

# 1                   **CONTROLE DE SUSTENTAÇÃO NEGATIVA** 2                   **VEICULAR A PARTIR DO AJUSTE DO ÂNGULO DE** 3                   **ATAQUE DO AEROFÓLIO**

4                   **Luiz Felipe Bastos Coelho (luiz.bastos@souunit.com.br); Vitor Matheus Lima**  
5                   **Konasugawa (vitor.matheus@souunit.com.br); Profº Msc. Roberto Felipe**  
6                   **Andrade Menezes (rmenezeseng@gmail.com)**

## 7                   **RESUMO**

8                   *Atualmente as competições automobilísticas estão cada vez mais comuns no Brasil, e com isso, há*  
9                   *uma demanda cada vez maior para a preparação dos veículos utilizados. Além disso, a aerodinâmica*  
10                  *é um dos principais fatores para a performance de um carro, já que ela influencia diretamente em*  
11                  *todos os aspectos da dirigibilidade, desde a estabilidade em curvas até a velocidade final. Este*  
12                  *trabalho busca desenvolver um sistema aerodinâmico ativo utilizando uma asa com perfil invertido e*  
13                  *controladores, capaz de gerar sustentação negativa para uma maior estabilidade em curvas, atuar*  
14                  *como Sistema de Redução de Arrasto em retas (ou ultrapassagens), e como um sistema de freio*  
15                  *aerodinâmico para auxiliar o sistema de freio mecânico. Dessa forma, foi desenvolvido um*  
16                  *controlador, utilizando Arduino, que irá possibilitar que um servo motor regule o ângulo de ataque da*  
17                  *asa para a posição de acordo com as configurações pré-definidas. E por fim também é apresentada a*  
18                  *análise das forças resultantes geradas pela asa em seus diferentes Ângulos de Ataque, sendo eles*  
19                  *0° , 14° e 75° para DRS, posicionamento ótimo e freio aerodinâmico respectivamente.*

20                  **Palavras-chave:** Aerodinâmica. Sustentação Negativa. Automobilismo. Controle.

## 21                  **ABSTRACT**

22                  *Currently, automobile competitions are increasingly common in Brazil, and with that, there is an*  
23                  *increasing demand for the preparation of the vehicles used in these events. In addition, aerodynamics*  
24                  *is one of the main factors for a car's performance, as it directly influences all aspects of handling, from*  
25                  *cornering stability to final speed. This work seeks to develop an active aerodynamic system using an*  
26                  *inverted profile wing and controllers, capable of generating negative lift for greater stability in curves,*  
27                  *acting as a DRS (Drag Reduction System) on straights (or overtaking), and as an airbrake system to*  
28                  *assist the mechanical brake system. In this way, a controller was developed, using Arduino, which will*  
29                  *allow a servo motor to regulate the angle of attack of the wing to the position according to the pre-*  
30                  *defined configurations. Finally, the analysis of the resulting forces generated by the wing at its different*  
31                  *angles of attack is also presented. Being 0°, 14° and 75° for DRS, optimal positioning and air brake*  
32                  *respectively.*

33                  **Keywords:** Aerodynamics. Downforce. Automobilism. Control.

## 34                  **1 INTRODUÇÃO**

35                  A evolução do automobilismo gera cada vez mais complexidade no projeto de  
36                  carros de corrida, buscando o aumento na performance através do desenvolvimento  
37                  de componentes mais precisos e complexos. Uma das áreas com maior avanço é a  
38                  aerodinâmica, que, desde o final dos anos 60, passou a ser uma das prioridades no

1 desenvolvimento de carros de corrida.

2 Segundo Oliveira (2017), até o início dos anos 60 a única preocupação com a  
3 aerodinâmica era em relação a redução de arrasto. No entanto, no final dessa  
4 década começaram a surgir estudos sobre o uso das características aerodinâmicas  
5 para gerar força de sustentação negativa. Os primeiros exemplos do uso de asas  
6 para essa aplicação foram no ano de 1966 nas corridas Can-Am (*Canadian-*  
7 *American Challenge Cup*) pela equipe Chaparral, e logo em seguida, em 1968, essa  
8 tecnologia passou a ser adotada por times de Fórmula 1.

9 Com o passar do tempo as aplicações aerodinâmicas foram sendo  
10 desenvolvidas. Nos anos 70, equipes de Fórmula 1 começaram a utilizar o efeito  
11 solo que gera downforce a partir da zona de baixa pressão presente entre o  
12 assoalho do carro e a pista devido ao fluxo de ar em alta velocidade. Nessa década  
13 também se tem uma evolução dos estudos envolvendo análises CFD (*Computer*  
14 *Fluid Dynamics* - Dinâmica dos Fluidos Computacional). Na década de 80, com o  
15 avanço dos computadores, as análises CFD se tornam ainda mais complexas e  
16 nesse período também surge o primeiro carro de rua a utilizar um sistema de  
17 aerodinâmica ativa, o Porsche 959.

18 O intuito deste trabalho é apresentar a funcionalidade de um sistema de  
19 aerodinâmica ativa aplicados a carros de corrida, explicando de forma teórica o tema  
20 e contextos abordados durante o desenvolvimento do mesmo. Também serão  
21 demonstrados os estudos feitos durante o desenvolvimento do projeto para definição  
22 das características dos componentes como perfil aerodinâmico, asa e atuadores,  
23 juntamente com a modelagem dos componentes e construção de um protótipo.

24 Além disso, é feita a análise dos resultados obtidos com implemento de um  
25 sistema aerodinâmico ativo, a partir de um software CFD, e demonstrado como a  
26 asa pode afetar a sustentação negativa nas posições inicial, DRS e Freio  
27 aerodinâmico comparando as forças resultantes geradas pela asa em 3 posições  
28 distintas.

## 29 **2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA**

30 A preparação de veículos de rua para uso em circuitos é uma prática bastante  
31 comum e que possui um abrangente mercado. Atualmente existem diversas  
32 empresas como HKS, Brembo, Akrapovic, Bride, JEGS, VeilSide e Rocket Bunny,  
33 que projetam e fabricam diversos componentes mecânicos e aerodinâmicos para  
34 essa finalidade.

35 A seguir serão abordados alguns conceitos teóricos de aerodinâmica, sua  
36 aplicação e importância para veículos de rua e de competição, e como esse  
37 fenômeno influencia os carros.

### 38 **2.1 Aerodinâmica**

39 O desenvolvimento de um dispositivo aerodinâmico exige conhecimentos de  
40 diversas áreas, como mecânica, mecatrônica, elétrica, civil, etc. Para ser capaz de  
41 produzir este projeto, foram utilizados assuntos como fenômenos de transporte,  
42 cálculo, métodos estatísticos e conteúdos específicos para aerodesign. Sendo  
43 assim, verifica-se que:

44 A aerodinâmica é essencialmente um ramo do projeto de engenharia. O

1 design é o ponto culminante de todas as atividades de engenharia,  
 2 incorporando operações e análises de engenharia como ferramentas para  
 3 atingir o objetivo do projeto (SADRAEY, 2013, p4).

4 Além do conceito de aerodinâmica, é importante salientar outros conceitos  
 5 sobre o projeto, como a sustentação negativa, que com o auxílio de um aerofólio o  
 6 veículo sofre uma força vertical que mantém ele firme ao solo, ao contrário da força  
 7 de sustentação, que impulsiona o veículo a sair do solo. Outro termo bastante  
 8 utilizado no ramo da engenharia aeronáutica é ângulo de ataque ( $\alpha$ ) que se refere a  
 9 posição da asa em relação ao veículo e tem grande influência na estabilidade a ser  
 10 proporcionada ao veículo.

11 Para analisar alguns dos componentes é necessário entender em que  
 12 ambiente o mesmo trabalhará. A asa é uma estrutura constantemente envolvida pelo  
 13 ar, um fluido, e, assim como todo fluido, tem uma viscosidade. Sendo assim, existe  
 14 uma faixa de Reynolds em que o perfil aerodinâmico da asa está imerso.

15 A Equação (1) de Reynolds, segundo Vilanova (2011), foi utilizada para definir  
 16 a velocidade em que a asa está atuando.

$$17 \quad Re = (D \cdot V \cdot \rho) / \mu \quad (1)$$

18 Sendo Re o número de Reynolds, D o diâmetro pelo qual o fluido escoar, V a  
 19 velocidade de escoamento do fluido,  $\rho$  a densidade do fluido e  $\mu$  a viscosidade  
 20 dinâmica do fluido.

