

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Sistema ativo de redução de arrasto aerodinâmico por  
atuador aplicado a um protótipo de Fórmula SAE

**Danilo Barbosa Porto**

São Carlos

2016



**Danilo Barbosa Porto**

**Sistema ativo de redução de arrasto aerodinâmico por atuador aplicado a um protótipo de Fórmula SAE**

Trabalho de Conclusão de Curso do aluno Danilo Barbosa Porto, do curso de Engenharia de Computação da Escola de Engenharia de São Carlos e do Instituto de Ciências Matemáticas e Computação, Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Maximilian Luppe

São Carlos  
2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

B183s Barbosa Porto, Danilo  
Sistema ativo de redução de arrasto aerodinâmico  
por atuador aplicado a um protótipo de Fórmula SAE /  
Danilo Barbosa Porto; orientador Maximilian Luppe. São  
Carlos, 2016.

Monografia (Graduação em Engenharia de Computação)  
-- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade  
de São Paulo, 2016.

1. Microcontrolador. 2. Fórmula SAE. 3.  
aerodinâmica. 4. arrasto. 5. redução. I. Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

**Nome:** Danilo Barbosa Porto

**Título:** “Sistema ativo de redução de arrasto aerodinâmico por atuador aplicado a um protótipo de Fórmula SAE”

**Trabalho de Conclusão de Curso defendido em** 29/11/2016.

**Comissão Julgadora:**

Prof. Dr. Maximilian Luppe  
(Orientador) - SEL/EESC/USP

Profª. Dra. Máira Martins da Silva  
SEM/EESC/USP

Prof. Assistente Edson Gesualdo  
SEL/EESC/USP

**Resultado:**

Aprovado

APROVADO

Aprovado

**Coordenador do Curso Interunidades Engenharia de Computação pela EESC:**

*Prof. Dr. Maximilian Luppe*



Àqueles que lutam para fazer do mundo um lugar melhor através de suas ações com o próximo.



# Agradecimentos

Agradeço à Universidade de São Paulo, os professores e funcionários de todos departamentos e institutos por contribuírem para o meu desenvolvimento no mundo acadêmico.

Agradeço ao meu orientador Maximilian Luppe pela orientação e guia no projeto.

Agradeço aos meus pais, irmãs e família por terem me dado o suporte desde sempre em seguir meus sonhos e me tornar o meu melhor.

Agradeço ao meu amigo Gustavo Setti por ter disponibilizado uma ajuda impagável neste projeto, contribuindo para meu entendimento de todos aspectos mecânicos.

Agradeço ao meu amigo Denys Zandonadi por ter disponibilizado todos os materiais de impressão 3D e a impressora, possibilitando a manufatura rápida de diversos componentes deste projeto.

Agradeço aos colegas da Engenharia de Computação da O11. As nossas noites e madrugadas de estudos e *rush* certamente contribuíram para que eu chegasse até aqui.

Agradeço à Equipe EESC-USP Fórmula SAE e a todos amigos que fiz durante os 6 anos de participação. Essa segunda casa e segunda família possibilitou um crescimento pessoal e profissional que não irei encontrar em outro lugar tão cedo. Obrigado também por todos os momentos que passamos dentro e fora da oficina, sejam eles de alegria ou de tensão.



## Resumo

Barbosa Porto, D. **Sistema ativo de redução de arrasto aerodinâmico por atuador aplicado a um protótipo de Fórmula SAE.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Neste projeto foi implementado um sistema de redução de arrasto para um protótipo de Fórmula SAE. O sistema consiste de um mecanismo, que é responsável pela abertura e fechamento dos aerofólios da asa traseira do veículo, de um motor elétrico, responsável por gerar a força para atuação no mecanismo, de um circuito de ativação do motor, por um circuito que possui um microcontrolador que executa a lógica utilizada para realizar a abertura e fechamento dos aerofólios e um botão de ativação localizado no volante do carro.

**Palavras-chave:** Microcontrolador, Fórmula SAE, aerodinâmica, arrasto, redução.



## Abstract

Barbosa Porto, D. **Actuator active drag reduction system applied to a Formula SAE prototype.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

In this project it was implemented a drag reduction system for a Formula SAE prototype. The system consists of a mechanism, responsible for opening and closing the flaps of the rear wing of the vehicle, an electric motor, responsible for generating the torque to move the mechanism, of a circuit to activate the motor, of a circuit that has a microcontroller that executes the logic in opening and closing the flap and a button to activate the system located in the car's steering wheel.

**Key-word:** Microcontroller, Formula SAE, aerodynamics, drag, reduction.



## Lista de figuras

Imagem 1 - Exemplo de um veículo da Formula 1 com asas .....	2
Imagem 2 - Exemplo de protótipo de Fórmula SAE com aerodinâmica – Equipe Global Formula Racing .....	3
Imagem 3 - CAD do E60, primeiro carro com aerodinâmica.....	6
Imagem 4 - CAD do E13, carro do ano de 2015 .....	6
Imagem 5 - Asa traseira de um veículo de Formula 1 com o DRS ativado.....	7
Imagem 6 - Imagem do resultado de uma simulação CFD para a asa traseira do protótipo E13 .....	9
Imagem 7 - Imagem de uma simulação CFD para a asa dianteira do protótipo E13 .....	10
Imagem 8 - Imagem do desenho em software do assoalho difusor do protótipo E13 .	11
Imagem 9 - Resultado da simulação sem DRS para enduro.....	14
Imagem 10- Resultado da simulação com DRS para enduro .....	14
Imagem 11 - Gráfico comparativo de velocidades para enduro .....	15
Imagem 12 - Resultado da simulação sem DRS para autocross.....	17
Imagem 13 - Resultado da simulação com DRS para autocross .....	18
Imagem 14 - Gráfico comparativo de velocidades para autocross.....	18
Imagem 15 - Simulação CFD para demonstrar o fluxo turbulento da asa dianteira do protótipo E13.....	20
Imagem 16 - Simulações CFD para configuração downforce e configuração menor arrasto.....	21
Imagem 17 - Simulação CFD de carro inteiro demonstrando o fluxo de ar turbulento no protótipo.....	22
Imagem 18 - Simulação CFD para a asa traseira com configuração de downforce .....	23
Imagem 19 - Simulação CFD para a asa traseira com configuração de menor arrasto .	23

Imagem 20 - Mecanismo projetado em CAD .....	25
Imagem 21 - Visualização da asa traseira no perfil de melhor downforce com o mecanismo acoplado.....	26
Imagem 22 - Visualização da asa traseira no perfil de menor arrasto com o mecanismo acoplado .....	26
Imagem 23 - Vista lateral da asa traseira fechada .....	28
Imagem 24 - Forças no aerofólio superior .....	29
Imagem 25 - Forças no aerofólio inferior .....	29
Imagem 26 - Forças no suporte principal .....	30
Imagem 27 - Forças no motor .....	30
Imagem 28 - Gráfico e valores nominais de operação para o motor FPG Bosch.....	33
Imagem 29 - Esquemático do módulo Eixo .....	34
Imagem 30 - Esquemático da Ponte-H projetada .....	35
Imagem 31 - Posicionamento do potenciômetro em CAD.....	36
Imagem 32 - Mecanismo posicionado na asa traseira do protótipo E13.....	38
Imagem 33 - Dashlogger ProTune Electronics.....	39
Imagem 34 - Trecho do log de voltas de enduro com e sem DRS em relação ao espaço .....	41
Imagem 35 - Log completo das três voltas em relação ao tempo .....	42
Imagem 36 - Comparativo de volta de autocross com e sem DRS em relação ao espaço .....	42



## Lista de tabelas

Tabela 1 - Provas e respectivas pontuações na competição de Fórmula SAE Brasil .....	5
Tabela 2 – Pontuação na competição Formula Student Germany 2016 .....	16
Tabela 3 - Valores finais de arrasto para componentes aerodinâmicos do E13 .....	19
Tabela 4 - Valores finais de downforce e arrasto para diferentes perfis de aerodinâmica .....	21
Tabela 5 - Tempos de autocross, colocação e pontuação na competição de 2015 do Formula Student Germany .....	40



## Lista de siglas

CAD: *Computer-aided design*

CFD: *Computational Fluid Dynamics*

DRS: *Drag Reduction System*



# Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Apresentação .....	1
1.2	Motivação e objetivos.....	1
2	EMBASAMENTO TEÓRICO .....	4
2.1	Aerodinâmica e dinâmica veicular.....	4
2.1.1	Asa traseira .....	8
2.1.2	Asa dianteira.....	9
2.1.3	Assoalho difusor .....	10
2.2	Simulações de desempenho .....	11
2.2.1	Parâmetros da simulação .....	12
2.2.2	Resultados da simulação .....	13
3	IMPLEMENTAÇÃO.....	19
3.1	Simulações CFD.....	19
3.2	Desenvolvimento do mecanismo .....	23
3.3	Motor e sistema de controle .....	27
4	TESTES, RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	38
4.1	Considerações e testes iniciais .....	38
4.2	Testes em pista .....	39
5	CONCLUSÕES .....	43
5.1	Trabalhos futuros.....	43
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45



# 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo encontra-se a apresentação do trabalho e as motivações juntamente com os objetivos que levaram a sua realização.

## 1.1 Apresentação

O trabalho consiste no desenvolvimento de um mecanismo que permita a abertura e fechamento dos aerofólios que constituem a asa traseira do protótipo E13 da Equipe EESC-USP Formula SAE. O mecanismo é ativado por um motor elétrico, acoplado ao aerofólio principal, chamado de *mainplane*. Este motor é controlado por uma lógica digital que envia o sinal de controle a um circuito em formato de ponte H para este circuito envie a tensão correta ao motor. Este acionamento acontece por um botão no volante do protótipo, sendo feito no momento que o piloto desejar. O sistema contém algumas rotinas para evitar o acionamento em momentos indevidos, afim de proteger primariamente o piloto e depois o veículo.

Este documento é dividido nas seguintes seções: a introdução, que lista as motivações que inspiraram o projeto e os objetivos deste, seguido de um embasamento teórico para familiarizar o leitor com alguns conceitos mecânicos necessários para a compreensão do trabalho. Posteriormente é relatado como foi feita a escolha dos componentes do projeto e sua como foi feita sua implementação. Após isto, a seção de Testes, Resultados e Discussões detalhará os testes feitos no projeto afim de validar o embasamento teórico, cujos resultados serão analisados e discutidos. Ao final há a sessão de Conclusão na qual irá finalizar as ideias do projeto.

## 1.2 Motivação e objetivos

No automobilismo, os veículos comumente possuem dispositivos aerodinâmicos implementados, os quais têm a função de contribuir para o aumento da *downforce*, uma força vertical, inversa à sustentação, que busca incrementar a aderência dos pneus ao asfalto através de um acréscimo na carga normal, permitindo que o veículo possa realizar as curvas com uma velocidade maior do que o faria sem estes dispositivos.

Em veículos monopostos, tais como os desenvolvidos na Formula 1, categoria na qual a Fórmula SAE se baseia, utiliza-se três peças do conjunto aerodinâmico: asa dianteira, asa traseira e assoalho difusor. Estes componentes são simulados principalmente em *softwares* CFD, sendo assim possível otimizar a *downforce* gerada. Contudo, uma das implicações da utilização destes dispositivos é a criação de diferentes formas de arrasto, forças que atuam em sentido contrário ao movimento do veículo e que resultam em um desperdício de potência do motor somente para vencê-la. Um exemplo destas peças é visto no carro da Imagem 1.



Imagem 1 - Exemplo de um veículo da Formula 1 com asas

Fonte: Busca de imagens do Google

Apesar de toda a otimização possível nos programas, há uma limitação física, que é apresentada através de uma troca, sendo esta uma relação entre *downforce* com arrasto. Os perfis ideais, que conferem maiores valores de *downforce*, ainda assim produzem um valor considerável de arrasto, que se intensifica principalmente em trechos de alta velocidade na pista, visto que estas forças são proporcionais ao quadrado da velocidade do veículo. Sendo assim, foi projetado um DRS que tem por objetivo, quando possível, reduzir o arrasto total do veículo. O sistema atua alterando o ângulo de ataque dos aerofólios, possibilitando que o carro, com a mesma potência entregue pelo motor, atinja uma velocidade maior no final da reta do que um carro que não utiliza o sistema.

Na Fórmula SAE os protótipos também utilizam de dispositivos aerodinâmicos. A categoria, porém, trabalha em condições diferentes da Formula 1: são veículos menores,

menos potentes e que correm em pistas menores e com mais obstáculos. Assim, pela diferença de características, principalmente a velocidade média dos carros, o sistema aerodinâmico é diferente. A aerodinâmica de protótipos de Fórmula SAE necessita ser maior, com uma maior área de atuação, para que seja gerado um valor significativo de *downforce*, como mostra o carro da Imagem 2. Isso implica que os valores de arrasto também serão elevados, e que irão ser impactantes no tempo de volta dos veículos. A utilização de um sistema que possibilite a redução deste arrasto nestes momentos de alta velocidade enquanto mantém a *downforce* para a realização de curvas, assim, torna-se essencial para melhorar o tempo de volta dos carros.



Imagem 2 - Exemplo de protótipo de Fórmula SAE com aerodinâmica – Equipe Global Formula Racing

Fonte: Website da SAE Internacional

## 2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentados os conceitos necessários para entendimento do projeto.

### 2.1 Aerodinâmica e dinâmica veicular

Em competições de automobilismo, um dos principais fatores que determinam a vitória de um veículo é a dinâmica veicular. Esta característica dos carros expressa como estes se comportam dentro das pistas, partindo de uma análise mecânica, com equações para determinar os melhores coeficientes possíveis para a determinada situação, como visto em Gillespie (1992) e Milliken & Milliken (2003).

A dinâmica veicular combina os estudos de suspensões veiculares e de aerodinâmica, junto com estudo de pneus e pista. O passo inicial da definição do projeto é determinar qual o objetivo do veículo, quais características devem ser focadas e quais parâmetros são mais importantes. Este passo inicial deriva do veículo, da competição e das regras que envolvem esta.

A competição de Fórmula SAE é organizada pela SAE internacional, nos Estados Unidos, e pela SAE Brasil no Brasil. O seu objetivo é que estudantes projetem, construam e compitam com um veículo monoposto, com as rodas expostas e tração traseira. A competição é dividida em provas estáticas e provas dinâmicas, nas quais são julgados os conceitos de projeto, custos e mercado do veículo junto com seu desempenho em pista com quatro tipos de prova diferentes.

Para a Fórmula SAE há um conjunto de regras que determinam muitas variáveis do carro, tal como a distância mínima e máxima entre-eixos, que é medida entre o centro das rodas dianteiras e o centro das rodas traseiras. Outros fatores determinantes da regra são o volume de deslocamento máximo possível para o motor, limitações geométricas do veículo e dos componentes aerodinâmicos. Além destas, há também diversas partes da regra no qual o foco é a segurança do veículo, determinando valores mínimos exigidos de coeficientes estruturais. Todas estas limitações conjuntas determinam como deve ser um veículo que participa das competições de Fórmula SAE,

da mesma maneira que limitam um veículo da Formula 1, Formula 3 e todas outras competições veiculares.

A competição de Fórmula SAE é dividida em diversas provas em que a Equipe precisa pontuar, divididas em provas estáticas e provas dinâmicas. Provas estáticas são aquelas nas quais não é necessário o veículo andar, são apresentações feitas pelos membros da Equipe. Já as provas dinâmicas são aquelas nas quais o único fator que leva à pontuação é o desempenho do veículo. A Tabela 1 a seguir mostra quais são as provas da competição de Fórmula SAE no Brasil e qual a pontuação associada a estas provas.

