

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

GABRIEL ARI VALLE

PROJETO E ANÁLISE DO TBI PARA O VEÍCULO PROTÓTIPO SHELL
ECO-MARATHON DE COMBUSTÃO INTERNA

Joinville
2023

GABRIEL ARI VALLE

PROJETO E ANÁLISE DO TBI PARA O VEÍCULO PROTÓTIPO SHELL
ECO-MARATHON DE COMBUSTÃO INTERNA

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Automotiva do Centro Tecnológico de Joinville
da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Evandro Cardozo da Silva

Joinville
2023

GABRIEL ARI VALLE

PROJETO E ANÁLISE DO TBI PARA O VEÍCULO PROTÓTIPO SHELL
ECO-MARATHON DE COMBUSTÃO INTERNA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 30 de junho de 2023.

Banca Examinadora:

Orientador: Dr. Evandro Cardozo da Silva
Orientador
Presidente

Prof. Dr. Andrea Piga Carboni
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Modesto Hurtado Ferrer
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a todos que possam se beneficiar dele.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Ari e Janeti, por acreditarem em mim, me apoiarem e investirem nos meus estudos, além do carinho ao longo dos anos. Também agradeço aos meus irmãos, Gustavo e Guilherme, por estarem sempre ao meu lado, contribuindo para o meu crescimento pessoal e profissional. Vocês tornam os dias melhores.

Agradeço à minha companheira Vitória, por sempre acreditar em mim, não me deixar desistir e me dar forças para demonstrar do que sou capaz.

Aos membros e amigos do EFICEM pelas horas trabalhando juntos, especialmente ao Natan Vital e Johann August, amigos de jornada na faculdade, e ao Flavio Bruni que auxiliou nas medições.

Aos amigos do Mirabolantes, especialmente, Gabriel Borges, Bruno Assis, Bruno Serpa, Heitor Zimmermann e Vinicius Hunzicker por todos os momentos especiais e as risadas durante o curso.

Agradecimento especial aos All Stars, Giovanni Ormeneze, Daniel Rotter e principalmente ao Gianluca Valle, que compartilhou o mesmo teto comigo por anos, por todas as noites de estudo, aulas e parceria durante a faculdade.

Por último e não menos importante, ao meu professor orientador Dr. Evandro Cardozo da Silva pela orientação e todo auxílio necessário à conclusão deste trabalho. E à todos os professores, tanto da Universidade Federal de Santa Catarina quanto aos das escolas por onde passei, que de alguma forma contribuíram para minha formação e a realização deste trabalho com os seus ensinamentos.

"Inteligência é a capacidade de se adaptar
à mudança."

Stephen Hawking.

RESUMO

O duto de admissão desempenha um papel significativo no funcionamento de um motor de ciclo Otto. Este trabalho aborda as considerações feitas para a modelagem de um corpo de borboleta em um protótipo destinado à competição Shell Eco-Marathon. O objetivo é compreender os fenômenos que ocorrem nos dutos de admissão e seu impacto na eficiência volumétrica do motor em funcionamento, a fim de projetar, modelar e analisar o corpo de borboleta de forma adequada. Para este fim, foi utilizado um motor de combustão interna de um cilindro, de 43 cc, utilizado pela equipe EFICEM/CTJ/UFSC na Shell Eco-Marathon. A partir do entendimento do fenômeno conhecido como "tubo de órgão", das restrições impostas pelo regulamento da competição e os requisitos específicos da equipe, foi projetado um TBI para uso do protótipo à combustão de gasolina da equipe EFICEM na Shell Eco-Marathon Brasil. Com auxílio do software SOLIDWORKS™ foram modeladas todas as peças necessárias para a montagem do corpo de borboleta e a análise do escoamento, chegando no projeto final do corpo de borboleta para a equipe. Assim, com o modelo finalizado, a simulação do fluxo para diferentes graus de abertura da borboleta pode ser realizado, e desse modo, compreender como o fluido se comporta ao passar pelo duto interno do TBI e a influência da borboleta tambor no escoamento.

Palavras-chave: TBI. Modelagem. Eficiência Volumétrica. Motor Automotivo. Simulação Numérica.