21 Por fim, é preciso relacionar algumas equações para poder dimensionar a asa  
 22 e analisar os parâmetros utilizados para a escolha do perfil. As equações, de acordo  
 23 com Roskam (1997), utilizadas para definir a Corda Média Aerodinâmica da Asa  
 24 (MAC) a partir do Alongamento da Asa (AR), da Área (S) e da Envergadura (b)  
 25 podem ser vistas nas Equações (2), (3) e (4) abaixo.

$$26 \quad AR = b / MAC \quad (2)$$

$$27 \quad S = b \cdot MAC \quad (3)$$

$$28 \quad AR = b^2 / S \quad (4)$$

## 29 **2.2 Aerodinâmica automotiva**

30 A aerodinâmica automotiva estuda o efeito do fluxo de ar em torno de um  
 31 automóvel, visto que esse fluido afeta a aceleração, velocidade máxima,  
 32 dirigibilidade e até consumo de combustível de um carro. Sendo assim, um bom  
 33 projeto aerodinâmico é importante para garantir redução de ruídos, aumento da  
 34 estabilidade, redução do arrasto, ventilação da cabine, refrigeração dos  
 35 componentes como pode ser visto abaixo:

36 Em um carro as forças de frenagem, aceleração e curva são criadas na área  
 37 de contato entre o pneu e a pista. Essas forças de fricção são fortemente  
 38 afetadas pelas forças verticais aplicadas nos pneus e são limitadas pelo  
 39 coeficiente máximo de atrito. Por exemplo, podemos fazer uma curva a uma  
 40 determinada velocidade, mas se excedermos essa velocidade o carro vai  
 41 derrapar. Esse é o resultado de se exceder o limite da aderência do pneu  
 42 (KATZ, 1995).

43 Em carros de corrida, o estudo aerodinâmico é importante não só para evitar

1 forças de arrasto desnecessárias que geram perdas, mas principalmente para  
 2 contribuir com o aumento da velocidade máxima em curvas durante as corridas  
 3 através do aumento da força vertical para baixo resultando em maior aderência do  
 4 veículo com a pista:

5 A força aerodinâmica para baixo, aumenta a carga nos pneus sem aumentar  
 6 a massa do veículo, o resultado é um aumento na capacidade de curva sem  
 7 penalidade de peso, o que reduz o tempo das voltas. O aspecto mais  
 8 incrível da importância da força para baixo é que ela só foi observada pela  
 9 comunidade dos engenheiros de carros de corrida no fim dos anos 1960  
 10 (KATZ, 1995).

11 Um método mais complexo e capaz de gerar resultados mais satisfatórios é  
 12 através da implementação de um sistema aerodinâmico ativo. Esse tipo de sistema  
 13 pode ser encontrado em algumas classes de corrida como a Fórmula 1 e em alguns  
 14 modelos de carro de rua. Esse mecanismo é capaz de contribuir com a performance  
 15 gerando diferentes níveis de arrasto e força de sustentação em diferentes condições  
 16 ou faixas de velocidade, otimizando o uso dos componentes aerodinâmicos para a  
 17 situação presente.

18 Um sistema de aerodinâmica ativa comumente utilizado funciona através da  
 19 alteração do  $\alpha$  da asa do veículo, gerando a força de sustentação negativa desejada  
 20 para a situação. Outra aplicação da aerodinâmica ativa é o sistema DRS, sendo  
 21 utilizado em retas ou ultrapassagens para diminuição do arrasto através do  
 22 posicionamento da asa a zero graus de  $\alpha$ , contribuindo para o aumento da  
 23 aceleração. Também é possível utilizar um mecanismo de freio aerodinâmico, que  
 24 auxilia o freio mecânico na redução de velocidade, a partir de um aumento proposital  
 25 no arrasto com o aumento extremo do  $\alpha$  da asa.

## 26 2.3 Track Day

27 O Track Day, é um evento em que autódromos são liberados para que o  
 28 público possa pôr à prova a capacidade dos carros, correndo contra outros pilotos ou  
 29 contra o relógio. Pensando nisso, este trabalho foi desenvolvido para estudar a  
 30 influência da sustentação negativa de um veículo, aumentando a sua eficiência para  
 31 esses tipos de evento.

32 Diferente de corridas de arrancada, as corridas em circuito, como visto na  
 33 Figura 1, contam com diversas curvas, requerendo bastante estabilidade dos  
 34 veículos. Por isso a aerodinâmica se torna um fator muito influente nesse tipo de  
 35 competição. Um carro com projeto aerodinâmico mais eficiente além de lidar com  
 36 menos forças de arrasto parasita, também tem a capacidade de fazer curvas em  
 37 velocidades mais elevadas devido a força vertical gerada pelos componentes  
 38 aerodinâmicos aplicados ao veículo.

39 Figura 1 – Track Day



40 Fonte: Acervo pessoal (2019)  
 41

### 3 SOFTWARE UTILIZADO PARA A ANÁLISE AERODINÂMICA

Para a análise do perfil aerodinâmico em determinadas condições é possível utilizar o software XFLR5 versão 6.47, onde é simulada a exposição do perfil a um determinado valor de Reynolds, relações entre a sustentação e arrasto, momento e  $\alpha$ , etc. Na Figura 2 é possível ver a logo do software, e nas Figuras 3, 4 e 5 algumas análises feitas para exemplificar a utilização do mesmo.

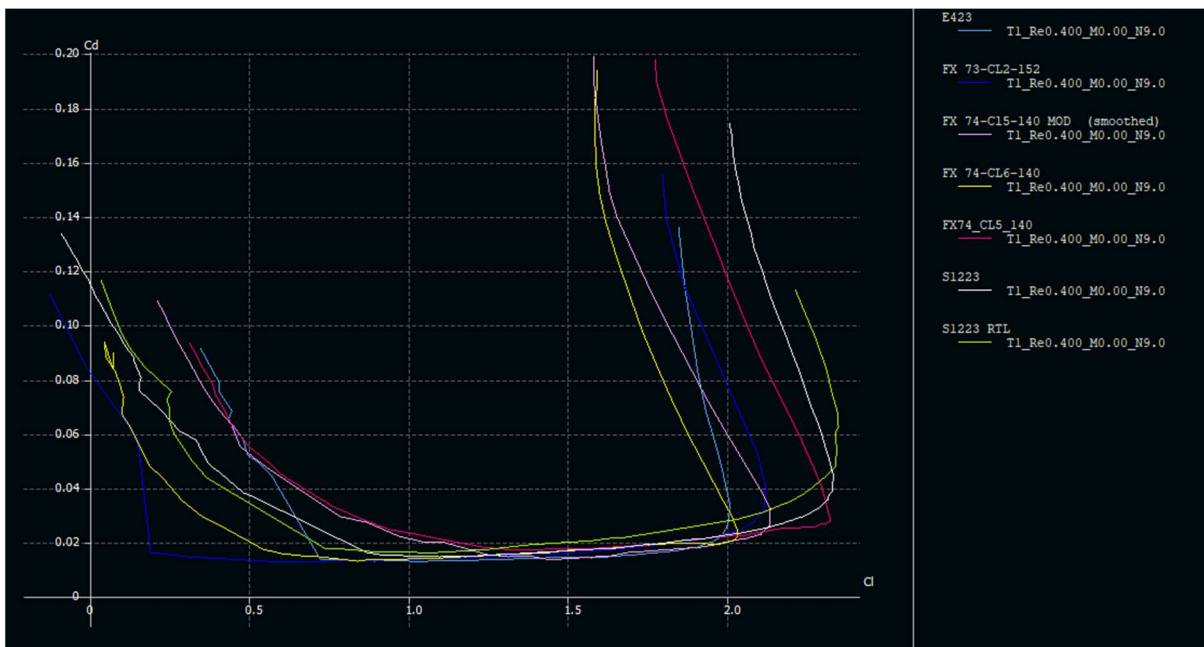
Figura 2 – XFLR5



Fonte: XFLR5 (2022)

A Figura 3 mostra uma simulação com vários perfis (listados e destacados à direita), feita para verificação da eficiência em função do Coeficiente de Arrasto ( $C_d$  - Drag Coefficient) pelo Coeficiente de Sustentação ( $C_l$  - Lift Coefficient). O eixo horizontal representa a força de sustentação e o eixo vertical a força de arrasto. Para validar se um perfil é eficiente neste tipo de gráfico, o perfil deve obter menor variação do  $C_l$  para os valores de  $C_d$  e altos valores de  $C_l$ .

Figura 3 – Relação  $C_l$  x  $C_d$  dos perfis

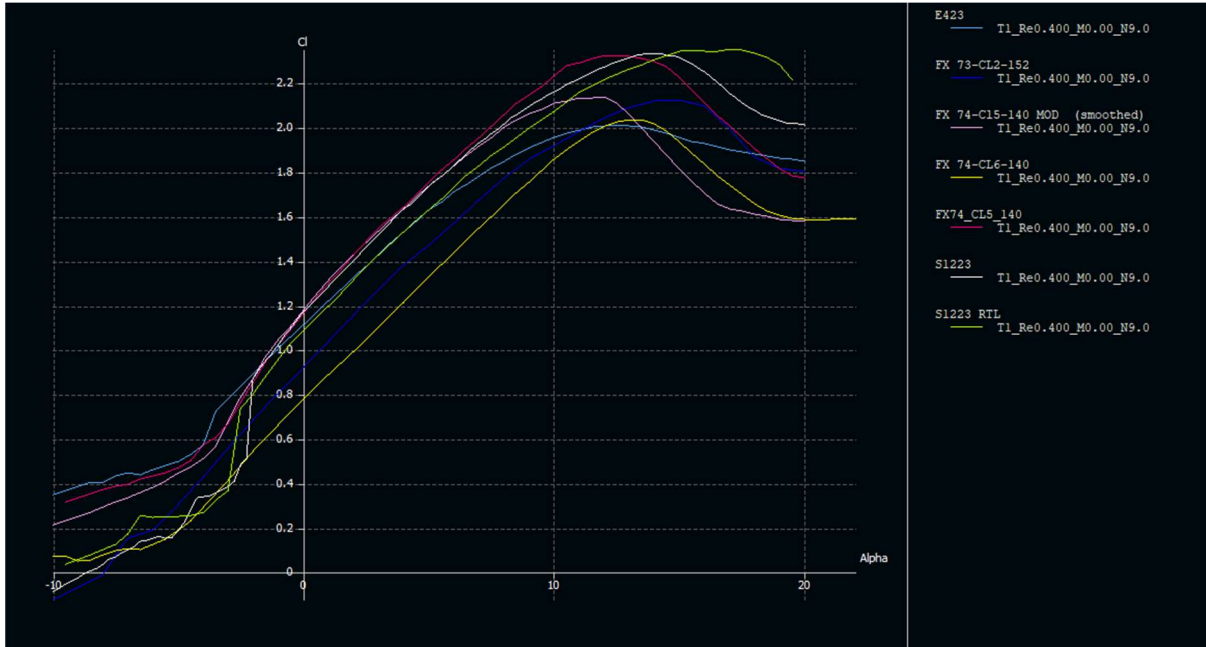


Fonte: Silva (2021)

