro
- Cálculos teóricos- Miguel Pinéu
- Teste no XFLR5- Miguel Pinéu, Hugo Bizarro, João Castro
- Junção do modelo e eletrónica- Miguel Pinéu, Hugo Bizarro, João Castro
- Testes do modelo- Miguel Pinéu, Hugo Bizarro, João Castro

## Evolução do projeto e dos resultados:

Apesar de todas as adversidades mencionadas ao longo do relatório e de toda a dificuldade inerente ao desenvolvimento de um projeto desta complexidade, fomos sempre capazes de ultrapassar os problemas e adotámos metodologias que consideramos bastante adequadas. Os resultados obtidos são bastante satisfatórios e vão de encontro às expectativas e ambições que tínhamos definido para este projeto. Todo o desenvolvimento do projeto envolveu bastantes aprendizagens e lições que consideramos fundamentais para que pudessemos chegar a este resultado final.

## Considerações finais:

O projeto apresentado revelou-se bastante desafiante, permitindo-nos assimilar diversas aprendizagens, lições e conhecimentos. Como principais objetivos do projeto tínhamos a construção de um ecranoplano funcional e com uma grande capacidade de autonomia, a compreensão dos princípios físicos inerentes ao seu funcionamento e a noção de possíveis possibilidades empreendedoras e aplicações desta tecnologia.

Após todos estes meses de trabalho acreditamos que os objetivos foram alcançados. Conseguimos construir um modelo de um ecranoplano funcional e com a autonomia prevista, utilizando o efeito solo para se movimentar de forma

mais eficiente. Este bom resultado reflete-se também na nossa capacidade para perceber os princípios físicos ligados ao funcionamento de um ekranoplano. Quanto às suas aplicações, nós fomos capazes de identificar as vantagens desta tecnologia e perceber onde pode ser aplicada (tal como foi explicado na “Introdução”).

É possível retirar muitas lições do desenvolvimento deste projeto. A principal sendo o planeamento. A necessidade de planear bem a forma como iríamos desenvolver esta aeronave e garantir que cada passo ficava concluído com sucesso e sem margem de erro foi o que nos permitiu ir desenvolvendo o ekranoplano a um bom ritmo. No geral, foi um trabalho que envolveu bastante planeamento e precisão, pois são aspetos que fazem toda a diferença entre ter um projeto funcional e bem desenvolvido ou um projeto que não atinge os resultados pretendidos.

Após toda a pesquisa feita e todos os resultados que obtivemos, acreditamos que a criação de um ekranoplano funcional é viável e bastante promissora, embora requeira também uma especial atenção e cuidado aos detalhes inerentes a este tipo de aeronaves.