*Tabela 1 - Provas e respectivas pontuações na competição de Fórmula SAE Brasil*

<b>Prova</b>	<b>Pontuação</b>
<b>Provas estáticas</b>	
Projeto	150
Apresentação de mercado	75
Custos	100
<b>Total provas estáticas</b>	<u>325</u>
<b>Provas dinâmicas</b>	
Aceleração	75
Skid Pad	50
Autocross	150
Enduro e eficiência de energia	400
<b>Total provas dinâmicas</b>	<u>675</u>

Com esta distribuição, nota-se que uma grande porcentagem dos pontos possíveis na competição provém de provas dinâmicas. Assim, mostra-se necessário o desenvolvimento de um projeto de dinâmica veicular o qual entregue um carro capaz de pontuar o máximo possível nestas provas.

Com estes fatores contados, a equipe começou então a desenvolver estudos profundos em suspensões veiculares e também em aerodinâmica, visto que estes dois fatores são os maiores determinantes na construção de uma dinâmica veicular que entregue os resultados desejados. O projeto da aerodinâmica na equipe começou no ano de 2013, partindo de conceitos já estabelecidos dos estudos de suspensão juntamente com projeções de potência do motor. Este estudo entrou em contínuo

desenvolvimento e aprimoramento e a última iteração, utilizada no veículo de 2015, o E13, entregou para a equipe o desempenho esperado.

Este trabalho foi desenvolvido por Ballén-Daza (2015) em seu mestrado, o qual foi utilizado para o embasamento teórico deste trabalho. A Imagem 3 e a Imagem 4 mostram a diferença entre os dois veículos: O primeiro veículo da Equipe com aerodinâmica, o E60, e o E13, o veículo objeto de estudo.



*Imagem 3 - CAD do E60, primeiro carro com aerodinâmica*

*Fonte: Equipe EESC-USP Formula SAE*



*Imagem 4 - CAD do E13, carro do ano de 2015*

*Fonte: Equipe EESC-USP Formula SAE*

Com valores de *downforce* dentro do planejado, restou-se dois pontos do projeto a serem melhorados: peso total dos componentes, visto que o peso afeta diretamente a velocidade e aceleração do protótipo, e o arrasto total gerado pelo sistema aerodinâmico, visto que quanto menos arrasto, maior será a aceleração do veículo e menos energia ele terá que gastar para atingir velocidades nos finais de retas. No protótipo E14 já estão sendo realizados estudos com relação à redução de peso dos componentes aerodinâmicos da Equipe, restando assim a implementação do DRS.

Para modificar o perfil das asas é necessário um sistema de atuação, o qual é composto por um atuador, este elétrico ou pneumático, um mecanismo para transferir a força do motor para as asas e um sistema de ativação, controlado pelo piloto, preferencialmente posicionado na direção do carro, de modo que o piloto não precise mover as mãos para acionar o sistema. A Imagem 5 mostra a asa traseira de um carro da Fórmula 1 com os aerofólios abertos, resultado da atuação do DRS.



*Imagem 5 - Asa traseira de um veículo de Formula 1 com o DRS ativado*

*Fonte: Website oficial da Formula 1*

O sistema de aerodinâmica da equipe parte do princípio que o veículo nem sempre está usando 100% da potência que o motor produz, visto que as velocidades médias do protótipo estão em torno de 60 km/h. Isto significa que parte desta potência pode ser dedicada para o desenvolvimento da aerodinâmica. Outra limitação do projeto está nas regras da competição de Fórmula SAE, que restringem os tamanhos dos componentes aerodinâmicos.

Com estes parâmetros em mão, aliado com o projeto global da equipe de ter uma dinâmica veicular que entregue um carro que desempenhe de modo exemplar em todas as provas da competição, é iniciado o estudo do desenvolvimento dos elementos da aerodinâmica do protótipo. Além dos parâmetros de projeto, também é necessário considerar fatores de manufatura, tais como quais fibras serão usadas, como serão laminadas, o estudo da estrutura de fixação das asas e difusor e a interferência destes nos sistemas do carro.

Para cada uma das asas do veículo, traseira e dianteira, há um método diferente de modelagem para obtenção do melhor valor possível. Há também uma outra modelagem para o assoalho difusor do carro.

### 2.1.1 Asa traseira

No ano de 2015, a competição de Fórmula SAE começou com uma regulação maior dos dispositivos aerodinâmicos, de maneira a criar um limite máximo no qual os projetos podem se basear. Para a asa traseira, as regras criadas foram:

1. Máximo de 250mm de distância de qualquer parte da asa a partir do final dos pneus traseiros;
2. A asa deve estar limitada à face interna dos pneus traseiros do carro;
3. Distância de no máximo 1200mm do solo

As simulações em CFD da asa traseira, com busca constante em extrair o máximo de *downforce* possível, resultam na geometria representada na Imagem 6. Os principais elementos que compõe a asa traseira são:

1. *Mainplane*, o componente principal da asa;
2. Aerofólios, os componentes que complementam o *mainplane* na geração da maioria da *downforce*;
3. *Endplates*, responsáveis pela fixação do *mainplane* e dos aerofólios.

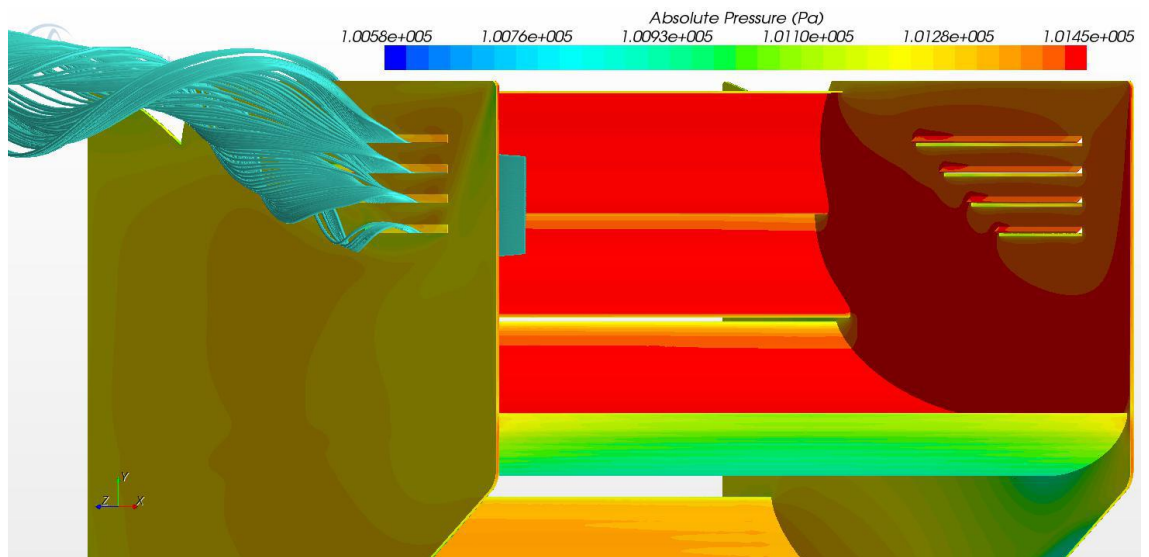


Imagem 6 - Imagem do resultado de uma simulação CFD para a asa traseira do protótipo E13

Fonte: Ballén-Daza (2015)

### 2.1.2 Asa dianteira

A asa dianteira do veículo também possui um conjunto de regras que a limitam:

1. Máximo de 700mm de distância de qualquer parte da asa a partir da face da frente do pneu dianteiro;
2. Limitada à face externa dos pneus dianteiros;
3. Quando realizada uma vista frontal do veículo, qualquer parte dos pneus que está acima de 250mm do solo não pode estar obstruída por nenhuma superfície vertical com espessura maior que 25mm.

Da mesma forma que a asa traseira, na Imagem 7, pode-se nomear os componentes da asa dianteira:

1. *Mainplane*, o componente principal da asa
2. Aerofólios, componentes complementares na geração de *downforce*, nesta asa apresentados em configuração de cascata;
3. *Endplates*, responsáveis pela fixação da estrutura da asa;
4. *Footplates*, complementares aos *endplates*, responsáveis por ajudar a incrementar a *downforce* gerada pelos *endplates*.

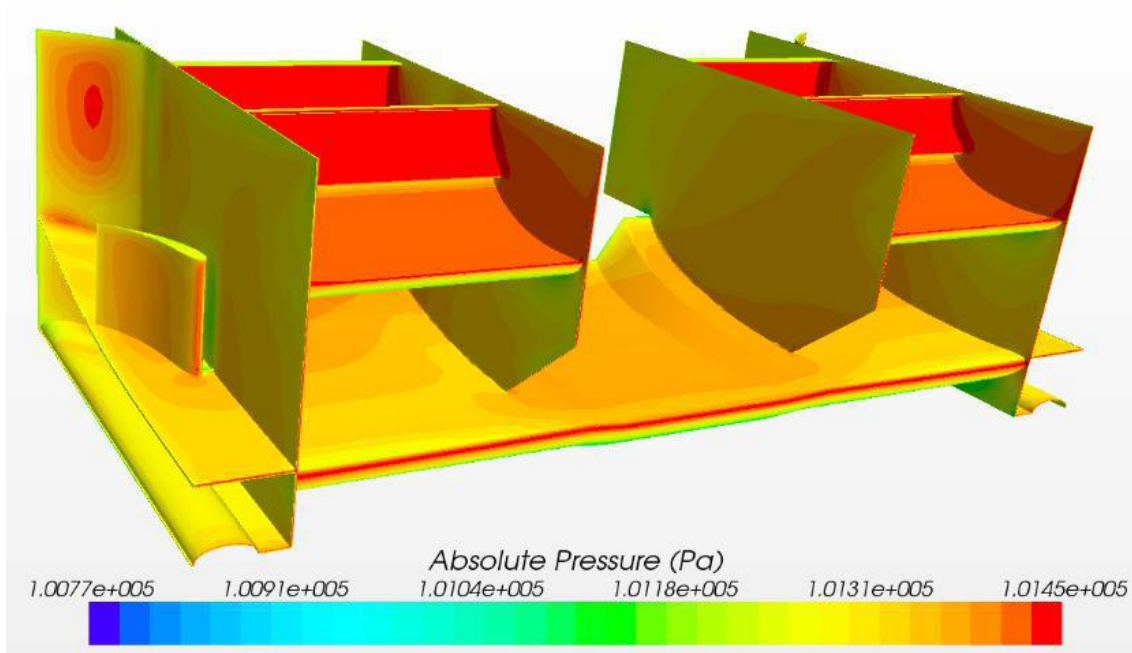


Imagem 7 - Imagem de uma simulação CFD para a asa dianteira do protótipo E13

Fonte: Ballén-Daza (2015)

### 2.1.3 Assoalho difusor

Por último, o assoalho difusor, que possui menos limitações em regra do que os outros dois componentes, sendo importante apenas não ser baixo o suficiente para que entre em contato com o solo, pois qualquer componente do veículo que entre em contato com o solo que não seja os pneus gera uma desclassificação da prova corrente.

O assoalho difusor é responsável por acelerar o ar que passa na parte inferior do carro à máxima velocidade possível, reduzindo a pressão aerodinâmica e consequentemente gerando altos valores de *downforce*. O difusor do E13 em sua iteração final é demonstrado na Imagem 8.

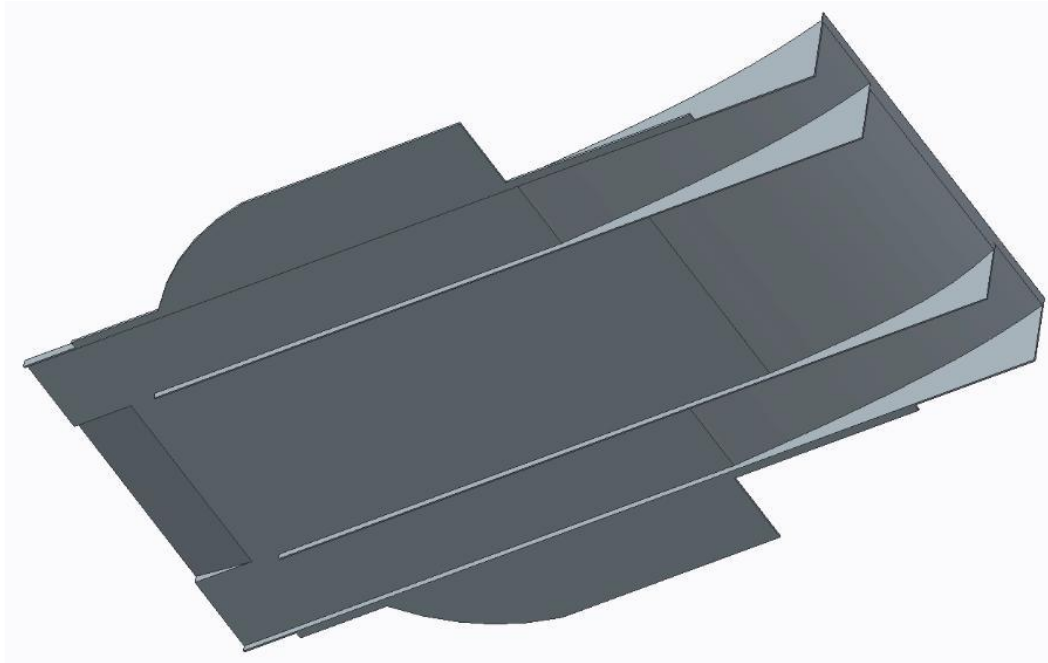


Imagem 8 - Imagem do desenho em software do assoalho difusor do protótipo E13

Fonte: Ballén-Daza (2015)

## 2.2 Simulações de desempenho

A partir dos dados completos do carro, que inclui dados do motor, transmissão, suspensão, aerodinâmica e pneus, é possível modelar o veículo em *softwares* de simulação, os quais conseguem trazer resultados próximos à realidade e assim averiguar se implementações de projeto serão viáveis do ponto de vista do desempenho do carro.

A Equipe utiliza dois destes *softwares* para estabelecer parâmetros para os projetos: OptimumLap, da empresa OptimumG, e Adams Car, da empresa MSC Software. O primeiro possibilita uma modelagem simples do carro, possui diversas pistas em seu banco de dados, porém o resultado entregue não é preciso quando comparado à desempenhos em pista na realidade, enquanto o segundo requer um estudo mais aprofundado dos parâmetros do carro, principalmente os de suspensão, porém seu resultado é mais próximo da realidade do que o primeiro.

Como o modelo de suspensão do carro já está estabelecido e a necessidade do uso destes *softwares* reside apenas em verificar qual o desempenho que a implementação do DRS irá agregar ao protótipo, optou-se pelo uso do OptimumLap para averiguar esta informação.

A simulação será feita para duas condições: a primeira, a prova de enduro e eficiência energética e a segunda, a prova de *autocross*. O enduro é uma prova que requer que o veículo execute 22 voltas no circuito, totalizando 22 km, sem apresentar quebras ou falhas e após estas voltas é medido o consumo de combustível, e através de equações que levam em conta o tempo médio de volta, o pior e o melhor tempo de volta no enduro entre todos os carros da competição, calcula-se a eficiência energética do carro. A prova de *autocross* segue os mesmos moldes de pista do enduro, porém é uma prova de circuito aberto na qual o piloto tem duas oportunidades de tentar fazer o melhor tempo de volta.

Para simular a utilização do DRS no *software*, necessitou-se estabelecer duas simulações base: Uma utilizando valores de *downforce* e arrasto originais do veículo, estabelecidos nas simulações CFD, a segunda simulação foi montada utilizando os valores de *downforce* e arrasto para perfis de arrasto mínimo também simulados em CFD. Os resultados destas duas simulações base foram analisados e trechos de importância foram transpostos para o resultado final: trechos de curva, onde a *downforce* é necessária, foram adicionados da primeira simulação, enquanto trechos de reta, partes nas quais o DRS tem efeito, foram adicionadas da segunda simulação. Desta forma tem-se os resultados finais.