A Figura 4 mostra o coeficiente de sustentação ( $C_l$ ) em função do Ângulo de Ataque ( $\alpha$ ). Esse gráfico é importante para identificar o ângulo de stall do perfil, quanto mais abrupta for a descida do ponto máximo de sustentação para o ponto mínimo, mais a asa irá perder a sustentação e conseqüentemente aumentar o

1 arrasto. Em aeronaves este gráfico é utilizado para validar o ponto em que a asa  
 2 perderá a sustentação e, a depender do tipo de curva após o ponto máximo de  
 3 sustentação, será mais complexo controlar a queda da aeronave antes que a mesma  
 4 atinja o solo.

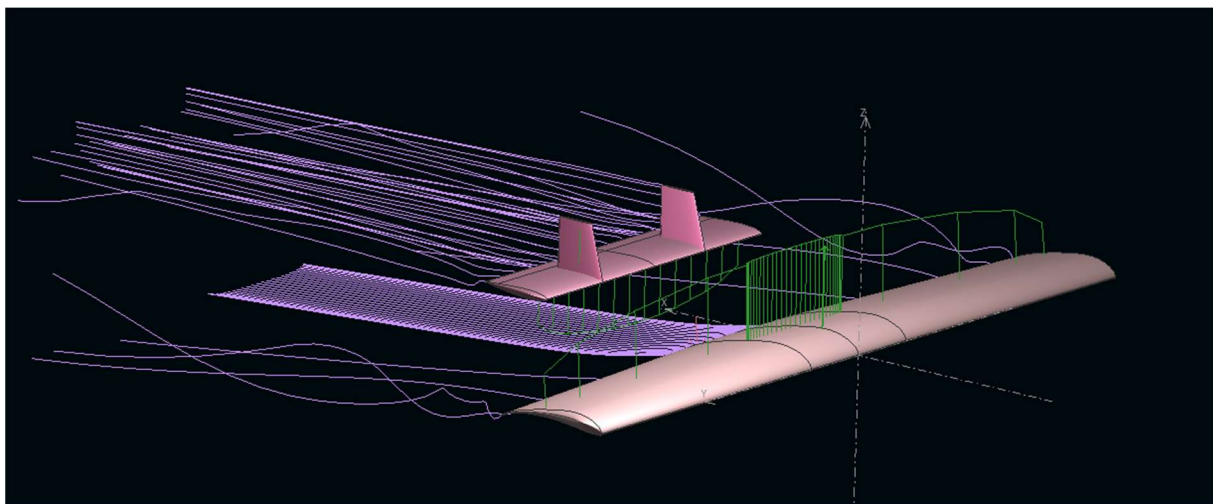
5 Figura 4 – Relação  $C_l$  x  $\alpha$  dos perfis



6  
 7 Fonte: Silva (2021)

8 A Figura 5 apresenta uma asa e empennagem com o perfil aerodinâmico já  
 9 escolhido, sob efeito das forças de sustentação e simulando o escoamento do ar.

10 Figura 5 – Visualização da asa retangular (XFLR5)



11  
 12 Fonte: Silva (2021)

### 13 4 METODOLOGIA

14 Nesta seção será abordada a metodologia para seleção do perfil aerodinâmico  
 15 através das análises feitas no software XFLR5

1 **4.1 Perfil aerodinâmico**

2 Diversos perfis aerodinâmicos foram levantados por meio dos sites Airfoil Tools  
 3 e do Aero Database (ADB, 2022; AT, 2022). Para atender o objetivo de máxima  
 4 sustentação negativa alguns critérios foram determinados, como alto  $C_l$  e alta  
 5 eficiência. A Tabela 1 mostra as características dos perfis. Por exemplo, a segunda  
 6 coluna mostra os valores do  $C_l$  máximo de cada perfil, enquanto a última apresenta  
 7 os valores do Reynolds mínimo necessário para a atuação perfil.

8 Os perfis com melhores comportamentos foram selecionados nos sites Airfoil  
 9 Tools e Aero Database e analisados através do software XFLR5.

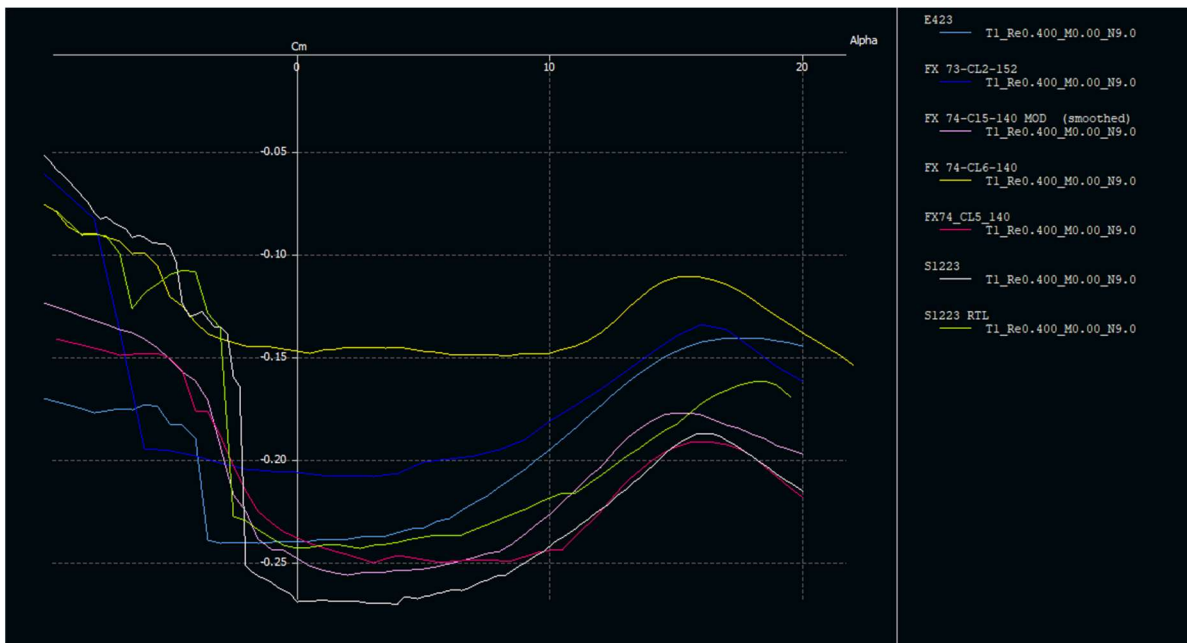
10 Tabela 1 – Análise de perfis aerodinâmicos

Perfil	$C_{l_{max}}$	$(C_l/C_d)_{max}$	Ângulo de Stall	$C_{l_{\alpha=0}}$	$C_{d_{\alpha=0}}$
FX74-CL6-140	2,045	101,346	13,1°	0,782	0,014
FX74-CL5-140	2,3	91,95	11,5°	1,162	0,02
FX74-CL5-140 MOD	2,172	108,434	11,8°	1,176	0,018
FX73-CL2-152	2,13	94,832	14,08°	0,921	0,013
S1223 RTL	2,391	78,739	16,77°	1,091	0,016
S1223	2,337	92,533	14°	1,176	0,015
E423	2,016	112,262	12,5°	1,116	0,013

11  
 12 Fonte: Silva (2021)

13 As figuras abaixo mostram os perfis simulados. A Figura 6 mostra o Coeficiente  
 14 de Momento ( $C_m$ ) em função do  $\alpha$ , o qual obteve maior pontuação o perfil que  
 15 apresentou uma curva com os maiores valores de momento e com a menor variação  
 16 do ângulo de incidência, logo um menor e mais uniforme momento. Sendo assim, o  
 17 perfil com o melhor resultado neste gráfico é o Selig 1223. É importante ressaltar  
 18 que não é considerada a parte em que os valores do ângulo de incidência estão  
 19 negativos, pois a asa não atuará nesta condição.