ABSTRACT

The intake system plays a significant role in the operation of an Otto cycle engine. This work approaches the considerations made for the modeling of a intake throttle body in a prototype destined to the Shell Eco-Marathon competition. The objective is to understand the phenomena that occur in the intake system and their impact on the volumetric efficiency of the engine in operation, in order to properly design, model and analyze the throttle body. For this purpose was used a single-cylinder internal combustion engine, with 43 cc, used by the EFICEM/CTJ/UFSC team in the Shell Eco-Marathon. From the understanding of the phenomenon known as "organ tube", the restrictions imposed by the competition regulations and the specific requirements of the team, a TBI was designed for use in the gasoline combustion prototype of the EFICEM team in the Shell Eco-Marathon Brazil. With the help of the SOLIDWORKS™ software, all the parts necessary for the assembly of the throttle body and the analysis of the flow were modeled, arriving at the final design of the throttle body for the team. Thus, with the finished model, the simulation of the flow for different degrees of butterfly opening can be carried out, and in this way, understand how the fluid behaves when passing through the internal duct of the TBI and the influence of the drum butterfly on the flow.

Keywords: TBI. Modeling. Volumetric Efficiency. Automotive Engine. Numerical Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Seção transversal de um cilindro de um motor de quatro tempos.	16
Figura 2 – Ciclo de operação em quatro tempos.	17
Figura 3 – Componentes do sistema de admissão de um motor ciclo Otto.	18
Figura 4 – escoamento na região de entrada de um tubo.	19
Figura 5 – Trajetórias de partículas em escoamentos laminar e turbulento.	20
Figura 6 – Modelos geométricos diferentes dependendo do propósito da análise.	21
Figura 7 – Análise de tensão para macaco automotivo construído com diferentes materiais.	22
Figura 8 – Construção do modelo de elementos finitos.	23
Figura 9 – Linhas aerodinâmicas sobre um navio Destroyer Type 45 da Marinha Real realizado por simulação CFD.	24
Figura 10 – Protótipos na pista da Shell Eco-Marathon Brasil 2019.	25
Figura 11 – Motor Makita EM4350UH original de fábrica.	26
Figura 12 – Ondas de pressão em um tubo com uma de suas extremidades aberta.	29
Figura 13 – Onda de pressão ao longo do conduto de admissão.	29
Figura 14 – Bico injetor Honda Biz.	31
Figura 15 – Suporte bico injetor Honda Biz.	31
Figura 16 – Sensor de Posição da Borboleta (TPS) utilizado pela equipe.	32
Figura 17 – Conector pneumático para encaixe do sensor de temperatura e pressão do ar utilizado pela equipe.	33
Figura 18 – Modelo do duto inicial.	34
Figura 19 – Modelo da flange de fixação do corpo ao motor.	35
Figura 20 – Fixação do bico injetor e ressalto para sensor de temperatura e pressão modelados no SOLIDWORKS™.	36
Figura 21 – Eixo da borboleta do tipo tambor modelado no SOLIDWORKS™.	36
Figura 22 – Bloco para fixação do sensor de posição e passagem do eixo da borboleta.	37
Figura 23 – Corpo de borboleta modelado com todos os requisitos.	38
Figura 24 – Bico injetor utilizado modelado em SOLIDWORKS™.	39
Figura 25 – Modelo da placa de fixação da borboleta.	39
Figura 26 – Montagem dos componentes modelados no CAD SOLIDWORKS™.	40
Figura 27 – Modelo preparado para análise.	41
Figura 28 – Parâmetros de entrada do duto.	42
Figura 29 – Parâmetros de entrada do bico injetor.	42
Figura 30 – Parâmetros de entrada na saída do modelo.	43

Figura 31 – Distribuição de velocidade (m/s) para 0° de abertura de borboleta. .	43
Figura 32 – Distribuição de velocidade (m/s) para 45° de abertura de borboleta.	44
Figura 33 – Distribuição de velocidade (m/s) para 90° de abertura de borboleta.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações técnicas do motor Makita EM4350UH.	27
Tabela 2 – Valores utilizados e resultado para o comprimento do corpo de borboleta.	34

LISTA DE SÍMBOLOS

TBI	Throttle Body Injection
PMS	Ponto morto superior
PMI	Ponto morto inferior
V_t	Volume total
V_d	Volume deslocado
V_c	Volume morto
D	Diâmetro
c	Velocidade do ar
N	Rotação do motor
θ_t	Deslocamento angular do virabrequim
L	Comprimento total
L_{int}	Comprimento do duto interno ao cabeçote