### 2.2.1 Parâmetros da simulação

No *software* OptimumLap é possível configurar dois grandes grupos de parâmetros de entrada: o veículo e a pista na qual o veículo irá desempenhar.

Para o veículo, é oferecido no programa um modelo específico para Fórmula SAE, para o qual é necessário apenas acertar os parâmetros finos relacionados ao protótipo que será simulado. Os ajustes que foram realizados são:

- Peso total do carro com piloto;
- Coeficiente de arrasto aerodinâmico, coeficiente de sustentação aerodinâmica e área frontal;
- Raio do pneu, resistência do pneu à rolagem, fricção longitudinal e fricção lateral;

- Gráfico torque x RPM do motor, eficiência térmica e combustível utilizado;
- Tipo de transmissão (Sequencial ou CVT), relações das marchas e relação final da caixa de transmissão.

Após a modelagem do veículo, optou-se por utilizar uma pista retirada diretamente do banco de dados oficial do *software*, que é a prova de *autocross* da competição da Alemanha, do ano de 2012. O motivo da escolha desta pista reside no fato de que ela possui todos os aspectos que estão na regra oficial da competição, com relação à distância total, obstáculos e traçado.

## 2.2.2 Resultados da simulação

### 2.2.2.1 *Enduro e eficiência energética*

Com o modelo do carro e a pista estabelecidos, executou-se primeiramente a simulação de tempo de volta para um circuito fechado. Isto significa que o *software* irá considerar que o carro irá dar mais de uma volta no circuito e, assim, sua velocidade no ponto inicial não será zero. O circuito fechado demonstrará quanto tempo é possível reduzir no tempo total da prova do enduro na competição, que é a prova que mais pontos agrega no total.

A Imagem 9 mostra a distribuição das velocidades do carro na pista para a simulação. Os pontos que são necessários observar como referência são as velocidades na reta, que são os trechos nos quais o DRS irá ter atuação. A Imagem 10 fornece a distribuição das velocidades para uma simulação que leva em conta o uso do DRS. É possível perceber que as velocidades em reta são maiores, atingindo assim o resultado de aumento de velocidade esperado.

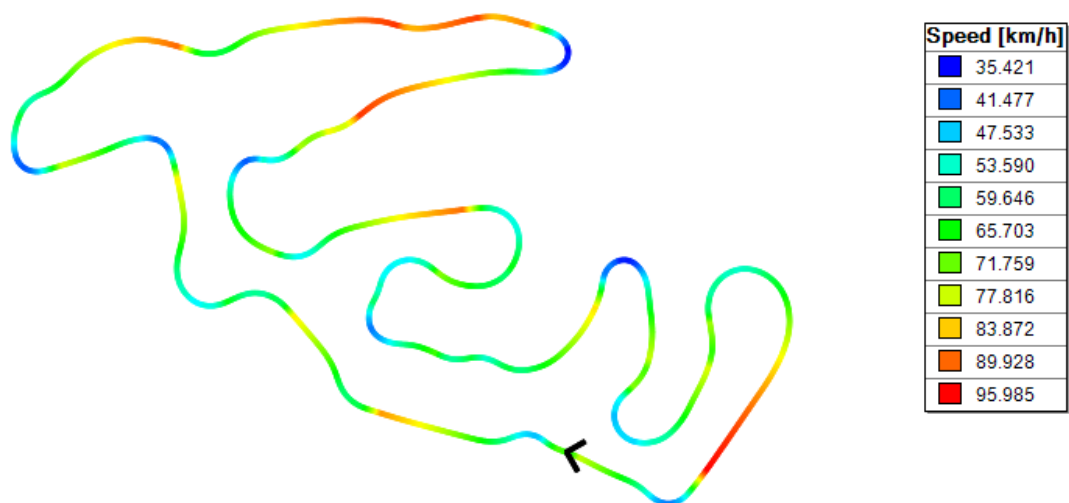


Imagem 9 - Resultado da simulação sem DRS para enduro

Fonte: Autor.

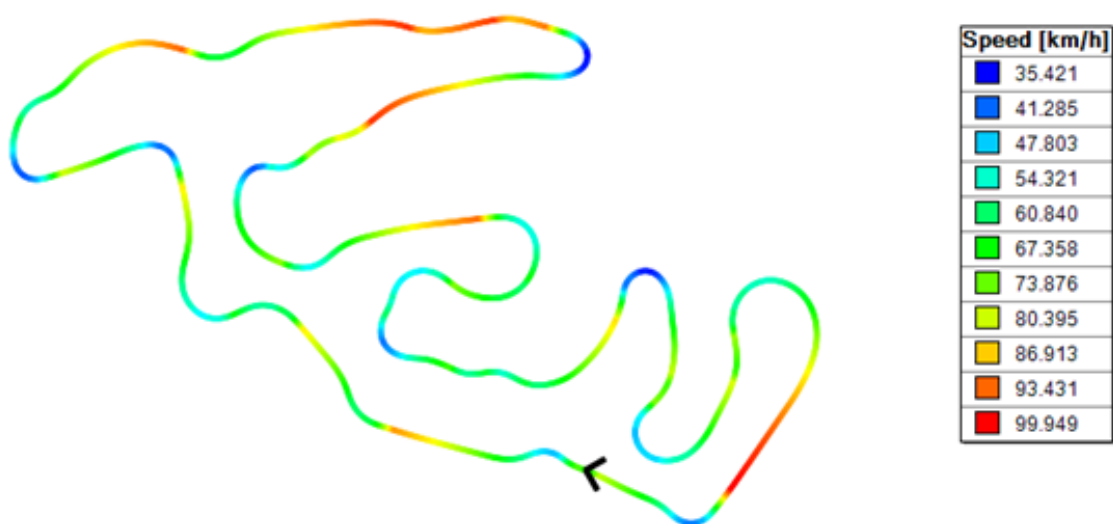


Imagem 10- Resultado da simulação com DRS para enduro

Fonte: Autor.

Finalmente, na Imagem 11 há os valores da velocidade sobrepostos em relação à distância no percurso. Percebe-se que em pontos de retas longas, na qual a velocidade do final do veículo é elevada, o DRS entra em efeito e fornece velocidades finais maiores.

Comparando os tempos de volta dos dois percursos, temos 71,29 segundos para a volta sem DRS e 70,73 segundos para a volta utilizando o DRS. Esta redução de 0,5 segundos inicialmente pode parecer pequena, porém ao expandir para 22 voltas do enduro, essa diferença começa a se tornar substancial. Aliado à redução do tempo de

volta, também há uma significativa redução do consumo de combustível do carro: Na volta sem DRS o carro utiliza aproximadamente 0,1L de combustível por volta, enquanto com DRS cai para 0,097L.

Quando combinado a redução no tempo total de volta do enduro com a redução no consumo de combustível, é possível utilizar estes números em resultados de competições anteriores e verificar qual a diferença real que esta redução traria.

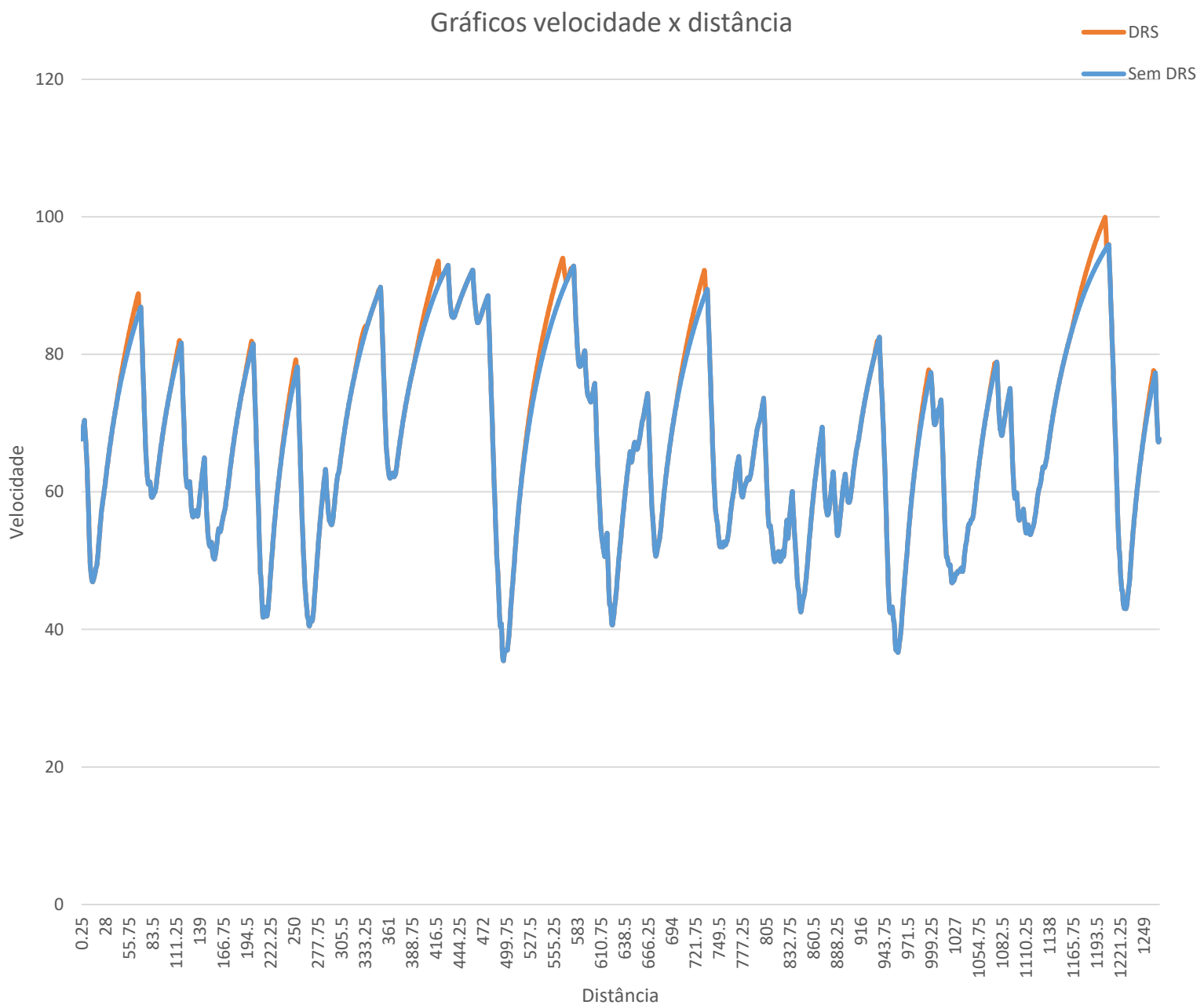


Imagem 11 - Gráfico comparativo de velocidades para enduro

Fonte: Autor.

Na competição de 2015 de Fórmula SAE do Brasil, os tempos de volta foram relativamente mais elevados, por ser uma pista diferente da utilizada na simulação. Assim, decidiu utilizar-se a redução do tempo de volta em valores relativos, de modo a se aplicar para qualquer tempo de volta. O mesmo foi feito para o consumo de combustível. Com o tempo total das voltas 99,2% do tempo original e o consumo de combustível 97% do original, a diferença total na pontuação da Equipe seria de 30 pontos para mais. Estes 30 pontos significam pouco ao se olhar cruamente, em relação a uma competição que possui 1000 pontos, porém eles podem compensar, por exemplo, a baixa pontuação da Equipe na prova de aceleração, que foi de 30 do total de 75 pontos. Levando essa diferença de pontuação para situações em outras competições, como por exemplo a competição de 2016 do Formula Student na Alemanha, podemos coletar a pontuação dos 7 primeiros lugares e representar na Tabela 2.

*Tabela 2 – Pontuação na competição Formula Student Germany 2016*

<b>Equipe</b>	<b>Pontuação</b>	<b>Colocação</b>
TU München	852,42	1º
U Stuttgart	838,96	2º
UAS Graz	782,30	3º
U Erlangen	779,83	4º
UAS Esslingen	769,36	5º
UAS Coburg	752,02	6º
TU Graz	751,43	7º

E assim verifica-se que 30 pontos a mais fariam a equipe da TU Graz ir para o quarto lugar, ou a equipe da U Erlangen ir para o terceiro, ou, mais impactante ainda, garantir a primeira colocação para a equipe da U Stuttgart.

### 2.2.2.2 Autocross

A simulação para o *autocross* diferencia-se do enduro pois é feito em circuito aberto, assim o carro possui velocidade inicial de 0 km/h. O modelo do carro utilizado é o mesmo da simulação feita para o enduro.

Observa-se novamente um pico maior de velocidade para o veículo utilizando o DRS, como mostra a Imagem 12, Imagem 13 e Imagem 14. Desta vez, a diferença dos tempos de volta foi de 71,79s para a volta usando DRS e 72,33s para a volta sem DRS. Extrapolando essa diferença da mesma maneira que foi feita para os resultados da simulação do enduro, é possível perceber que essa diferença de tempo equivale um total de 10 pontos na competição, adicionando ainda mais ao total possível que o DRS pode adicionar.



Imagem 12 - Resultado da simulação sem DRS para autocross

Fonte: Autor.



Imagem 13 - Resultado da simulação com DRS para autocross

Fonte: Autor.

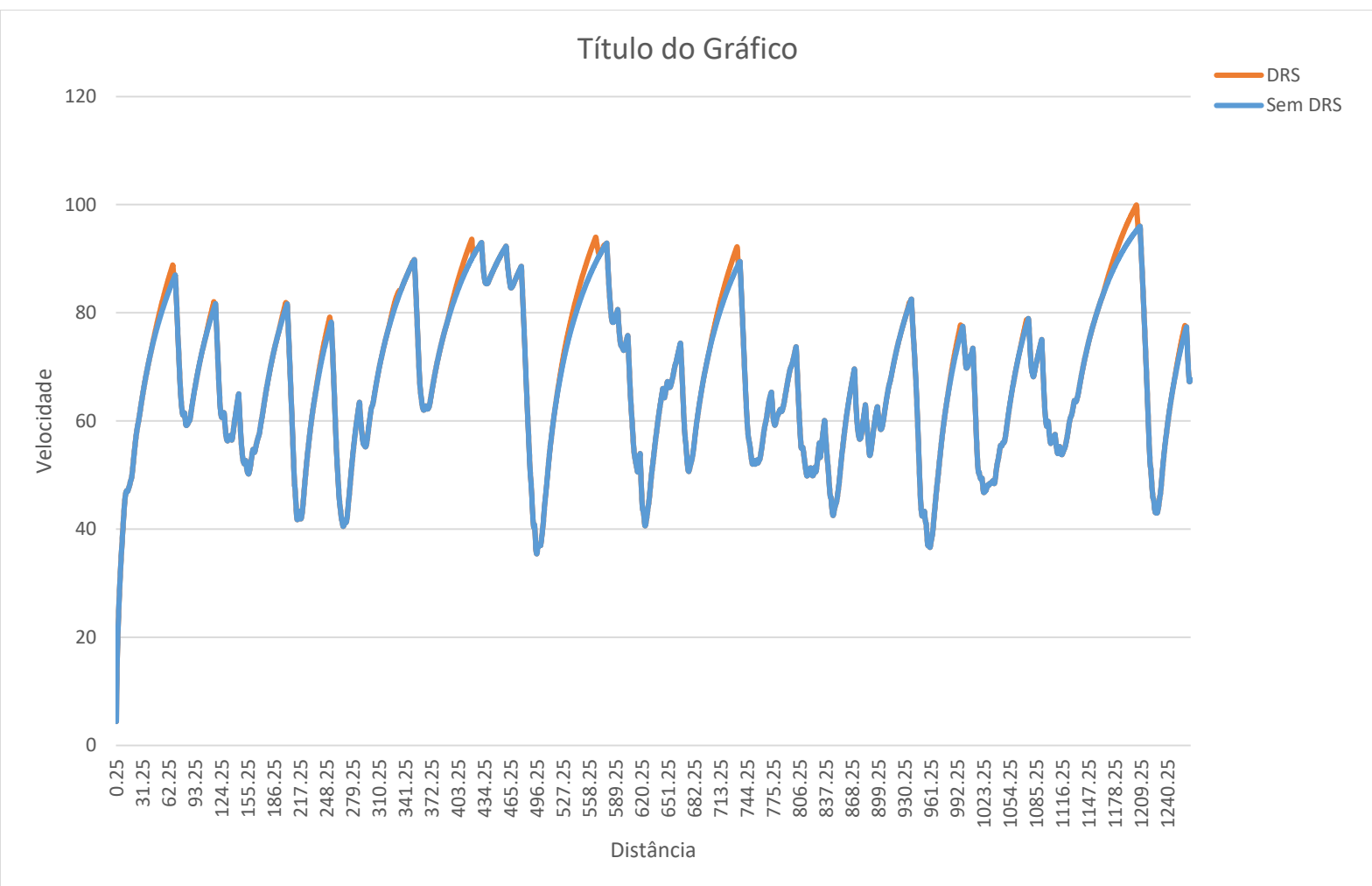


Imagem 14 - Gráfico comparativo de velocidades para autocross

Fonte: Autor.