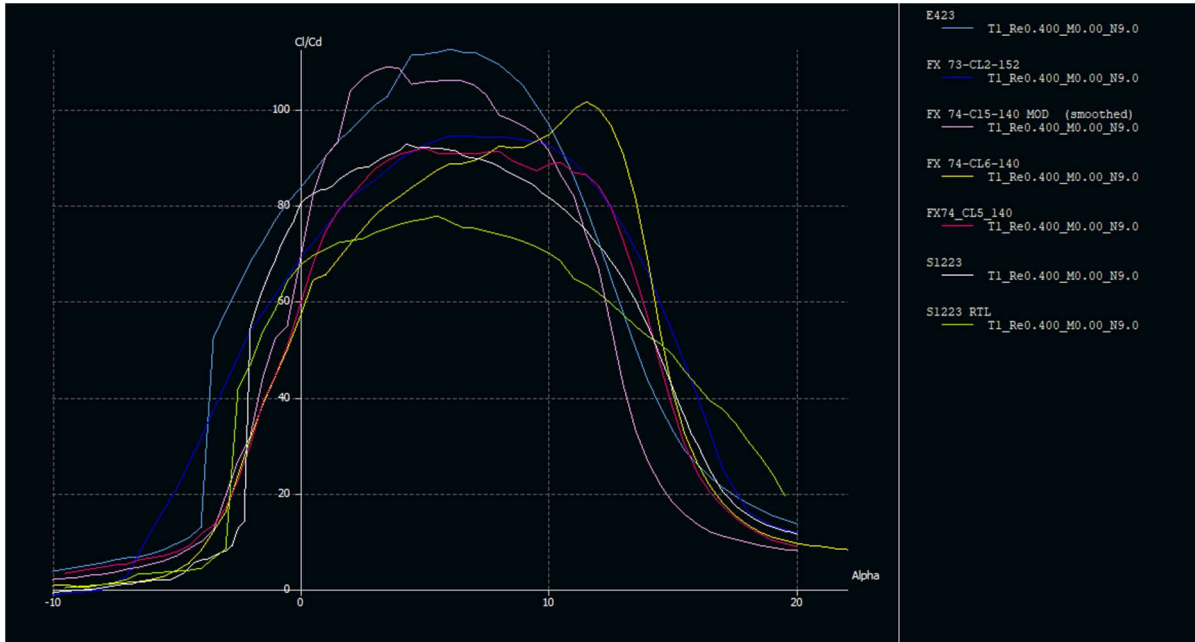
20 Figura 6 – Relação  $C_m$  x  $\alpha$  dos perfis (XFLR5)



21  
 22 Fonte: Silva (2021)

1 A Figura 7 mostra no eixo vertical a relação  $C_l/C_d$  e no eixo horizontal o  $\alpha$ . O  
 2 perfil mais eficiente é aquele que possui um maior valor na relação  $C_l/C_d$ , utilizando  
 3 o  $\alpha$  para determinar a faixa de  $\alpha$  em que o perfil é mais eficiente. O perfil Selig 1223,  
 4 por mais que não tenha apresentado altos valores de  $C_l/C_d$ , ele abrange toda a faixa  
 5 de  $\alpha$  necessária para o projeto, ao contrário dos demais.

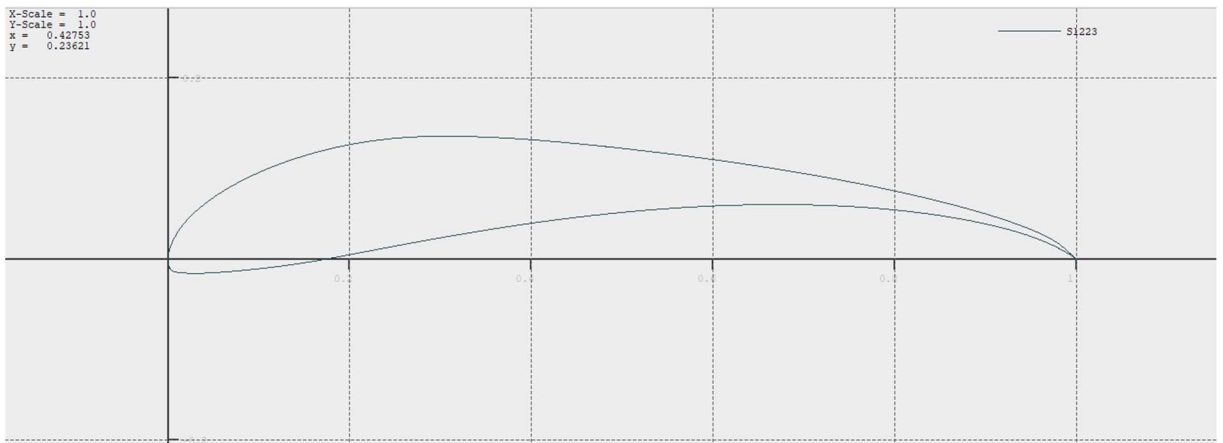
6 Figura 7 – Relação  $C_l/C_d$  x  $\alpha$  dos perfis (XFLR5)



7 Fonte: Silva (2021)

8  
 9 Para desenvolver a asa foi utilizado o software XFLR5, que permite o estudo do  
 10 comportamento aerodinâmico de perfis e asas. Será utilizado o perfil Selig 1223,  
 11 pois o mesmo apresenta alto coeficiente de sustentação e atua a partir de 50 m/s,  
 12 velocidade adotada para o funcionamento do projeto. Na Figura 8 é possível  
 13 observar o desenho do perfil Selig 1223.

14 Figura 8 – Perfil S1223



15 Fonte: AT (2022)

16  
 17 A envergadura da asa foi escolhida através da amostra dos veículos mais  
 18 utilizados, permitindo assim o seu uso em diversos carros, sem necessidade de  
 19 alteração do projeto.



1 Tabela 2 – Largura dos carros mais utilizados para Track Day no Brasil

Modelo	Largura
Honda Civic SI 8ª geração	1.752 mm
Honda Civic 6ª geração	1.705 mm
Honda Civic 7ª geração	1.715 mm
Renault Sandero RS	1.733 mm
BMW E36	1.796 mm
BMW E46	1.817 mm
Ford Escort	1.700 mm
Chevrolet Chevette	1.570 mm
Volkswagen Gol	1.621 mm
Chevrolet Corsa	1.646 mm
Ford Ká	1.695 mm
Renault Clio	1.640 mm
Suzuki Swift	1.695 mm
Chevrolet Kadett	1.663 mm
Chevrolet Opala	1.770 mm
Ford Fiesta	1.905 mm
Citroen DS3	1.715 mm
Volkswagen Golf	1.799 mm

2 Fonte: CW (2022)

3 Através das amostras vistas na Tabela 2, foi escolhida uma envergadura que  
4 se encaixa nas larguras dos veículos. Com isso foi definida uma envergadura de  
5 1.800 mm.

6 Com o perfil e envergadura da asa definidos, inicia-se o processo de  
7 desenvolvimento da asa utilizando o XFLR5 para realizar testes.

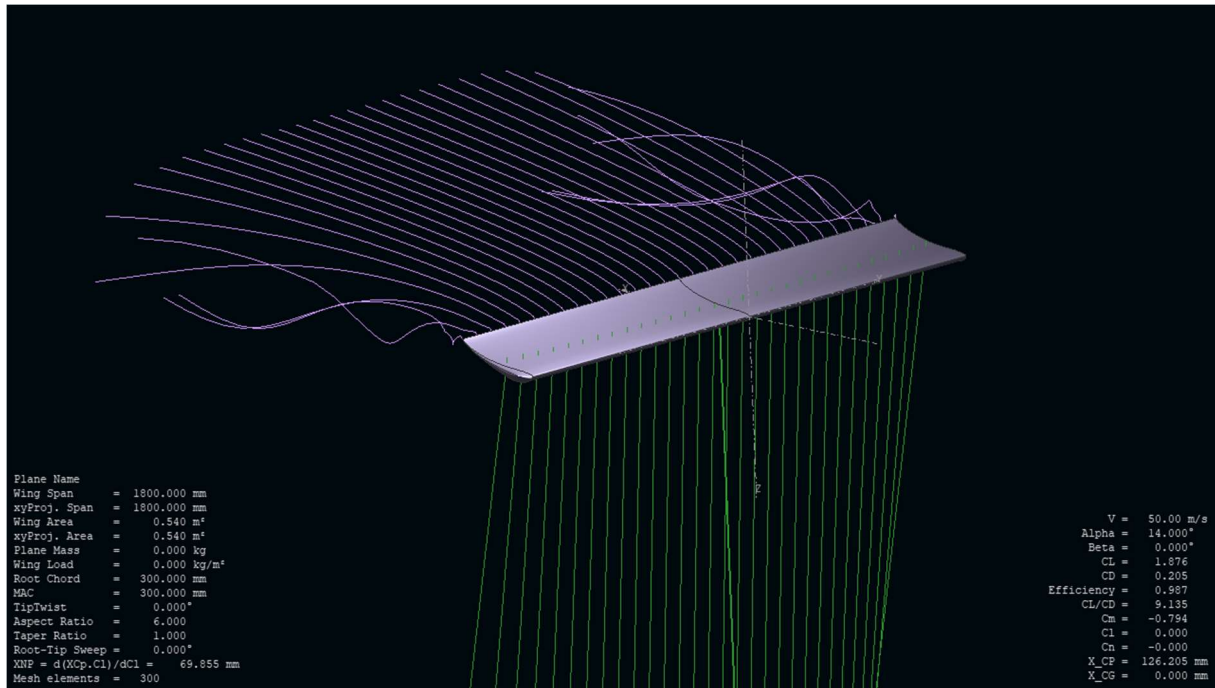
## 8 4.2 Escolha da asa

9 Devido a facilidade de construção de uma aplicação mais abrangente do  
10 componente projetado, a asa escolhida para a utilização no projeto foi a Retangular.  
11 Esse tipo de asa também proporciona uma maior área em relação a sua  
12 envergadura, dessa forma possibilitando uma maior capacidade de gerar  
13 sustentação inclusive em baixas velocidades. Na Figura 9 é vista a construção da  
14 asa no software XFLR5 com o perfil Selig 1223. É importante ressaltar que:

15 A função primária da asa é gerar força de sustentação ou simplesmente

sustentação. No entanto a asa tem duas outras produções, nomeadamente a força de arrasto e o momento (SADRAEY, 2013).