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo	14
1.1.1	Objetivo Geral	14
1.1.2	Objetivos Específicos	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Componentes do Motor	16
2.2	Funcionamento do motor	17
2.3	Sistema de admissão	18
2.3.1	Corpo de borboleta (TBI)	18
2.4	Escoamento Interno	19
2.4.1	Escoamentos Laminar e Turbulento	19
2.5	Modelagem e Simulação	20
2.5.1	Desenho Auxiliado por Computador	20
2.5.2	Engenharia Auxiliada por Computador	21
2.5.2.1	Análise de Elementos Finitos	22
2.5.2.2	Dinâmica dos Fluidos Computacional	23
2.5.3	SOLIDWORKS™	24
2.6	Shell Eco-Marathon	25
2.6.1	TBI na Competição	25
3	METODOLOGIA	26
3.1	Definição do motor	26
3.2	Restrições de projeto	27
3.3	Requisitos do projeto	27
3.4	Abordagem experimental	28
3.5	Descrição do Modelo	28
3.5.1	Comprimento e Diâmetro	28
3.5.2	Bico Injetor	31
3.5.3	Borboleta	32
3.5.4	Sensor de temperatura e pressão do ar	32
3.6	Modelagem 3D	33
3.6.1	Corpo de Borboleta	33
3.6.2	Eixo da borboleta	36
3.6.3	Peças Auxiliares	38
3.6.4	Montagem	40

4	ANÁLISE DE DADOS	41
4.1	Análise do escoamento	41
5	CONCLUSÕES	46
	REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

Uma das principais preocupações da indústria automotiva é a emissão de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono proveniente da queima do combustível no interior do motor. Apesar da grande quantidade de recursos investidos em novas fontes, os combustíveis fósseis continuarão a satisfazer a maioria das necessidades do mundo, contribuindo com mais de 80% para o potencial energético nos próximos vinte anos (PIVA, 2010).

Com o aumento da demanda por automóveis que possuem uma melhor eficiência energética, são necessários estudos com o objetivo de entender como aumentar a eficiência energética proveniente da transformação da energia química em mecânica, diminuindo, desse modo, o consumo dos veículos, gerando um impacto ambiental positivo.

Considerando estes riscos ambientais, a empresa Shell, criou uma competição chamada Shell Eco-Marathon, desafiando os estudantes a desenvolverem veículos para que atinjam a maior eficiência energética, seja ela elétrica ou proveniente de combustíveis fósseis. A equipe de eficiência energética EFICEM, da Universidade Federal de Santa Catarina - Campus de Joinville, participa desta competição com dois protótipos, um movido à gasolina e outro elétrico.

Com objetivo de melhorar a eficiência do protótipo à gasolina, neste trabalho, será apresentado as etapas de desenvolvimento de um corpo de borboleta, peça fundamental no funcionamento de um motor com injeção direta à gasolina. Utilizando o software SolidWorks™ para modelagem do corpo e o estudo de alguns parâmetros que influenciam diretamente na admissão do motor, pretende-se analisar o escoamento dentro da TBI (Throttle Body Injection) e como o fluxo se comporta no duto.

1.1 OBJETIVO

Para desenvolver um corpo de borboleta com os requisitos e restrições necessários, propõe-se neste trabalho os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivo Geral

Mostrar os requisitos e restrições da equipe e da competição e modelar um corpo de borboleta para o motor do protótipo à combustão, e posteriormente simular e analisar como será o escoamento pelo modelo desenvolvido.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Apresentar os parâmetros de influência na admissão;
- Apresentar os requisitos e restrições de modelagem;
- Desenvolver o modelo do corpo de borboleta;
- Compreender o escoamento interno do ar no corpo de borboleta;
- Propor alterações para desenvolvimento de trabalhos futuros.