## 3 IMPLEMENTAÇÃO

### 3.1 Simulações CFD

O projeto do sistema de redução de arrasto segue lado a lado com o projeto da aerodinâmica do veículo pois através dos valores de *downforce* e arrasto que se obtém como resultado das simulações CFD é possível determinar os ângulos de ataque para os perfis escolhidos. Para este projeto, considerou-se dois tipos de perfis: O perfil de máxima *downforce*, que será utilizado quando a asa não estiver sob atuação do sistema de redução de arrasto, e o perfil de mínimo arrasto, que é utilizado no sistema para obter o menor valor possível de arrasto no conjunto da asa traseira. Para a aerodinâmica do protótipo do E13, os valores finais encontrados em simulação para cada componente aerodinâmico com o veículo a 50 km/h podem ser vistos na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 - Valores finais de arrasto para componentes aerodinâmicos do E13

<b>Componente simulado</b>	<b><i>Downforce</i> (N)</b>	<b>Arrasto (N)</b>
Asa traseira	337,84	147,02
Asa dianteira	171,82	70,95
Assoalho difusor	160,10	27,42

Com estes valores é possível verificar que a asa traseira do veículo é o componente de maior influência tanto na geração de *downforce* quanto no arrasto. A asa dianteira é o próximo grande componente que gera arrasto, embora ele não possua muita obstrução na parte frontal do carro há partes próximas da carenagem do veículo e os pneus, que influenciam negativamente neste componente, como pode ser visto na Imagem 15. Dessa forma, o componente a ser focado para a redução do *downforce* é, de fato, a asa traseira.

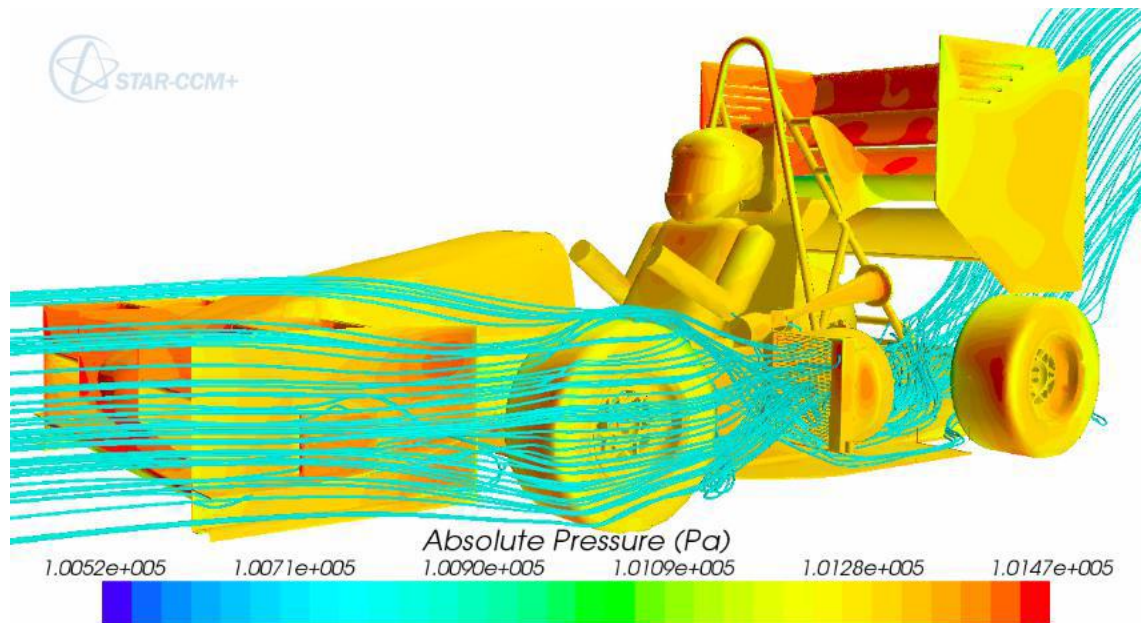


Imagem 15 - Simulação CFD para demonstrar o fluxo turbulento da asa dianteira do protótipo E13

Fonte: Ballén-Daza (2015)

Uma outra simulação, que pode ser chamada de simulação de carro inteiro, pode ser executada para achar os valores de *downforce* para o veículo considerando a interação dos diversos dispositivos aerodinâmicos no carro com outros componentes, como por exemplo as rodas, o radiador, o piloto e a estrutura do carro. O valor final achado para a *downforce* e para o arrasto do carro pode ser visto na Tabela 4.

Ao analisar estes valores é possível perceber que o valor total de *downforce* e de arrasto que é obtido no protótipo não é o resultado da soma dos valores dos três componentes individualmente. Como dito, a simulação de carro inteiro leva em consideração o fluxo em todo o veículo, dessa forma todas as peças são levadas em consideração. A asa traseira é um dos elementos mais afetados por isso, visto que há uma grande quantidade de obstrução do ar que chega nesta, reduzindo assim sua eficiência.

Através de diversas simulações CFD, é possível variar o perfil do aerofólio dianteiro e traseiro afim de obter um valor menor de arrasto, e conseqüentemente de *downforce*, e assim obter uma configuração dos elementos que entreguem um arrasto reduzido. Esta configuração de menor arrasto é a que será utilizada para basear o mecanismo do sistema de redução de arrasto. Com os perfis definidos, executa-se novamente uma

simulação de carro inteiro e obtém-se os valores de *downforce* e arrasto para a configuração de menor arrasto. Os valores finais são exibidos na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores finais de *downforce* e arrasto para diferentes perfis de aerodinâmica

Simulação de carro inteiro	<i>Downforce</i> (N)	Arrasto (N)
Configuração melhor <i>downforce</i>	584,74	388,67
Configuração menor arrasto	345,02	206,72

Observa-se assim que há uma redução de 47% no arrasto total do veículo, bem como uma redução de 41% na *downforce* gerada. Como esta configuração é utilizada apenas em trechos de reta na pista, o valor final da *downforce* gerada não é importante, pois esta força é utilizada apenas para a realização de curvas com uma maior velocidade, devido ao aumento do atrito dos pneus no asfalto. A Imagem 16 mostra os resultados da simulação CFD com demonstração da pressão aerodinâmica em cada um dos componentes.

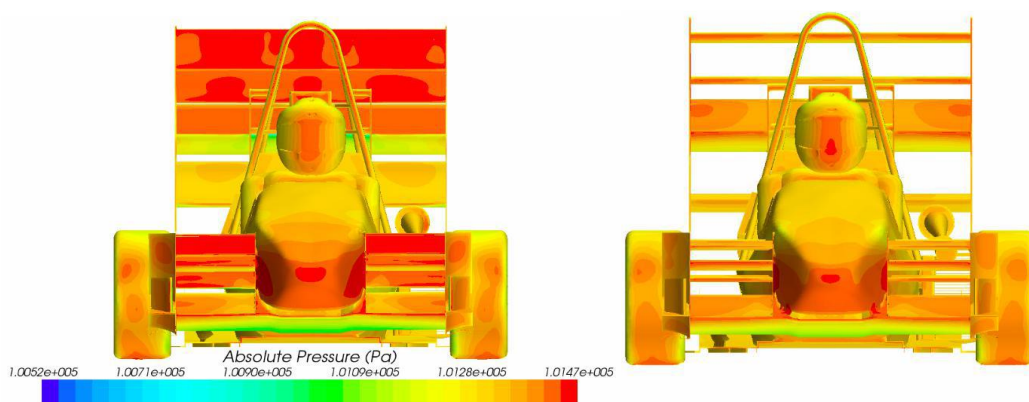
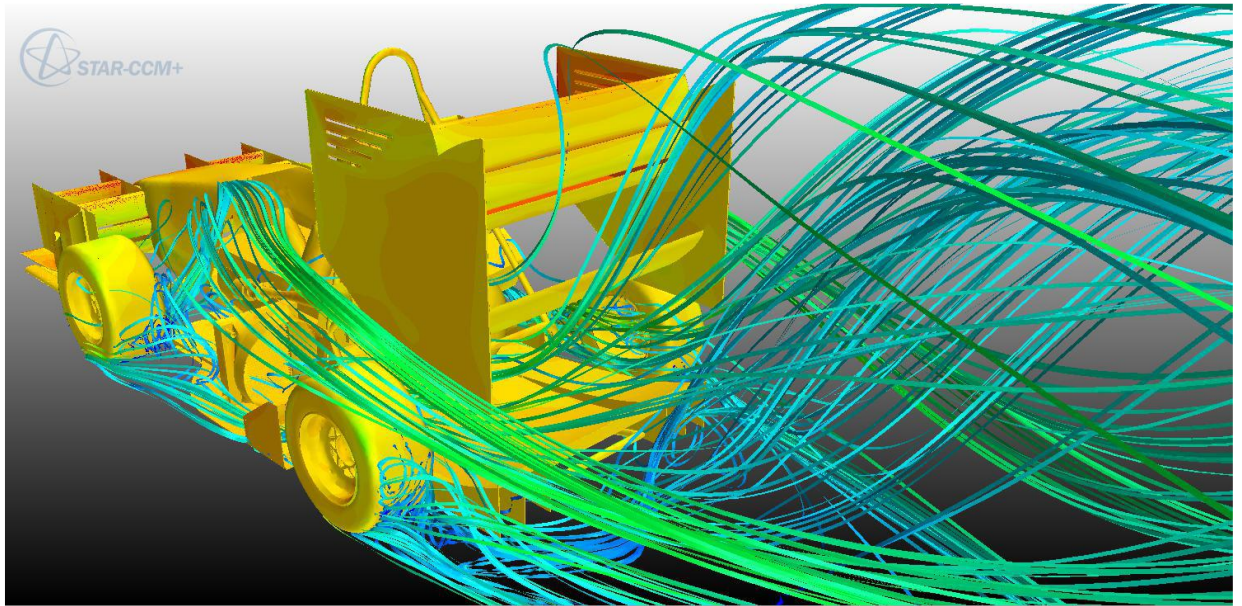


Imagem 16 - Simulações CFD para configuração *downforce* e configuração menor arrasto

Fonte: Ballén-Daza (2015)

Com base tanto na simulação de cada peça quanto na simulação de veículo inteiro, tira-se que a maior parte do arrasto gerado pelo veículo acontece por três fatores: O ar que chega na asa dianteira e colide com este elemento e também com as rodas do carro, o ar que entra em contato com o piloto e as outras estruturas do carro, tal como o radiador, e o ar que entra em contato com a asa traseira, como visto na Imagem 17. Destes três fatores, aquele que é melhor otimizado através do sistema de redução de

arrasto é a asa traseira, por também ser o componente que mais contribui no valor total do arrasto, como visto na Tabela 4 anteriormente.



*Imagem 17 - Simulação CFD de carro inteiro demonstrando o fluxo de ar turbulento no protótipo*

*Fonte: Ballén-Daza (2015)*

Dessa forma, trabalha-se com os ângulos possíveis para os aerofólios da asa traseira e realiza-se subsequentes simulações até que um valor mínimo de arrasto seja encontrado. Este ângulo dos aerofólios que fornecerá a base para a criação do mecanismo responsável pela abertura e fechamento destes componentes. A Imagem 18 e a Imagem 19 mostram a simulação CFD para o fluxo de ar na asa traseira com o perfil de *downforce* e o perfil de menor arrasto.

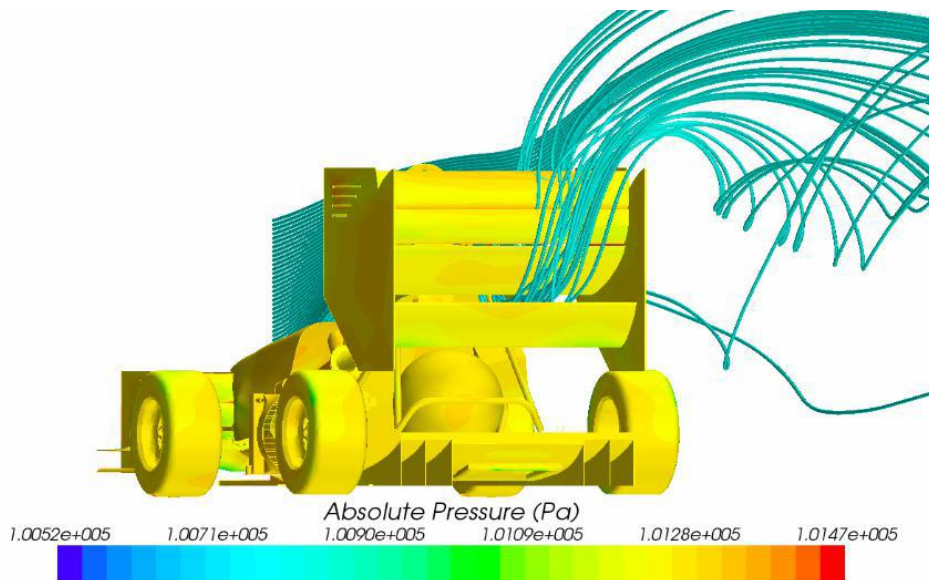


Imagem 18 - Simulação CFD para a asa traseira com configuração de downforce

Fonte: Ballén-Daza (2015)

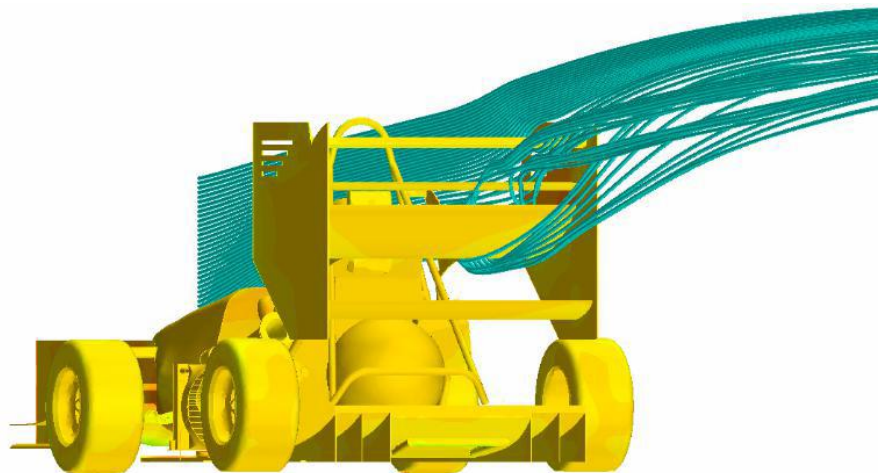


Imagem 19 - Simulação CFD para a asa traseira com configuração de menor arrasto

Fonte: Ballén-Daza (2015)

### 3.2 Desenvolvimento do mecanismo

O mecanismo do sistema de redução de arrasto tem por objetivo transferir a força que o motor irá gerar para os aerofólios, de forma que o tempo total de atuação seja pequeno e que não haja grandes perdas na transferência da força.