Figura 9 – Asa (XFLR5)



Fonte: Autoria própria

A partir da construção da asa, Figura 9, é possível observar nas Tabelas 3 e 4 as características físicas e aerodinâmicas da asa formada pelo perfil Selig 1223. Na Tabela 4 os dados obtidos levam em consideração a velocidade definida para o projeto, 50 m/s e o  $\alpha$  igual a 14°, pois é sobre essas condições que a asa atua.

Tabela 3 – Características Físicas da Asa

Características Físicas	Valores	Unidades
Envergadura:	1800	mm
Área da asa:	0,54	m <sup>2</sup>
Corda:	300	mm

Fonte: Autoria própria

Tabela 4 – Características Aerodinâmicas da Asa

Características Aerodinâmicas:	
Para velocidade de 50 m/s e $\alpha = 14^\circ$ :	Valores
Cl:	1,876
Cd:	0,205
Cl/Cd:	9,135
Cm:	-0,794

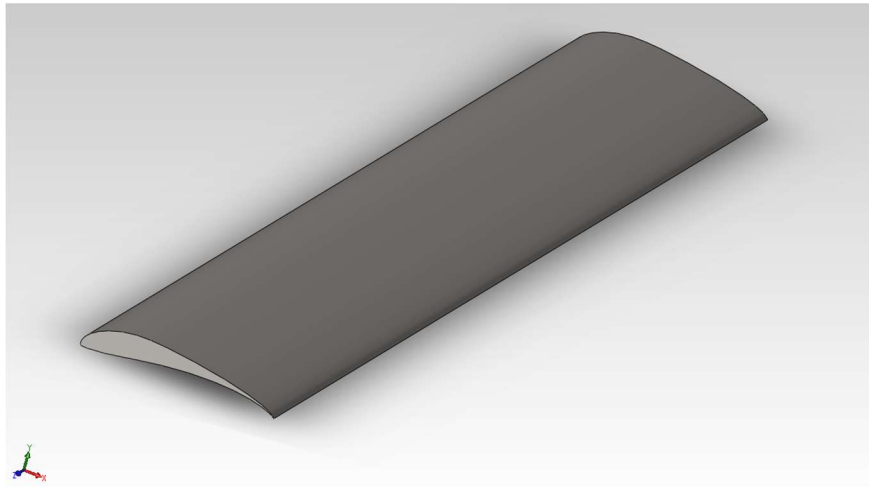
Fonte: Autoria própria

### 4.3 Modelagem 3D

Após a definição da asa através do XFLR5, a modelagem desse componente

1 em um software 3D pode ser feita, como pode ser visto na Figura 10.

2 Figura 10 – Asa modelada em 3D



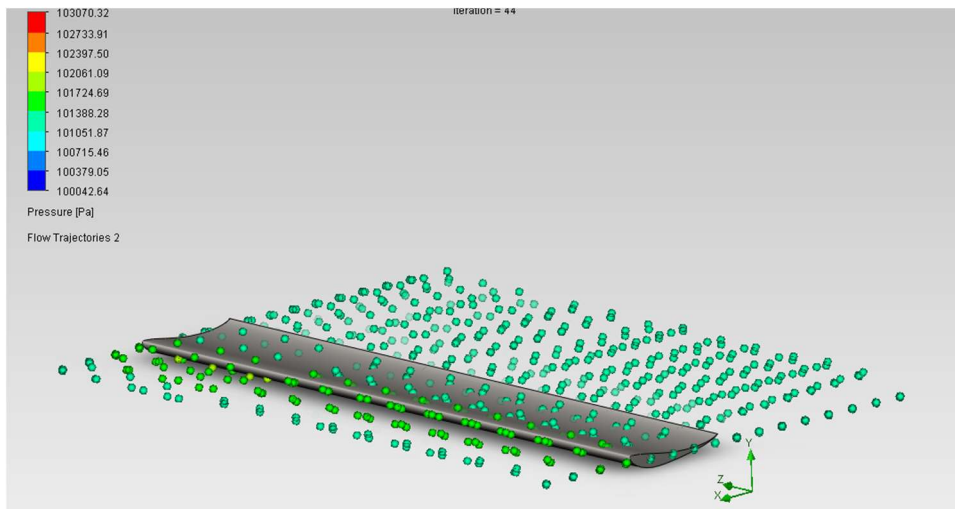
3  
4 Fonte: Autoria própria

5 A partir da modelagem da asa, é feita a análise CFD. De acordo com Duarte  
6 (2015), este tipo de análise tem a capacidade de prever o comportamento dos  
7 fluidos em relação ao componente estudado através de técnicas numéricas iterativas  
8 para resolver um conjunto de equações diferenciais não lineares para aproximar-se  
9 do resultado de um escoamento real, e dessa forma, possibilita encontrar as forças  
10 resultantes de escoamento.

11 A análise CFD da asa a uma velocidade de 50 m/s em condições normais de  
12 temperatura e pressão apresenta os resultados vistos nas Figuras a seguir.

13 Na Figura 11 é visto o resultado para a asa em 0° durante o acionamento do  
14 sistema de redução de arrasto, onde o objetivo é reduzir ao máximo o arrasto para  
15 garantir uma melhor aceleração mesmo sacrificando a força de sustentação  
16 negativa. Nessa situação a asa criada apresenta uma força de arrasto de 129,408 N  
17 (13,195 kgf) e uma força de sustentação negativa de 5,723 N (0,583 kgf)

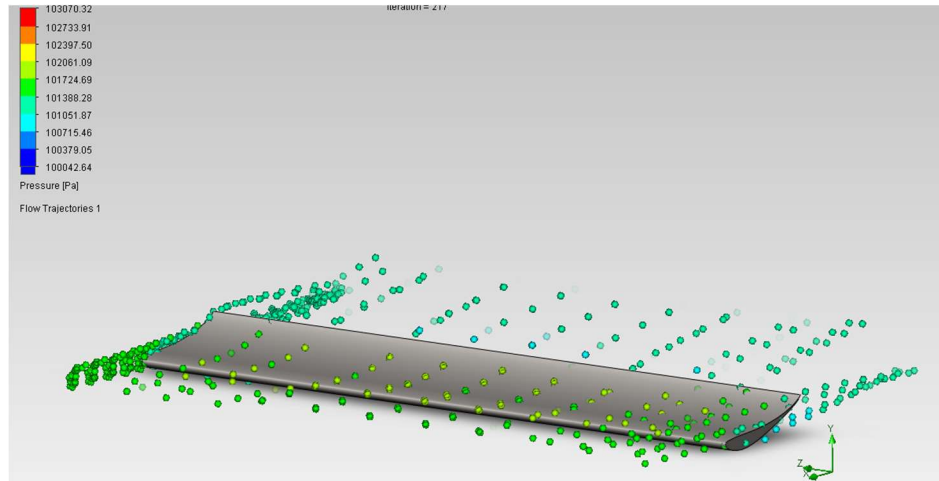
18 Figura 11 – Análise CFD da asa a 0°



19  
20 Fonte: Autoria própria

1 Enquanto na Figura 12 é visto o resultado para a posição de  $14^\circ$ , em que asa é  
 2 utilizada durante a maior parte de uma corrida em circuito, pois essa posição garante  
 3 a maior eficiência para a relação de sustentação e arrasto. De acordo com a  
 4 simulação CFD, nessa posição, a asa gera 224,881 N (22,931 kgf) de arrasto e  
 5 545,455 N (55,620 kgf) de sustentação negativa.