Feitas as simulações da asa traseira tanto com o perfil de *downforce* quanto o perfil de redução de arrasto definidos anteriormente, tem-se os valores de ângulo inicial e final que precisam ser alcançados com o sistema, estes representados na Imagem 18 e

na Imagem 19. Da mesma forma, com o perfil de *downforce*, tem-se os valores da força que irá se opor ao sistema, sendo assim possível realizar a escolha do motor de modo satisfatório.

O mecanismo desenvolvido é um mecanismo do tipo quatro barras, baseado na literatura de Norton (1999). O tipo do mecanismo foi escolhido por sua facilidade de manufatura, facilidade de montagem e manutenção e baixo uso de peças, visto que a maioria das peças do mecanismo serão feitas em impressão 3D e o restante será feito na própria oficina da Equipe. A Imagem 20 mostra o mecanismo inteiro projetado em CAD e os componentes que fazem parte do sistema são:

1. Peça de fixação do motor elétrico;
2. Pistão de transferência de força do motor para o mecanismo;
3. Primeira barra;
4. Fixação principal do mecanismo;
5. Balancim;
6. Segunda barra;
7. Fixação no aerofólio inferior;
8. Terceira barra;
9. Fixação no aerofólio superior;

Este mecanismo é responsável por transferir a força do motor através do pistão para a primeira barra, esta que está ligada ao balancim, conectado na fixação principal. O balancim transmite a força para a segunda barra, que movimenta o aerofólio inferior, e também transmite a força para a terceira barra, movimentando assim o aerofólio superior.

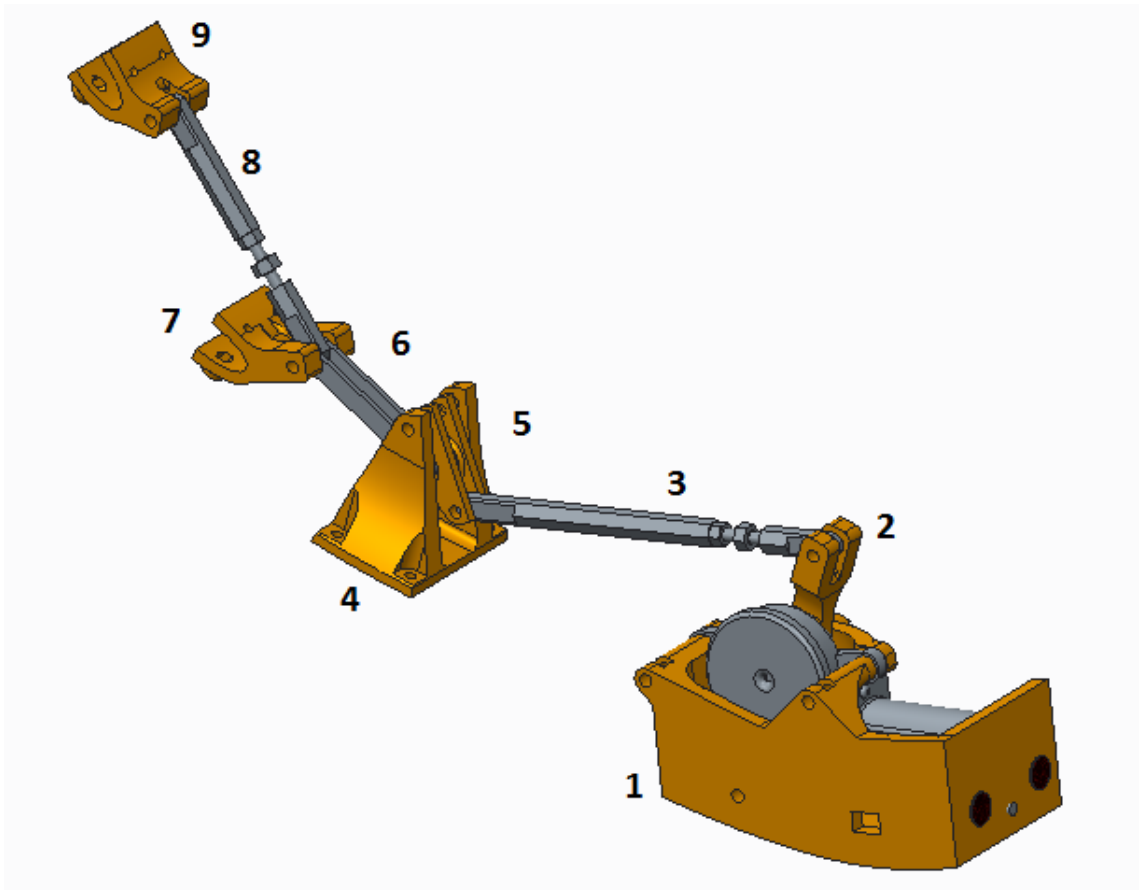


Imagem 20 - Mecanismo projetado em CAD

Fonte: Autor.

Na Imagem 21 é possível visualizar a configuração final da asa traseira do protótipo E13 com o mecanismo já posicionado. Nota-se que a peça que fixa o motor elétrico localiza-se dentro do *mainplane* da asa, de forma a reduzir a área que o mecanismo ocupa fora da asa. Apesar do mecanismo estar localizado acima da asa, potencialmente atrapalhando o fluxo do ar que gera a *downforce*, esta região é turbulenta aerodinamicamente devido à presença do piloto e do encosto de banco logo a frente, assim minimizando os efeitos da localização do mecanismo. Na Imagem 22 é possível visualizar a asa traseira aberta após a movimentação do mecanismo, atingindo o perfil de mínimo arrasto.

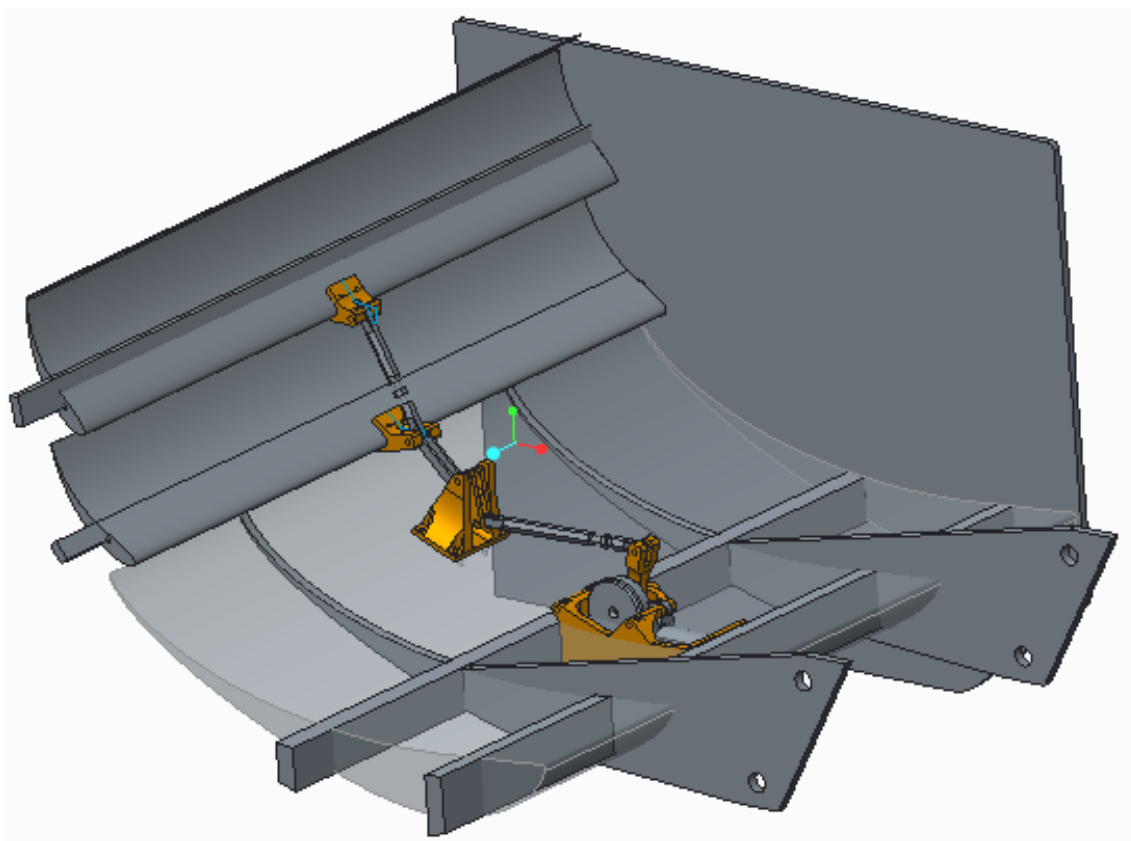


Imagem 21 - Visualização da asa traseira no perfil de melhor downforce com o mecanismo acoplado

Fonte: Autor.

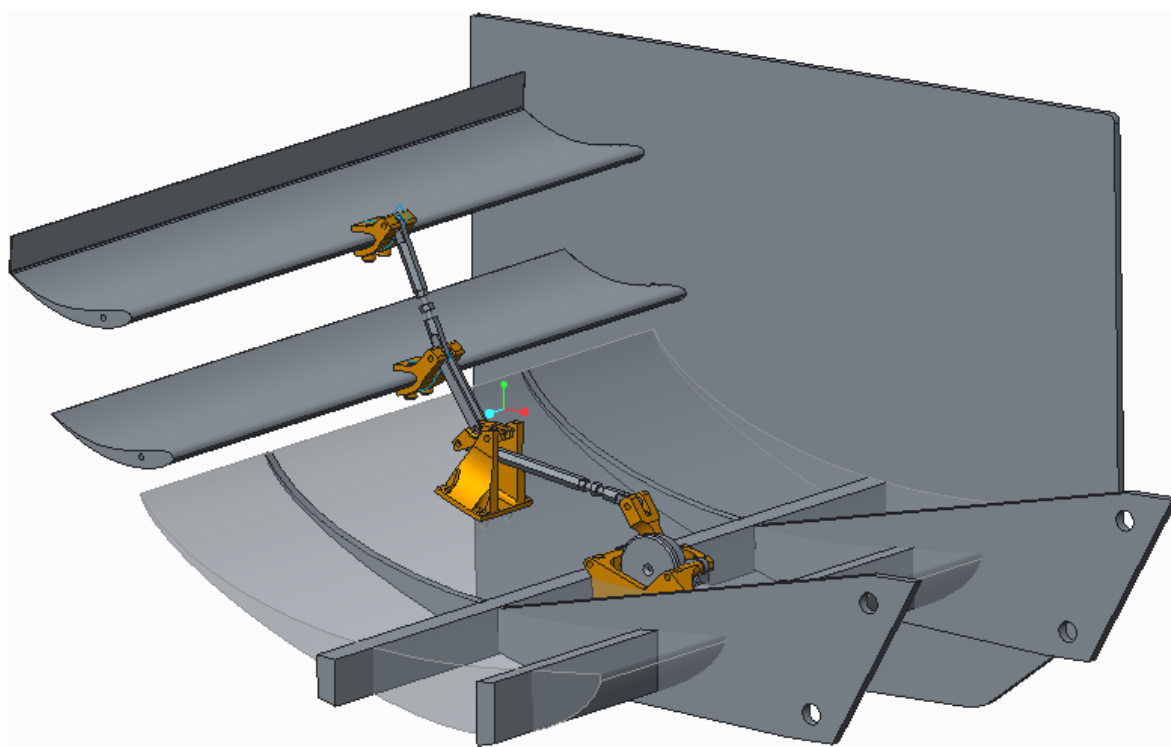


Imagem 22 - Visualização da asa traseira no perfil de menor arrasto com o mecanismo acoplado

Fonte: Autor.

### 3.3 Motor e sistema de controle

Para a definição do motor que irá atuar no sistema, levou-se em consideração quatro parâmetros: Força necessária para movimentar os aerofólios, confiabilidade do motor, preço e disponibilidade do mercado.

O principal fator, a força necessária para fechar o aerofólio, foi calculado a partir das simulações CFD do veículo no perfil de máxima *downforce*, pois neste momento é quando o motor elétrico precisa vencer a força do arrasto aerodinâmico para realizar o movimento. Para abrir, o sistema conta com a ajuda do arrasto para mover os aerofólios para o local desejado.

Para os cálculos da força total necessária para movimentar os aerofólios, levou-se em consideração os resultados das simulações realizadas no perfil de maior *downforce*. O valor do coeficiente de arrasto,  $C_d$ , que também é resultado das simulações CFD, é utilizado para calcular o arrasto total gerado pelos aerofólios de acordo com a seguinte equação:

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_d \cdot v^2$$

Sendo D o valor final da força de arrasto por aerofólio,  $\rho$  a densidade do ar, A a área total do elemento,  $C_d$  o coeficiente de arrasto e v a velocidade relativa do ar. Assim:

$$F_A = \frac{1}{2} \cdot 1,162 \cdot (0,120 \times 0,850) \cdot 0,77 \cdot 40^2 = 73 \text{ N}$$

Essa força do arrasto gera um momento, que pode ser calculado simplificadaamente utilizando o ponto médio do aerofólio. Para os aerofólios do E13, este ponto se localiza a 50mm e 70,6mm do ponto de pivotamento para o aerofólio superior e inferior, respectivamente. Assim, para cada um dos aerofólios, é possível calcular o momento total da força de arrasto  $M_{ds}$  e  $M_{di}$  com relação aos seus respectivos pontos de pivotamento.

Na Imagem 23 a seguir há uma visualização do mecanismo em CAD com a vista lateral. Já na Imagem 24, Imagem 25, Imagem 26 e Imagem 27 há a distribuição das forças que atuam no sistema.

Na Imagem 24 a  $\vec{F}_{A1}$ , que é a força de arrasto que atua no aerofólio superior. Esta força possui uma componente normal ao aerofólio,  $\vec{F}_{AN1}$ , que é a responsável por realizar o momento em torno do ponto de pivotamento. A força  $\vec{F}_{B1}$  é a força que a barra do mecanismo precisa realizar no aerofólio para mantê-lo fechado, sendo a componente normal  $\vec{F}_{BN1}$  a força que gera o momento.

Na Imagem 25 as forças no aerofólio inferior estão representadas:  $\vec{F}_{A2}$  é a força de arrasto total que atua no aerofólio e sua componente  $\vec{F}_{AN2}$  é a responsável pelo momento gerado em torno do ponto de pivotamento. A força  $\vec{F}_{B2}$  exercida pelo mecanismo necessita superar tanto  $\vec{F}_{A2}$  quanto  $\vec{F}_{B1}$ , do aerofólio superior.

A Imagem 26 mostra a distribuição das forças na peça de fixação principal do sistema.  $\vec{F}_{BT}$  é a força total vinda dos dois aerofólios, e  $\vec{F}_{BTN}$  é sua componente normal.  $\vec{F}_{BT}$  junto com  $\vec{F}_{BTN}$ , sua componente normal, representa a força que o motor irá exercer para movimentar todo o mecanismo para sobrepor a força de arrasto.

Finalmente na Imagem 27 as forças que o motor realiza são demonstradas.  $\vec{F}_{MR}$  é a força total que o motor realiza no sistema e  $\vec{M}_M$  é o momento total gerado pela engrenagem do motor.

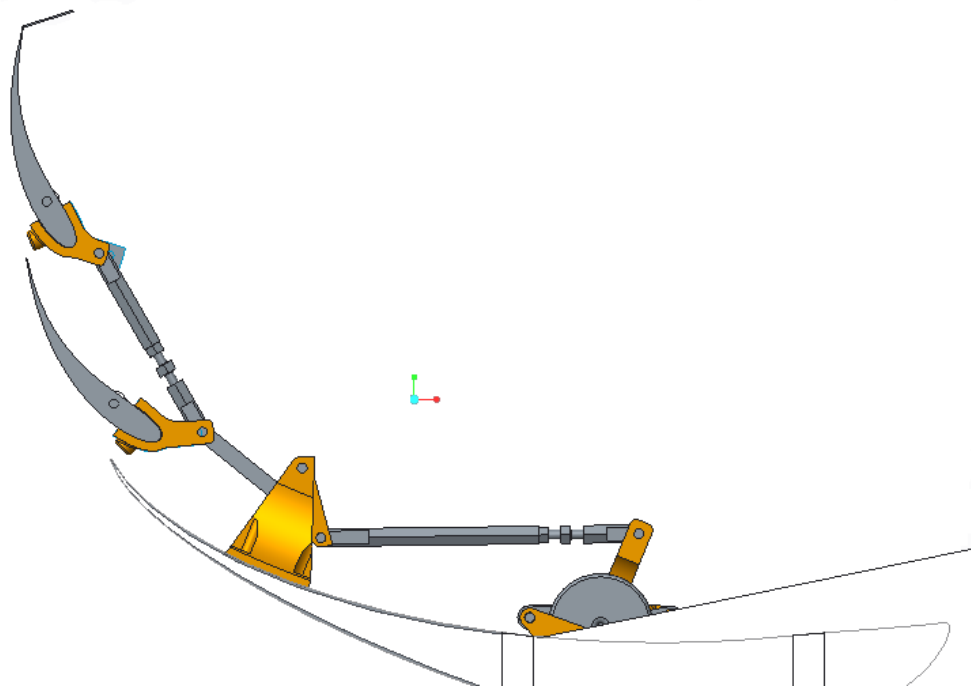


Imagem 23 - Vista lateral da asa traseira fechada

Fonte: Autor.

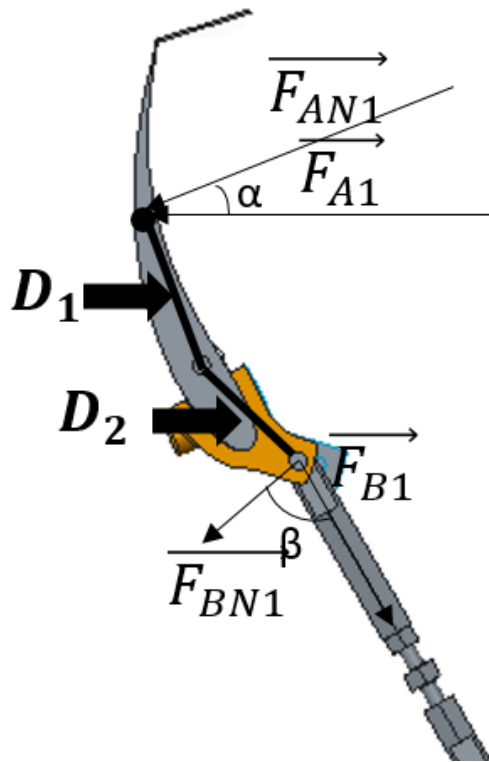


Imagem 24 - Forças no aerofólio superior

Fonte: Autor.

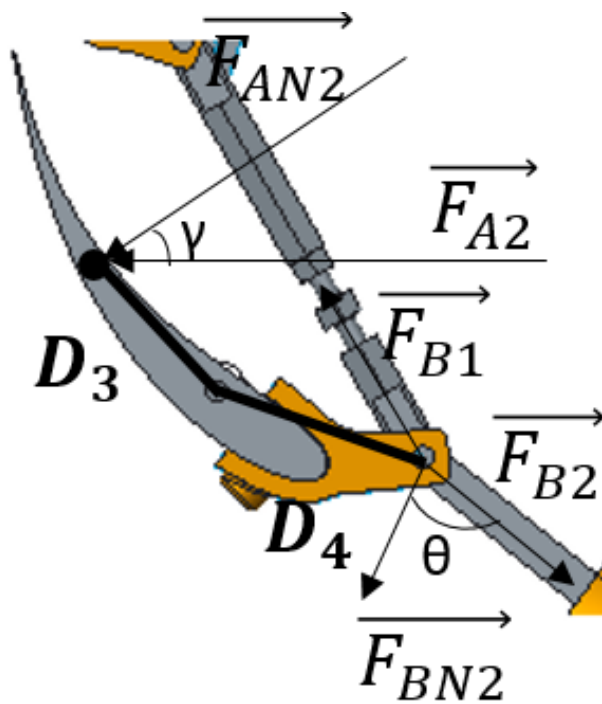


Imagem 25 - Forças no aerofólio inferior

Fonte: Autor.

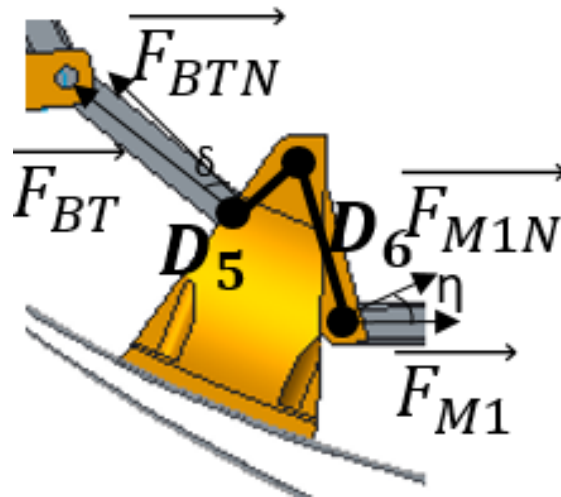


Imagem 26 - Forças no suporte principal

Fonte: Autor.

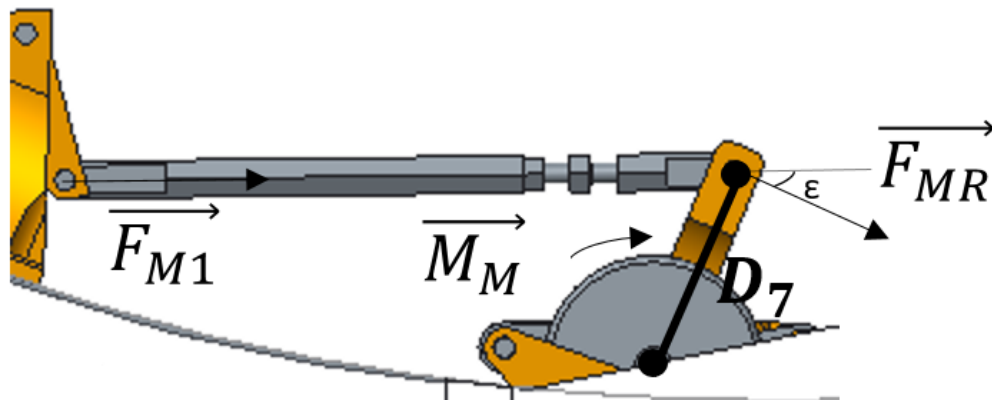


Imagem 27 - Forças no motor

Fonte: Autor.

Dado que o movimento de fechamento do aerofólio é feito em um curto espaço de tempo, não há tempo suficiente para que as camadas limites do ar, que são responsáveis por gerar os efeitos aerodinâmicos, se estabeleçam na transição da posição de aerofólio aberto para aerofólio fechado. Assim, é possível equacionar o sistema para a condição final no qual a força de arrasto é gerada com o aerofólio em posição de máxima *downforce*.

Tem-se:

- Aerofólio superior:

$$F_{AN1} = F_{A1} \cdot \cos(\alpha), \alpha = 21,06^\circ$$

$$F_{AN1} = 73 \cdot 0,93 = 67,9 \text{ N}$$

$$F_{BN1} \times D_2 = F_{AN1} \times D_1$$

$$F_{BN1} = \frac{67,9 \times 50 \times 10^{-3}}{46,2 \times 10^{-3}} = 73,5 \text{ N}$$

$$F_{BN1} = F_{B1} \cdot \cos(\beta), \beta = 69,5^\circ$$

$$F_{B1} = \frac{F_{BN1}}{\cos(\beta)} = \frac{73,5}{0,35} = 210 \text{ N}$$

- Aerofólio inferior:

$$F_{AN2} = F_{A2} \cdot \cos(\gamma), \gamma = 41,5^\circ$$

$$F_{AN2} = 73 \cdot 0,75 = 54,75 \text{ N}$$

$$F_{BN2} \times D_4 = (F_{AN2} + F_{B1} \cdot \cos(30,65^\circ)) \times D_3, 30,65^\circ \text{ o ângulo complementar entre } F_{B1} \text{ e } F_{BN2}$$

$$F_{BN2} \times 58,48 \times 10^{-3} = (54,75 + 210 \cdot 0,86) \times 45,13 \times 10^{-3}$$

$$F_{BN2} = 181,62 \text{ N}$$

$$F_{BN2} = F_{B2} \cdot \cos(\theta), \theta = 69,5^\circ$$

$$F_{B2} = \frac{181,62}{0,35} = 518,9 \text{ N}$$

- Fixação principal:

$$F_{BT} = F_{B2}$$

$$F_{BTN} = F_{B2} \cdot \cos(\delta), \delta = 29,5^\circ$$

$$F_{BTN} = 518,9 \cdot 0,87 = 451,44 \text{ N}$$

$$F_{BTN} \times D_5 = F_{MN1} \cdot D_6$$

$$F_{MN1} = \frac{451,44 \times 25,11 \times 10^{-3}}{45,4 \times 10^{-3}} = 249,7 \text{ N}$$

$$F_{MN1} = F_{M1} \cdot \cos(\eta), \eta = 12,6^\circ$$

$$F_{M1} = \frac{249,7}{0,975} = 256,1 \text{ N}$$

- Motor:

$$F_{M1} = F_{MR} \cdot \cos(\varepsilon), \varepsilon = 22,3^\circ$$

$$F_{MR} = \frac{256,1}{0,925} = 276,86 \text{ N}$$

$$M_M = F_{MR} \times D_7$$

$$M_M = 276,86 \times 63 \times 10^{-3} = 17,44 \text{ Nm}$$

Sabendo que o valor de  $M_M$  corresponde ao pior caso que é o exato momento de maior arrasto no ato de fechamento do aerofólio, analogamente calcula-se  $M_{M2}$ , que é o valor de momento do motor para o aerofólio aberto, que irá corresponder à força a ser vencida no início do movimento.

$$F_A' = \frac{1}{2} \cdot 1,162 \cdot (0,05 \times 0,850) \cdot 0,2 \cdot 40^2 = 7,9 \text{ N}$$

Resolvendo os mesmos passos acima para o valor de  $F_A' = 7,9 \text{ N}$ , tem-se o valor de  $M_{M2}$ :

$$M_{M2} = 2 \text{ Nm}$$

Com estes fatores em mão, decidiu-se utilizar o motor elétrico FPG da Bosch, pois é um motor amplamente utilizado em veículos, principalmente no controle do vidro elétrico, e assim possui alta disponibilidade no mercado e um preço acessível. A Imagem 28 mostra o gráfico das especificações do motor junto com seus valores nominais. Nas considerações feitas acima, os valores superiores e inferiores de momento estão dentro dos valores que o motor consegue entregar, confirmando assim a escolha.

$U_N$	12 V
$P_N$	10,2 W
$n_N$	98 rpm
$I_N$	6 A
$I_{MÁX.}$	42,0 A
$M_N$	1 Nm
$M_A$	16,9 Nm
$i$	73 : 1
Rot.	L / R
S	S2 - 5 min
IP	IP 5X
kg	0,600 kg
$\oplus R$	0 130 821 428
$\oplus L$	0 130 821 429

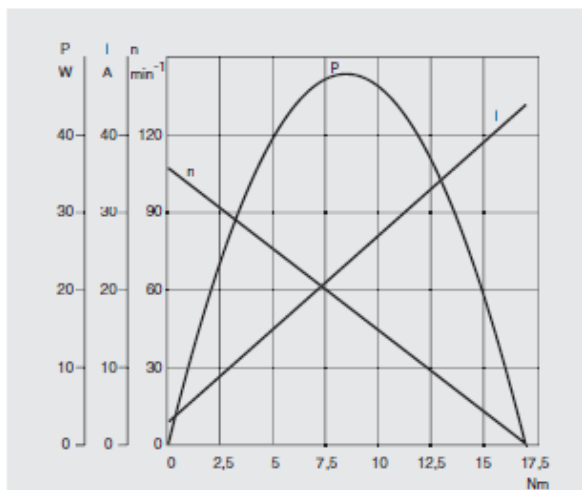


Imagem 28 - Gráfico e valores nominais de operação para o motor FPG Bosch

Fonte: Catálogo de motores elétricos Bosch.

Com o mecanismo e o motor já projetado e escolhido, foi necessário então criar um sistema de controle de forma a entregar ao piloto uma interface de fácil uso e com alta confiabilidade, pois o sistema não pode falhar em pista, caso contrário entregará uma resposta dinâmica ao piloto que não é esperada.

Assim, escolheu-se projetar uma ponte H que servirá para realizar o acionamento do motor, baseado em Sedra & Smith (2004) e Boylestad & Nashelsky (2008). A ponte H em questão é acionada por um módulo eletrônico desenvolvido pela própria Equipe denominado Eixo. Este módulo vai preso no carro na parte posterior, próximo ao diferencial mecânico.

A Imagem 29 mostra o esquemático do módulo, o qual possui um microcontrolador PIC18F2680 como processador central, responsável por receber sinais de sensores posicionados na traseira do veículo, tal como acelerômetro e giroscópio, e por enviar os sinais digitais que irão controlar o sentido que o motor elétrico irá rotacionar para realizar a abertura e fechamento dos aerofólios. O módulo Eixo, assim como todos outros módulos no carro, está comunicando através da rede CAN, que passa ao sistema de telemetria as condições do carro em tempo real.