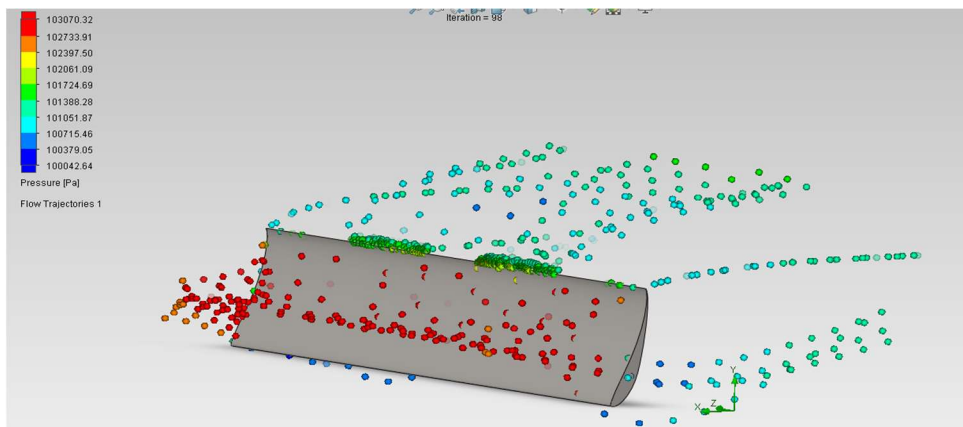
6 Figura 12 – Análise CFD da asa a  $14^\circ$



7  
 8 Fonte: Autoria própria

9 Por fim, na Figura 13 é visto o resultado para quando a asa está em  $75^\circ$ , ela é  
 10 utilizada como freio aerodinâmico, por isso nessa situação procura-se gerar a maior  
 11 força de arrasto possível. A força de sustentação negativa nessa situação também é  
 12 importante pois garante maior tração entre os pneus e a pista, dessa forma  
 13 auxiliando o funcionamento do freio mecânico. Nessa posição a asa gera 2119 N  
 14 (216,077 kgf) de força de arrasto e 680,377 N (69,379 kgf) de força de sustentação  
 15 negativa.

16 Figura 13 – Análise CFD da asa a  $75^\circ$



17  
 18 Fonte: Autoria própria

## 19 4.4 Projeto eletrônico

### 20 4.4.1 Escolha do atuador

21 O servo motor escolhido para servir como atuador foi o Ds5160, como visto na

1 Figura 14, do modelo DS, pois, ao utilizar engrenagens, o torque requerido de  
 2 216,077 kgf será alcançado. Outro motivo pelo qual foi feita a escolha do servo  
 3 motor modelo Ds5160 é o fato dele ser a prova d'água. Tendo em mente que o  
 4 sistema estará exposto a ações externas como chuva ou poças de água que  
 5 venham a ter na estrada, torna-se importante garantir que os controles do  
 6 movimento da asa estarão protegidos.

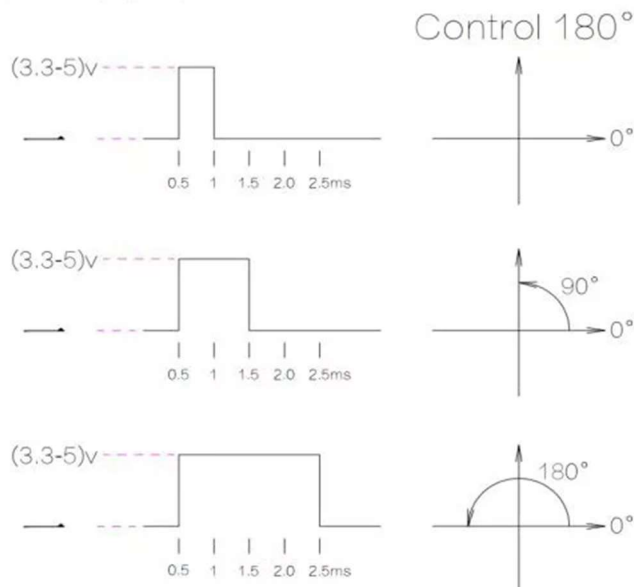
7 Figura 14 – Servo motor Ds5160



8  
 9 Fonte: DGIR (2022)

10 Na Figura 15 pode-se observar o sistema de funcionamento do servo motor no  
 11 PWM (Pulse-Width Modulation). De acordo com a tensão que o servo recebe, o  
 12 ângulo de controle dele varia.

13 Figura 15 – Ângulo do servo motor



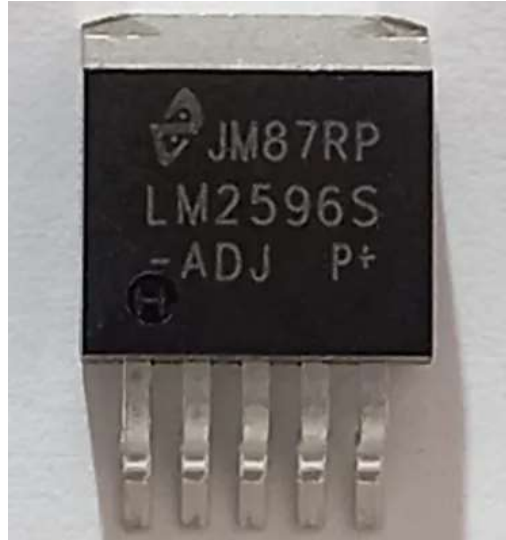
14  
 15 Fonte: Alibaba (2022)

16 4.4.2 Regulador de Tensão

17 A maior parte das baterias de carro existentes são capazes de fornecer até 12

1 V de tensão. Entretanto, o sistema projetado terá um consumo máximo de 7,4 V pois  
2 é a faixa de atuação do atuador capaz de carregar 65 Kg.cm. Sendo assim, para  
3 regulação de tensão optou-se pelo uso do regulador de tensão LM2596, como  
4 mostrado na Figura 16.

5 Figura 16 – Regulador de tensão LM2596

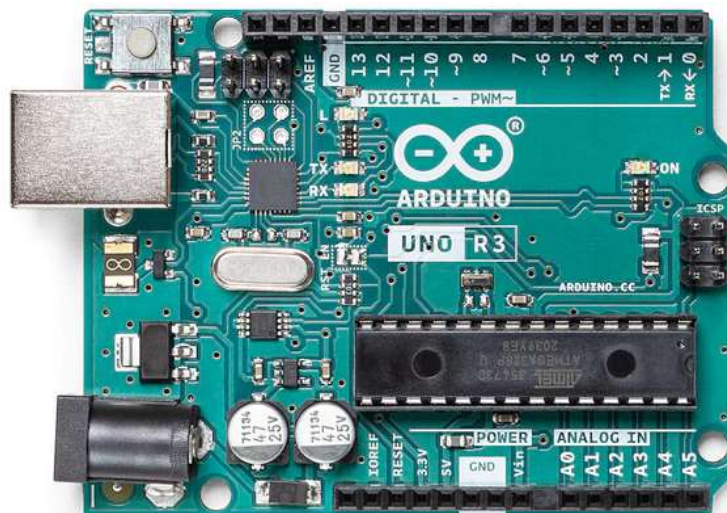


6  
7 Fonte: ALLDATASHEET (2022)

#### 8 4.4.3 Microcontrolador

9 O microcontrolador escolhido para o projeto foi o Atmega328 acoplado ao  
10 Arduino UNO e programado no Arduino IDE, como mostrado na Figura 17, por  
11 possuir entradas e saídas tanto digitais quanto analógicas. Além disso, este  
12 dispositivo fornece portas PWM, necessárias para o controle do servo.

13 Figura 17 – Arduino UNO



14  
15 Fonte: Arduino (2021)

### 16 4.5 Sistema de controle

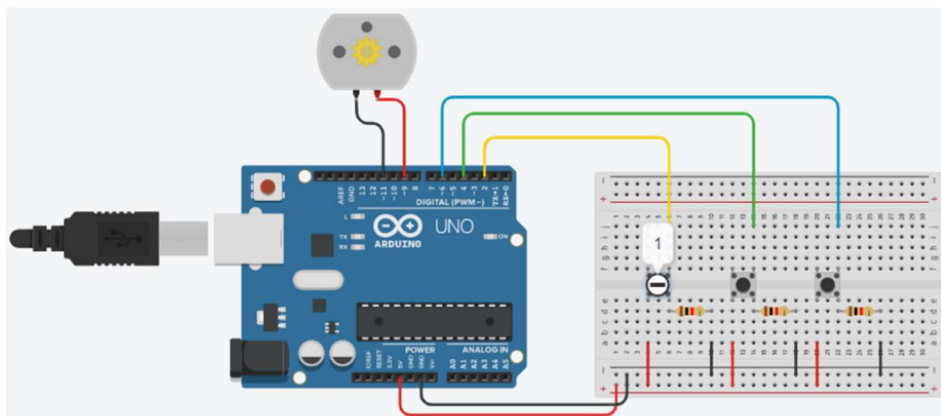
17 Os pilotos fazem parte do sistema de controle e são responsáveis por definir as

1 posições da asa. Tendo em vista a facilidade e a praticidade do controle, foi feito um  
 2 sistema que utiliza de uma chave para variar entre as três posições (DRS, a asa com  
 3  $14^\circ$  de  $\alpha$  e freio aerodinâmico).

4 Nas Figuras 18, 19 e 20 pode ser visto um circuito representativo do sistema de  
 5 controle da asa em todas as posições.

6 O Arduino, através de um código de programação, é responsável por distribuir  
 7 a tensão e converter os dados do sistema para o servo. Para o controle do sistema,  
 8 a tensão irá passar por resistores que definem em qual posição a asa se encontra.  
 9 Na Figura 18, a posição inicial da asa será o sistema DRS ativo, pois ao ativar o  
 10 botão 1 a corrente flui para a porta 2 do Arduino que, para a porta 9, é interpretado  
 11 como entrada, mantendo o servo na mesma posição, enquanto os demais botões se  
 12 mantêm inativos.