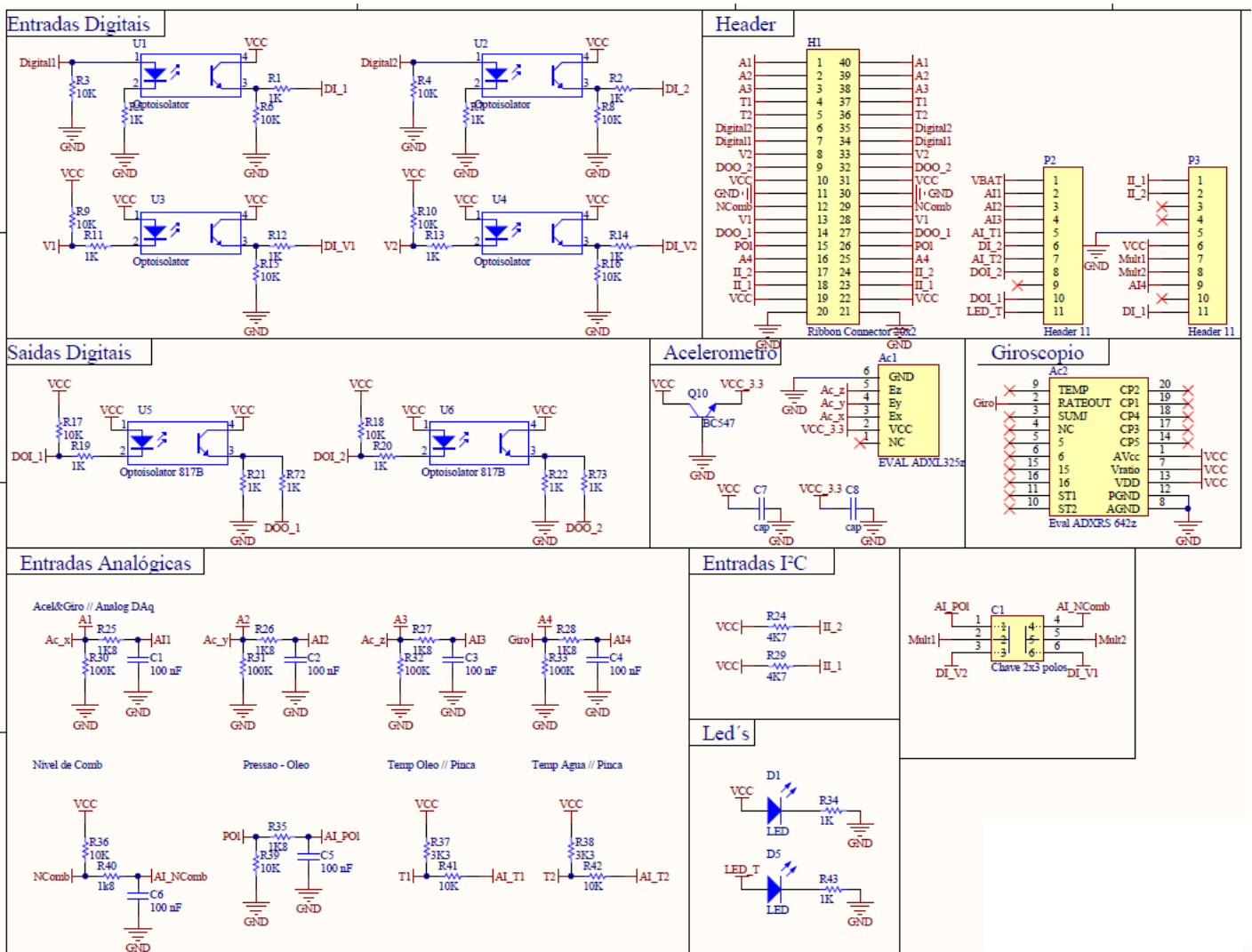


Imagem 29 - Esquemático do módulo Eixo

Fonte: Autor

A Imagem 30 mostra o esquemático final do circuito da ponte-H projetada. Os transistores Q1 e Q4 são responsáveis por girar o motor em um sentido enquanto os transistores Q2 e Q3 giram o motor no outro sentido. A ativação destes transistores acontece com o sinal digital positivo nas entradas A ou B, que fazem os transistores T1 e T4, respectivamente, conduzirem e fecharem o circuito. O transistor T1 é responsável por fechar o circuito dos transistores Q1 e Q4 e o T4, do Q2 e Q3. Os transistores T2 e T3 permitem que o circuito esteja com ambas entradas A e B em sinal alto, realizando a frenagem do motor.

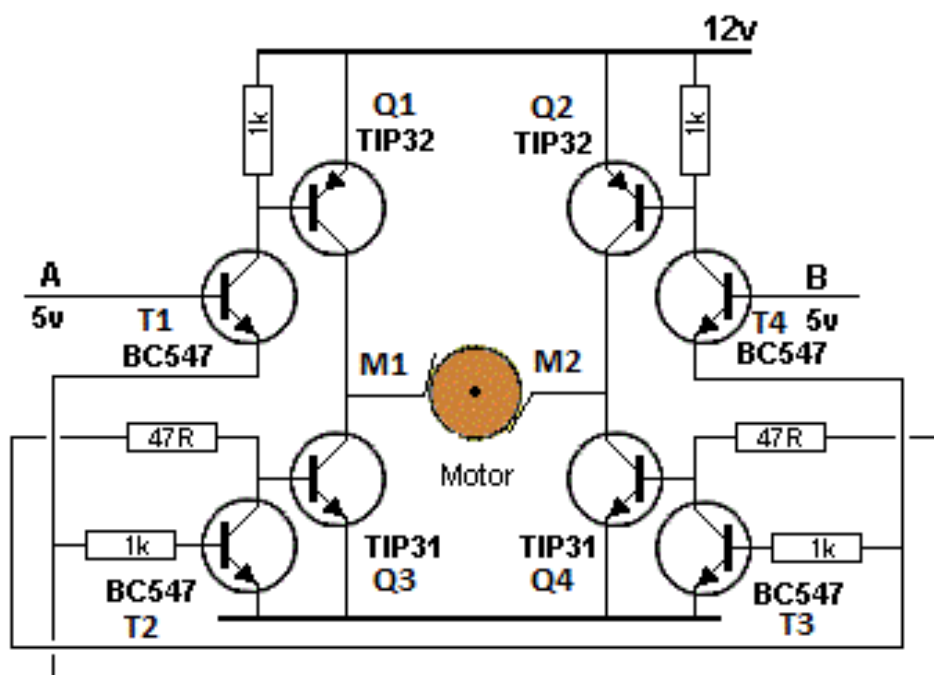
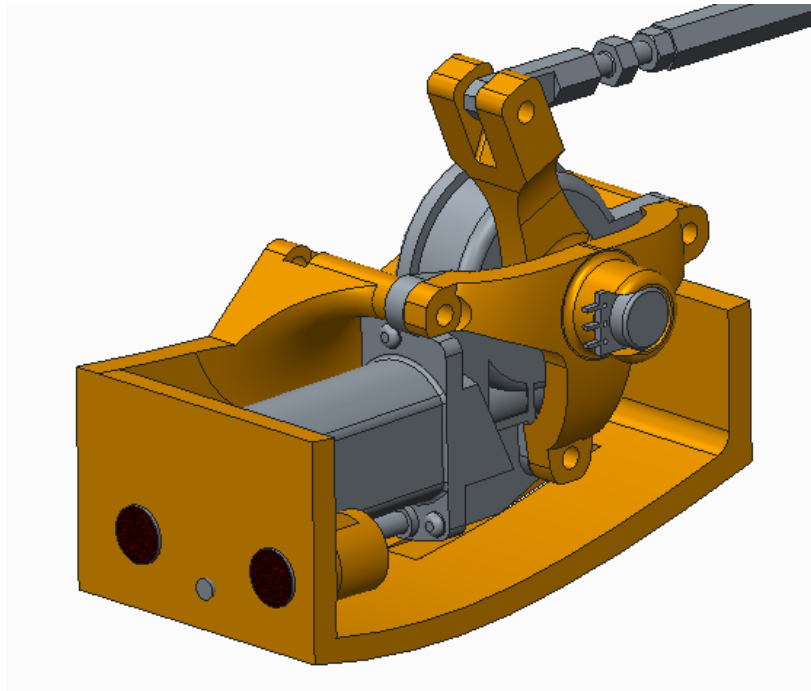


Imagem 30 - Esquemático da Ponte-H projetada

Fonte: Autor.

Para esta ponte H, decidiu-se utilizar para os transistores T1, T2, T3 e T4 o modelo BC547, pois é necessário somente que estes componentes trabalhem como chave digital. Para os transistores Q1 e Q2 utilizou-se os transistores do modelo TIP32C e para os transistores Q3 e Q4, o modelo TIP31C. A escolha para estes transistores deve-se ao fato de ser necessário haver uma combinação de modelos NPN e PNP para a operação da ponte-H da maneira devida, além de que estes modelos resistem à corrente que é requerida pelo motor elétrico para realizar a rotação, com base nos casos discutidos anteriormente.

O módulo Eixo receberá o sinal elétrico que provém do botão ligado ao volante do carro e processará para enviar um sinal lógico à ponte-H. No motor elétrico foi posicionado um potenciômetro, conforme ilustra a Imagem 31, que retornará para o processador do Eixo um sinal elétrico que será interpretado como o ângulo atual dos aerofólios. O valor lido do potenciômetro foi calibrado para a situação desejada dos perfis de máximo *downforce* e mínimo arrasto.



*Imagem 31 - Posicionamento do potenciômetro em CAD*

*Fonte: Autor.*

A rotina implementada segue a seguinte lógica:

- O sistema recebe constantemente o valor lido do potenciômetro, que traduz diretamente no ângulo atual que o mecanismo se encontra;
- O piloto ao pressionar e manter pressionado o botão do volante, ativa o sistema, que faz com que o PIC processe o valor lido do potenciômetro;
  - Caso o valor seja menor ou igual ao limite inferior, o sistema libera o sinal lógico para o motor girar no sentido a abrir os aerofólios, e interrompe o sinal assim que o valor lido do potenciômetro atingir o valor máximo;
  - Caso o valor já esteja no máximo, o sistema mantém o motor na mesma posição;
- Ao soltar o botão do volante, o sistema realiza novamente o processamento do valor do potenciômetro;
  - Caso o valor seja igual o máximo, o sistema libera o sinal lógico para o motor girar no sentido contrário, fechando os aerofólios, até que o valor lido do potenciômetro seja igual ao mínimo;
- A todo momento, o sistema realiza a leitura dos botões para averiguar que estão fechados e manter o sistema fechado;

- Rotina de segurança: Caso o piloto tente pressionar o botão enquanto realiza uma curva com força lateral maior ou igual a 0.7G, o sistema não permite a abertura.
- Rotina de segurança 2: O PIC periodicamente monitora os valores lidos pelo potenciômetro, de modo que se o aerofólio se moveu da última posição escolhida, ocorre uma correção para a posição ideal.

O valor escolhido da força lateral foi calibrado de acordo com estudo de testes anteriores do carro e comparação com locais da pista. Em manobras tais como curvas de alta velocidade, lê-se um valor elevado, próximo de 2G. Em outras manobras menos agressivas, ainda assim obtém-se um valor acima de 1.0G. Dessa forma, optou-se por o valor de aceleração de 0.7G lateral, cobrindo todos os casos de uso de máximo *downforce* com uma margem de segurança expressiva.

## 4 TESTES, RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Considerações e testes iniciais

O plano de testes para o DRS seguiu a ideia de tentar validar todo o sistema em bancada, para colocá-lo em pista apenas quando houver um risco mínimo de chance de falha. Isto se deve ao fato do custo envolvido em alocar um tempo em um teste da equipe para realizar testes de novos projetos.

Decidiu-se que a asa traseira do protótipo E13 seria usada pois sua eficácia já fora comprovada anteriormente, no ano de 2015. Também se optou por utilizar um componente de um carro antigo da equipe por estratégia, com vista de minimizar os problemas que poderiam comprometer testes do protótipo que segue para a competição deste ano. A Imagem 32 mostra o mecanismo montado na asa traseira.



Imagem 32 - Mecanismo posicionado na asa traseira do protótipo E13

Fonte: Autor.

Os objetivos dos testes com o DRS são para validar o sistema funcionalmente: É necessário que ele não apresente problemas elétricos nem mecânicos durante o seu funcionamento e que sua eficiência seja suficientemente alta para que compense sua utilização nas competições.

Os primeiros testes ocorreram na oficina da Equipe, primeiramente o sistema elétrico e eletrônico, com a verificação do funcionamento do sistema de controle, da lógica aplicada a este e com a ativação do motor. Após isso, o mecanismo foi montado na asa e ligado ao sistema elétrico, para que um teste completo pudesse ocorrer.

Com o sucesso do teste anterior, o mecanismo foi montado no protótipo E14 para realizar um teste inicial na Universidade, na rua localizada próxima à entrada principal, de frente ao Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos. O objetivo deste primeiro teste com o carro foi averiguar o funcionamento correto do sistema e preparar para um teste em pista, este com maior grau de similaridade ao visto na competição oficial.

## 4.2 Testes em pista

A Equipe realiza seus testes de desempenho no kartódromo Adalberto Cattani, em Araraquara. A pista do kartódromo permite à Equipe simular uma situação semelhante à da competição, e assim retirar dados e treinar os pilotos de maneira apropriada.

A asa com o mecanismo foi montada no carro e o teste feito foi executar três voltas com o carro sem utilizar o mecanismo e outras três voltas utilizando o mecanismo. O veículo foi equipado com o *dashlogger* da ProTune Electronics, visto na Imagem 33, que permite salvar dados de velocidade e GPS.



Imagem 33 - Dashlogger ProTune Electronics

Fonte: Website Dacar Motorsport.

A Imagem 34 mostra uma parte do *log* gerado pelo dispositivo no teste, demonstrando a diferença entre os picos de velocidade: 79 km/h utilizando o DRS contra 70 km/h sem utilizar o dispositivo, o primeiro em azul e o segundo em laranja no gráfico. Na mesma imagem é possível ver um trecho de saída de curva na qual a aceleração do carro com o DRS ativado é superior ao carro sem DRS, demonstrando a influência em retomadas que esse sistema possui.

Já a Imagem 35 mostra o *log* completo das três voltas sobrepostas em função do tempo. Esta disposição permite visualizar a diferença ao longo do tempo que o DRS fornece, observando, por exemplo, a diferença de tempo existente entre picos de velocidade, que representam o final da reta principal da pista. Assim, ao final das três voltas, soma-se um total de 4,5 segundos de diferença. Expandindo-se para a situação de um enduro, tem-se um total de aproximadamente 30 segundos de vantagem, aumentando ainda mais a diferença de pontuação.

Da mesma maneira, realizou-se uma volta de *autocross* para averiguar a diferença que o uso do DRS aplica em uma prova apenas. A Imagem 36 representa os *logs* desta volta de *autocross* com e sem DRS, gráfico azul e laranja, respectivamente. Estas voltas tiveram uma diferença total de 2,5 segundos, diferença esta expressiva, e ao se olhar por exemplo os tempos da competição de 2015 da competição de Formula Student Germany, representados na Tabela 5, vê-se que estes segundos diferenciam o primeiro do quarto lugar, nesta competição representando quase 20 pontos de diferença.

*Tabela 5 - Tempos de autocross, colocação e pontuação na competição de 2015 do Formula Student Germany*

Equipe	Tempo	Colocação	Pontuação
Corvalis OSU	67,224	1º	100
München TU	67,561	2º	97,62
Stuttgart U	68,704	3º	89,71
Hamburg UAS	69,901	4º	81,71
Graz TU	70,582	5º	77,28
Karlsruhe KIT	70,952	6º	74,91

Ao comparar-se com resultados de simulação feitos anteriormente, nota-se uma disparidade bem alta entre os valores de redução de tempo de volta. O grande fator que determina essa diferença são os pilotos da Equipe. Devido ao fato de ser um sistema novo introduzido no carro, que causa grandes mudanças na maneira de pilotar, e ao fato de que os pilotos da Equipe são amadores, os tempos da volta referência, sem utilizar o DRS, podem variar muito ou estar longe de serem uma volta ideal.