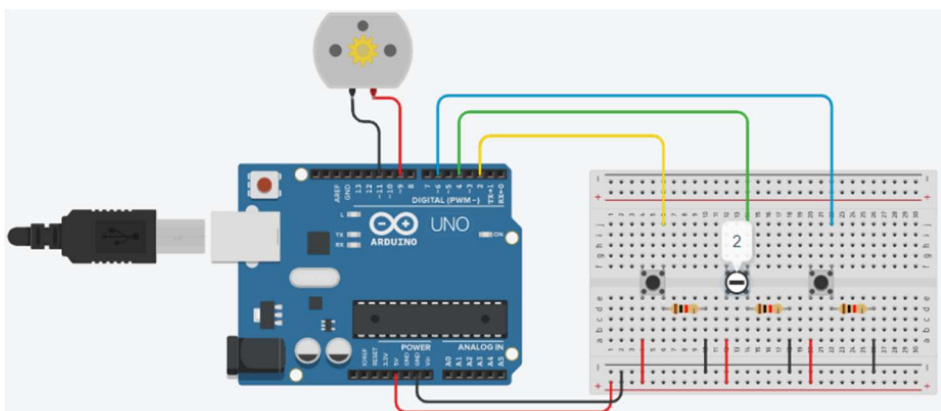
13 Figura 18 – Sistema de Controle: DRS



14  
 15 Fonte: Autoria própria

16 Já na Figura 19, o botão 2 é acionado que faz permitir que a corrente flua para  
 17 a porta 4, porta essa que servirá de entrada para a porta 9, fazendo com que a  
 18 posição do  $\alpha$  da asa movimente para os  $14^\circ$ , que irá proporcionar uma estabilidade  
 19 em curva e fornecerá os 216,077 kgf necessários.

20 Figura 19 – Sistema de Controle:  $\alpha = 14^\circ$

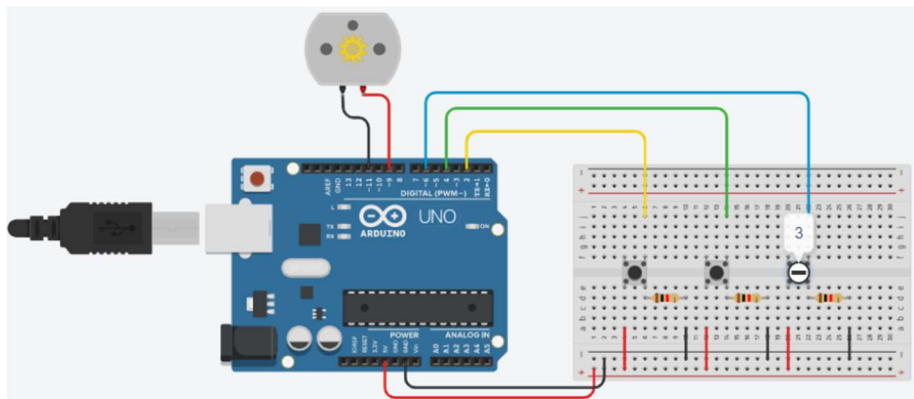


21  
 22 Fonte: Autoria própria

23 Por fim, a Figura 20, o botão 3 ao ser acionado envia para a porta 9 um sinal  
 24 que será interpretado pelo servo para mover-se em  $75^\circ$  que irá gerar um aumento  
 25 drástico do arrasto no veículo, sendo este o freio aerodinâmico.

1

Figura 20 – Sistema de Controle:  $\alpha = 75^\circ$



2

3

Fonte: Autoria própria

#### 4.6 Prototipagem

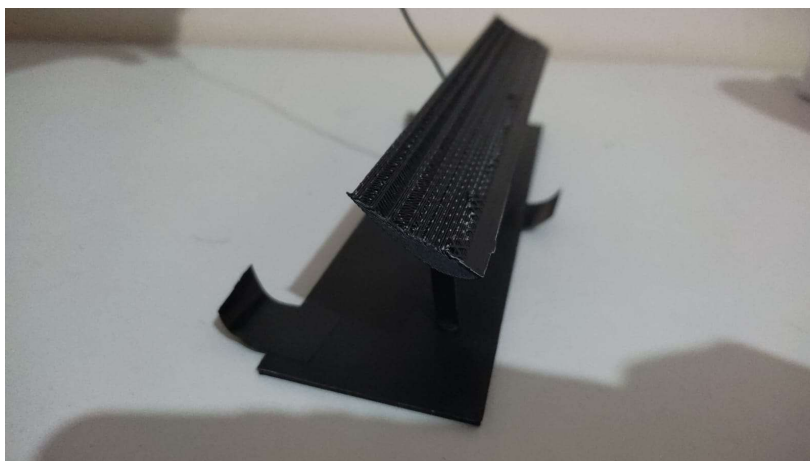
5 Para um melhor entendimento do projeto abordado foi desenvolvido um  
6 protótipo que demonstra o controle e o comportamento da asa ao receber um  
7 comando. A construção está dividida em duas etapas, mecânica e eletrônica, sendo  
8 a primeira para modelagem da asa e em seguida o circuito que irá movê-la.

9 Com o avanço das tecnologias atuais pode-se pensar em diversas formas de  
10 construção, desde a corte do perfil em MDF, para simplesmente cobri-lo com tecido  
11 monokote, à impressão em 3D. Sendo assim, pela praticidade e a leveza do  
12 material, optou-se por escolher a impressão 3D.

13 Devido às proporções do projeto, a asa manteve suas características mas em  
14 uma escala reduzida. Com a asa modelada no software 3D, deu-se o início da  
15 impressão da asa e de seu suporte para anexá-la ao sistema elétrico.

16

Figura 21 – Asa impressa em 3D



17

18

Fonte: Autoria própria

19 O processo de impressão 3D de uma peça como visto na Figura 21, consiste  
20 na extrusão de diversas camadas de material até que a peça desejada seja formada.  
21 Durante a impressão é necessário definir o material utilizado, velocidade de  
22 impressão, altura das camadas, espessura da parede e preenchimento da peça.  
23 Essas configurações afetam o resultado final da peça e definem a características  
24 como resistência mecânica, resistência à temperatura, tensão de ruptura e peso.



1 Em seguida o servo para o protótipo também foi alterado, pois não é  
2 necessário um torque tão elevado para movimentar esta asa. O servo SG90 9g,  
3 Figura 22, foi o escolhido por necessitar de uma baixa tensão e o torque suficiente  
4 para resistir a carga.

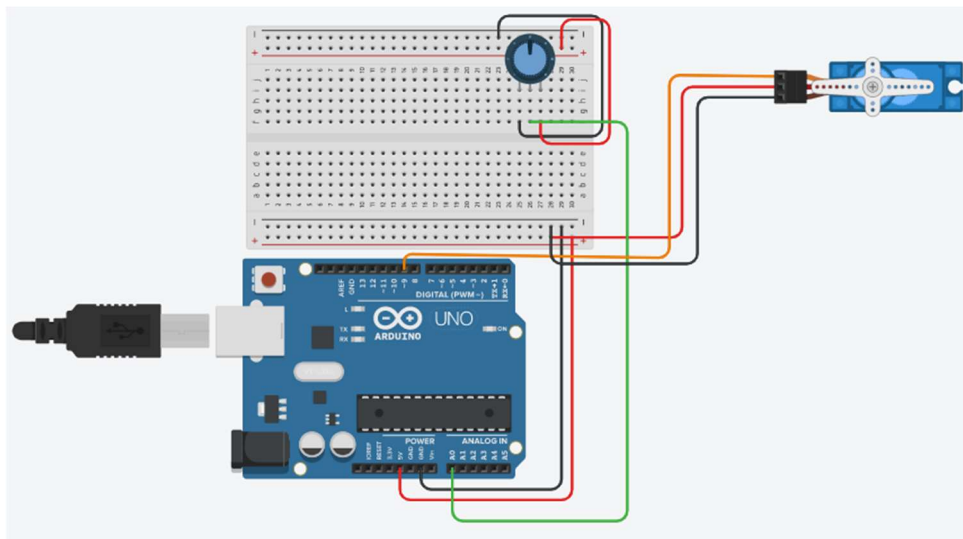
5 Figura 22 – Servo motor SG90



6  
7 Fonte: ALLDATASHEET (2022)

8 A partir da escolha do servo motor, optou-se por utilizar um Arduino UNO  
9 junto com um potenciômetro para controlar os ângulos de ataque da asa. Na Figura  
10 23 pode ser visto o desenho do circuito simulado.

11 Figura 23 – Servo motor SG90



12  
13 Fonte: Autoria própria

14 O Arduino fornece a alimentação ao sistema e o potenciômetro controla a  
15 tensão entregue à porta analógica do mesmo a partir da variação da resistência.  
16 Sendo assim, a haste do servo irá se movimentar em três configurações: 0°, 14° e  
17 75°. Quando a resistência for menor que 1,2 kΩ (ou a tensão maior que 4,3 V) a  
18 haste não se move, pois representa o sistema DRS. Já entre 1,2 kΩ e 5,5 kΩ (ou a  
19 tensão entre 4,3 V e 2,4 V) a haste se move em 14°, isto representa o momento de

1 máxima sustentação negativa. Por fim, quando a resistência for maior que 5,5 K $\Omega$   
 2 (ou a tensão menor que 2,4 V) a haste fica com 75° de angulação, sendo este o freio  
 3 aerodinâmico.

## 4 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5 A partir das análises obtidas pelas simulações CFD é perceptível como as três  
 6 posições da asa geram resultados muito diferentes entre si, e que estão de acordo  
 7 com o que era esperado desse sistema. os diferentes níveis de força de arrasto e  
 8 sustentação negativa apresentados demonstram a viabilidade da aplicação do  
 9 mecanismo em estudo.

10 As forças resultantes geradas pela asa nas três diferentes posições podem ser  
 11 vistas na Tabela 5.

12 Tabela 5 – Forças resultantes na asa

Ângulo de ataque	Força de arrasto	Força de sustentação negativa
0°	129,408 N	5,723 N
14°	224,881 N	545,455 N
75°	2119 N	680,377 N

13 Fonte: Autoria própria

14 No projeto estudado, 14° é o  $\alpha$  padrão da asa, portanto é muito importante que  
 15 nesse ponto a asa tenha uma boa eficiência em relação a força de arrasto e de  
 16 sustentação negativa. A asa estudada gera um arrasto equivalente a 41,23% da  
 17 força de sustentação negativa produzida.

18 Levando em consideração a asa com  $\alpha$  igual a 14° como sendo a referência  
 19 para a análise, quando ativado o DRS, o conjunto apresentado reduz a força de  
 20 arrasto para 57,54% do valor inicial. Também é notável que o sistema de freio  
 21 aerodinâmico gera uma força de arrasto de quase 10 vezes o valor inicial,  
 22 contribuindo abundantemente para a frenagem do carro, além de gerar uma força de  
 23 sustentação negativa quase 25% maior que a força de referência, garantindo maior  
 24 aderência entre os pneus e a pista durante a frenagem.

25 Os valores alcançados são bastante significativos, principalmente levando em  
 26 consideração a simplicidade da asa estudada e sendo esse o único componente  
 27 aerodinâmico aplicado. Apesar dos valores parecerem baixos para algumas  
 28 situações, eles podem influenciar bastante para a melhoria da performance pois no  
 29 automobilismo a redução de até milésimos de segundo do tempo das voltas é muito  
 30 importante.

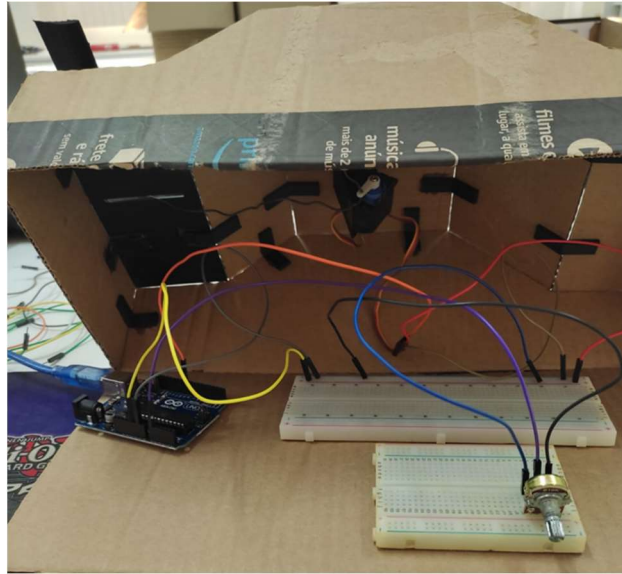
31 Além disso, foi possível verificar o funcionamento de todo o mecanismo de  
 32 ajuste do ângulo de ataque através da montagem e teste do protótipo. Como visto na  
 33 Figura 24 que demonstra o circuito elétrico e Figura 25 que apresenta o protótipo  
 34 concluído.

35

36

1

Figura 24 – Circuito elétrico do protótipo



2

3

Fonte: Autoria própria

4

Figura 25 – Protótipo concluído



5

6

Fonte: Autoria própria

## 7 6 CONCLUSÕES

8 O presente trabalho descreve a aplicação de um sistema de aerodinâmica  
9 ativa em um automóvel capaz de proporcionar sustentação negativa para aumentar  
10 a estabilidade, ser eficiente em momentos de aceleração e aumentar a frenagem  
11 com o freio aerodinâmico. Através das simulações foram encontrados os ângulos  
12 ideais para o projeto, onde o Ângulo de Ataque para o ponto ótimo foi definido com  
13  $14^\circ$  e resultando em uma força de arrasto de 224,881 N e força de sustentação  
14 negativa de 545,455 N. Para o sistema DRS o ângulo aplicado foi de  $0^\circ$ ,  
15 apresentando uma força de arrasto de 129,408 N e uma força de sustentação  
16 negativa de 545,455 N. Já para o freio aerodinâmico o ângulo encontrado foi de  $75^\circ$ ,  
17 gerando uma força de arrasto de 2119 N e uma força de sustentação negativa de  
18 680,377 N.

1 Ao decorrer do projeto foi visto a importância da construção do protótipo para a  
 2 aplicação do sistema elétrico e modelagem da asa em impressão 3D, pois  
 3 problemas como perdas de tensão e espessura das peças impressas foram  
 4 constatados antes de uma aplicação em tamanho real. Portanto ressalta-se mais  
 5 uma vez a necessidade de um protótipo para que situações não planejadas possam  
 6 acontecer e medidas de segurança sejam impostas ao sistema. Portanto, este  
 7 projeto dispõe de uma praticidade em sua construção para a simplificação da  
 8 manutenção, seja ela preventiva ou corretiva, além de um sistema de controle  
 9 intuitivo e leve.

10 Para trabalhos futuros, é analisada a possibilidade de construção de um  
 11 modelo funcional em escala real para que possam ser feitos testes práticos. Além da  
 12 análise do comportamento dos componentes em um túnel de vento, para que se  
 13 possa visualizar o escoamento dos fluidos. Por fim, foi constatado que para uma  
 14 eventual construção do modelo em tamanho real, é necessário um dimensionamento  
 15 da estrutura de fixação da asa que conecta ela aos atuadores e se mantém fixa ao  
 16 veículo. Uma caixa de redução pode ser uma das formas de aplicar o controle da  
 17 asa para aumentar o torque caso necessário.

## 18 REFERÊNCIAS

- 19
- 20 ADB AERO DATABASE. **Pesquisa de informações sobre perfis aerodinâmicos.**  
 21 Disponível em: <<https://aerodatabase.com.br/>>. Acesso em 6 de março de 2022.  
 22
- 23 ARDUINO. **Pesquisa de informações sobre Arduinos.** Disponível em: <[https://store-](https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3?selectedStore=us)  
 24 [usa.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3?selectedStore=us](https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3?selectedStore=us)>. Acesso em 23 de  
 25 maio de 2022.  
 26
- 27 AT AIRFOIL TOOLS. **Pesquisa de informações sobre perfis aerodinâmicos.** Disponível  
 28 em:<<http://airfoiltools.com/>>.Acesso em: 6 de março de 2022.  
 29
- 30 ALLDATASHEET. **Pesquisa de informações sobre servomotores.** Disponível em:  
 31 <<https://www.alldatasheet.com/>>. Acesso em 13 de março de 2022.  
 32
- 33 CW CARROS NA WEB. **Pesquisa de informações sobre dimensões dos carros.**  
 34 Disponível em:<<https://www.carrosnaweb.com.br/>>. Acesso em 15 de março de  
 35 2022.  
 36
- 37 DGIR DGIRACING. **Pesquisa de informações sobre servomotores.** Disponível em:  
 38 <<https://dgiracing.com/>>. Acesso em 13 de março de 2022.  
 39
- 40 DUARTE, Flávio Luçardo. **Análise Das Forças Aerodinâmicas Sobre Um Veículo De**  
 41 **Competição Empregando CFD.** Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, 2015.  
 42
- 43 KATZ, J. **Race car Aerodynamics: Designing for Speed.** 1ed. Cambridge: Bentley  
 44 Publishers, 1995.  
 45
- 46 OLIVEIRA, Igor C. S. de. **Estudo Aerodinâmico De Asa Em Efeito Solo Gerando**  
 47 **Downforce Utilizando Ferramentas De Dinâmica De Fluidos Computacional.**  
 48 Universidade de Brasília,2017.  
 49

1 ROSKAM, JAN. **Airplane Aerodynamics and Performance**. Roskam Aviation and  
2 Engineering Corporation, Kansas, Lawrence. 1997.  
3  
4 SADREY, Mohammad H. **Aircraft Design, A Systems Engineering Approach**. John  
5 Wiley & Sons, Ltd. USA, New Hampshire. 2013  
6  
7 SILVA, Igor L. *et al.* **Aerodinâmica Caboto Aerodesign**. Universidade Tiradentes, 2021.  
8  
9 VILANOVA, JAN. **Mecânica dos Fluidos**. Colégio Técnico Industrial de Santa Maria,  
10 2011.  
11  
12 XFLR5. **Pesquisa de informações sobre o uso do software**. Disponível em:  
13 <<http://www.xflr5.tech/xflr5.htm>>. Acesso em 4 de março de 2022.  
14

## 15 APÊNDICE.

16 Figura 26 – Qr-code para anexo do artigo



17  
18 Fonte: Autoria própria

19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35

Este documento possui 5.187 palavras.