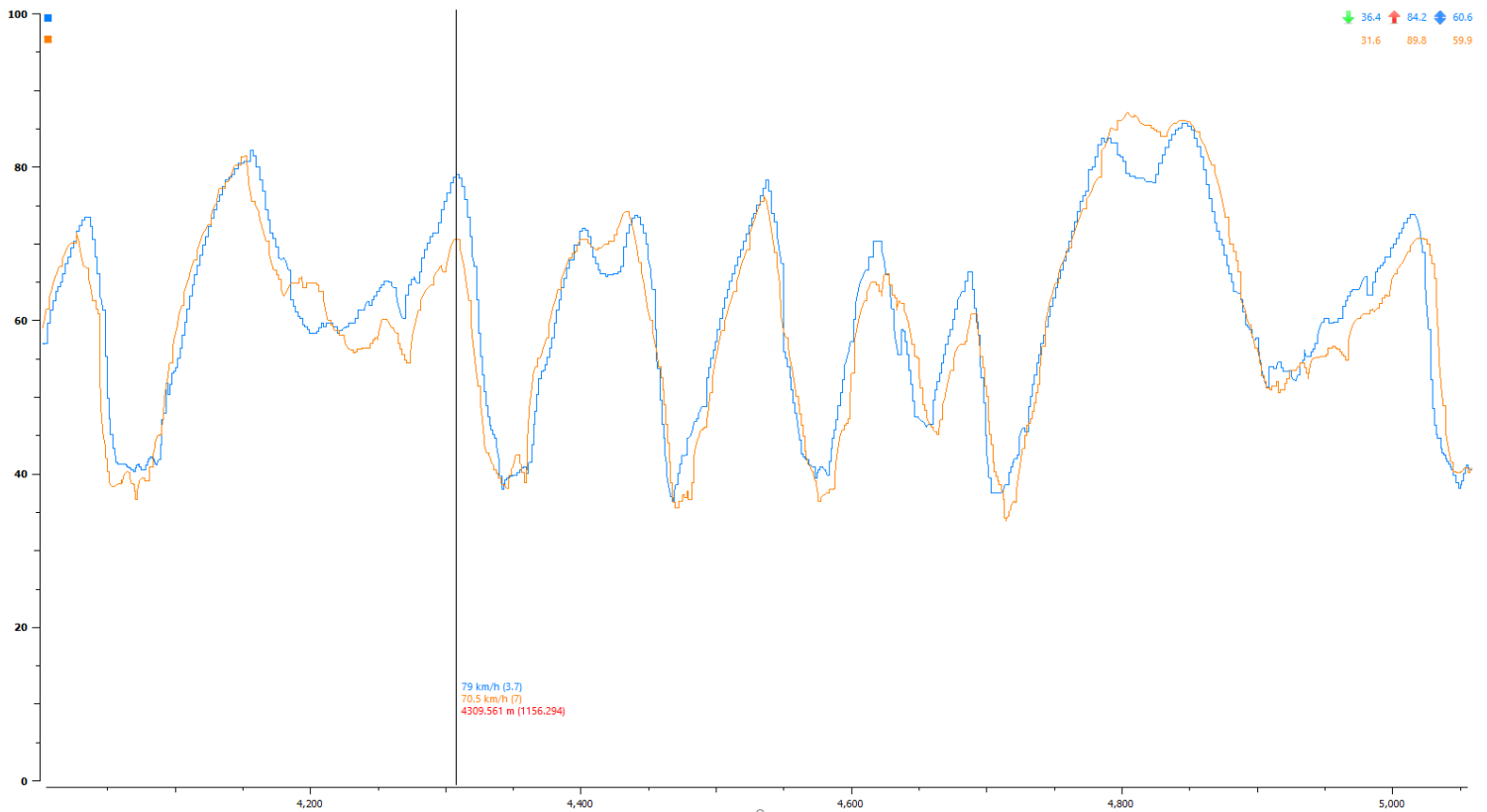


Imagem 34 - Trecho do log de voltas de enduro com e sem DRS em relação ao espaço

Fonte: Autor.

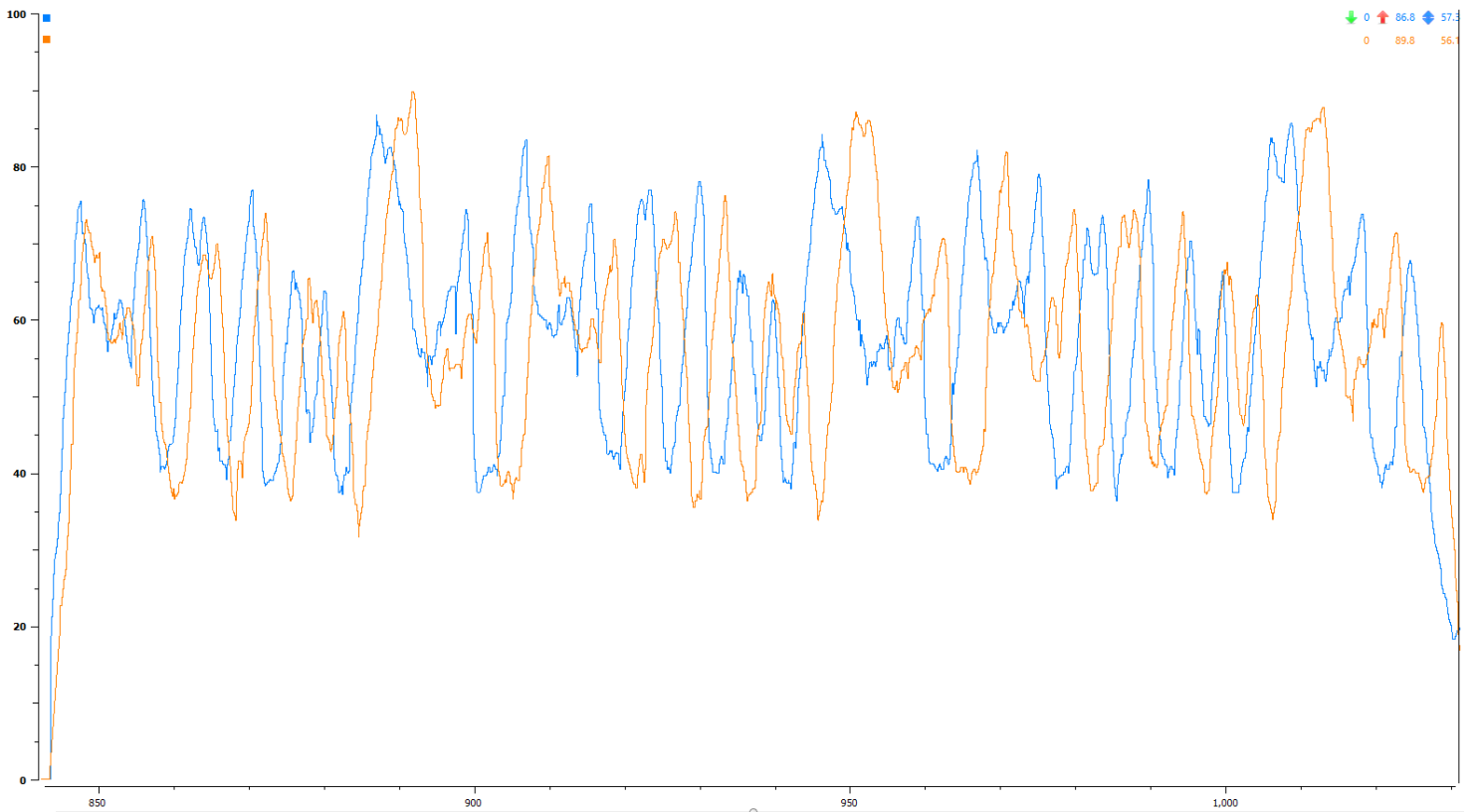


Imagem 35 - Log completo das três voltas em relação ao tempo

Fonte: Autor.

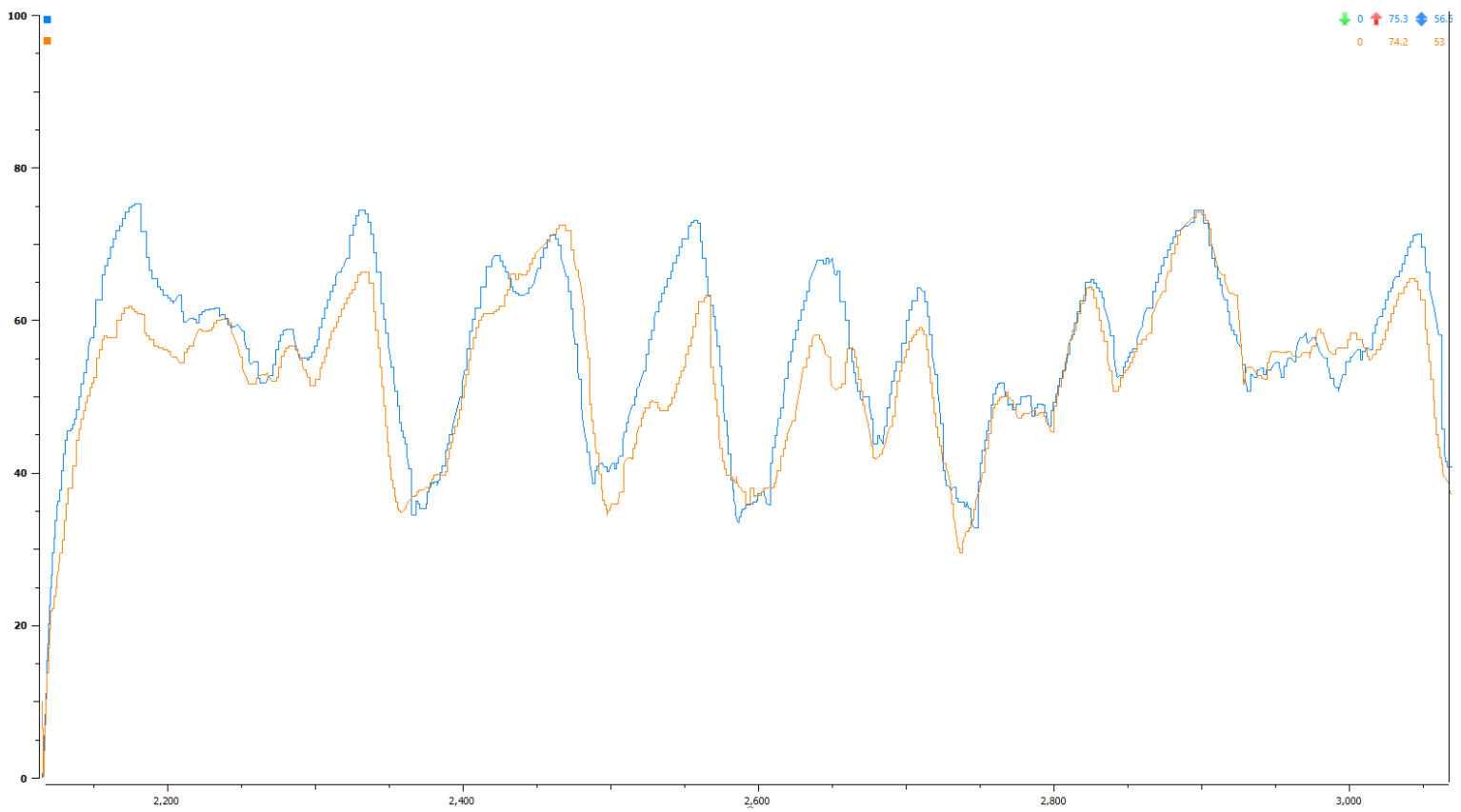


Imagem 36 - Comparativo de volta de autocross com e sem DRS em relação ao espaço

Fonte: Autor.

## 5 CONCLUSÕES

O desenvolvimento de um sistema de redução de arrastos confere à um protótipo de Fórmula SAE resultados significativos com relação ao desempenho do carro. Isto se deve ao fato de o arrasto do ar atuar de maneira significativa nos dispositivos aerodinâmicos em altas velocidades. Aliado ao fato de que o veículo não precisa da *downforce* atuando em retas, surge a oportunidade ideal para reduzir o arrasto e assim aumentar a aceleração do Formula.

O dispositivo reduz o tempo de volta do protótipo em valores que giram em torno de 1 segundo em simulações e de 2 segundos na realidade. Esta diferença extrapolada significa uma redução de 5% no tempo de volta. A diferença acontece principalmente pela pista utilizada na simulação não ser a mesma que a Equipe utiliza para testar.

Apesar de à primeira vista o tempo reduzido parecer pouco, quando este tempo é traduzido em pontos na competição e estes pontos adicionados, o resultado final pode ser o de uma mudança de colocação final de 6º para 2º lugar ou de 2º lugar para 1º lugar.

Assim, o uso do DRS se mostra eficiente: O sistema desenvolvido possui baixa complexidade mecânica e facilidade de montagem e manufatura, aliado ao baixo custo final.

Com a mudança da regra da competição, e com isso as limitações do projeto da aerodinâmica, eventualmente os dispositivos aerodinâmicos irão ser alterados para estar conforme estas novas regras, e este dispositivos, da maneira como foi projetado, será facilmente adaptado para a nova situação.

### 5.1 *Trabalhos futuros*

Devido ao fato de o projeto necessitar do protótipo da Equipe para realizar maiores testes e averiguações, partes do projeto foram simplificadas para diminuir a quantidade de testes necessária para validação. Isto se deve principalmente ao fato de a competição de 2016 de Fórmula SAE ocorrer após a entrega deste trabalho, e com isso o foco da Equipe fica em testar e validar o protótipo. Após a competição, podem ser feitos testes

mais extensos para averiguar a durabilidade do mecanismo. Além disso, algumas melhorias podem ser aplicadas de modo a melhorar a efetividade do projeto:

- Escolha de um motor menor, mais leve e que confira a mesma força necessária e consuma menos corrente;
- Mudança da localização do motor do *mainplane* para dentro dos *endplates*, diminuindo assim a quantidade de componentes necessário para o mecanismo operar;
- Remover o mecanismo da localização central da asa e deslocá-lo para a lateral externa dos *endplates*, reduzindo o tamanho necessário e simplificando os componentes que o compõe;
- Desenvolver uma rotina de acionamento automático caso o piloto, por exemplo, esqueça de acionar o dispositivo em retas;
- Desenvolver uma rotina de aprendizado de máquina na qual a própria eletrônica embarcada ficará responsável por acionar o DRS nos melhores momentos da pista.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALLÉN-DAZA, D.; Implementação de um pacote aerodinâmico em um veículo de Fórmula SAE. 138p. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2015.

BOYLESTAD, R.; NASHESKY, L.; Electronic Devices and Circuit Theory, **Pearson Prentice Hall**, 5<sup>th</sup> edition, 2007.

FORMULA STUDENT GERMANY. Results FSC 2015. Disponível em <<https://www.formulastudent.de/fsc/2015/results/>>. Acesso em 01 de nov. de 2016.

FORMULA STUDENT GERMANY. Results FSC 2016. Disponível em <<https://www.formulastudent.de/fsc/2016/results/>>. Acesso em 28 de jul. de 2016.

GILLESPIE, T.; Fundamentals of Vehicle Dynamics, **Society of Automotive Engineers International**, 1992.

KATZ, J.; Race Car Aerodynamics. Designing for Speed, **Bentley Publishers**, 1995.

MILLIKEN, DOUGLAS L.; WILLIAM F.; Race Car Vehicle Dynamics, **Society of Automotive Engineers International**, 2003.

NORTON, R.; Design of Machinery: An introduction to the synthesis and analysis of mechanisms and machines, **Mc-Graw-Hill**, 2<sup>nd</sup> edition, 1999.

SAE BRASIL. Resultados Fórmula SAE Brasil 2015. Disponível em <[http://www.saebrasil.org.br/eventos/programas\\_estudantis/formula2015/Resultado.aspx](http://www.saebrasil.org.br/eventos/programas_estudantis/formula2015/Resultado.aspx)>. Acesso em 01 de nov. de 2016.

SEDRA, A.; SMITH, K.; Microelectronic Circuits, **Oxford University Press**, 5<sup>th</sup> edition, 2004