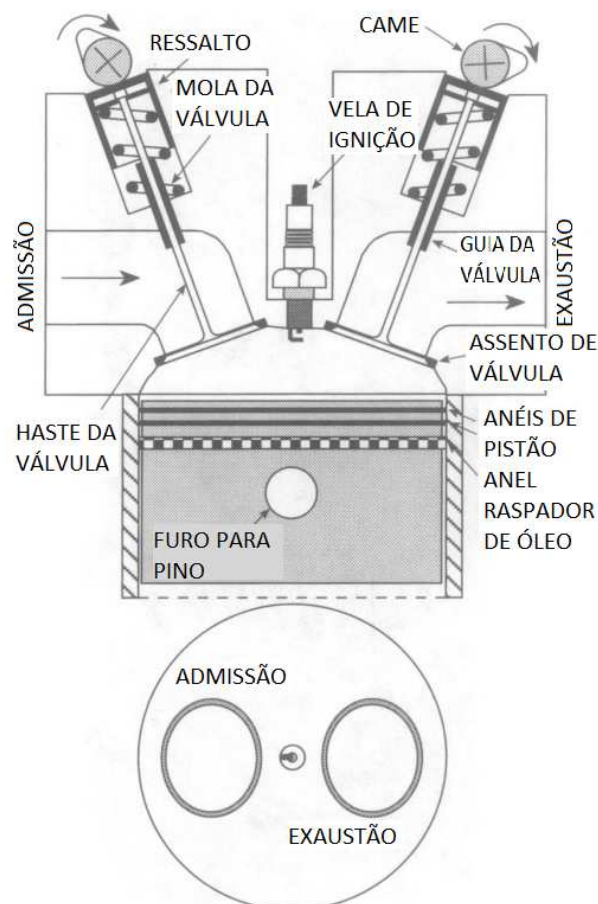
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esse capítulo apresenta os tópicos básicos necessários para entendimento do funcionamento do motor a gasolina, seus componentes e variações, identificando também os itens encontrados em um corpo de borboleta.

2.1 COMPONENTES DO MOTOR

Para compreender o funcionamento do sistema de propulsão é preciso distinguir seus componentes. Os principais para a operação são: o injetor que faz a injeção da mistura; a câmara de combustão onde ocorre a ignição; os dutos de admissão e exaustão que levam os gases para dentro e fora da câmara; o pistão que faz a compressão da mistura; e o virabrequim que transforma o movimento linear em rotativo. A Figura 1 representa de forma simplificada o diagrama dos elementos citados.

Figura 1 – Seção transversal de um cilindro de um motor de quatro tempos.

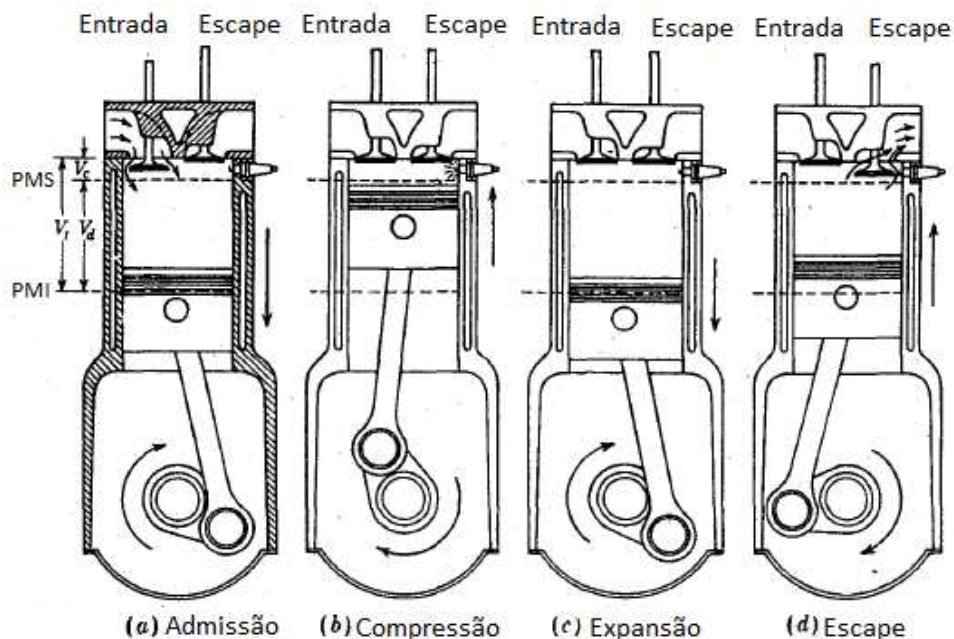


Fonte: Adaptado de Blair (1999, p. 3).

2.2 FUNCIONAMENTO DO MOTOR

Segundo Martins (2006), o motor de combustão interna aproveita o aumento de pressão resultante da combustão da mistura ar-combustível para imprimir um movimento de rotação ao virabrequim. O motor é constituído por cilindros, dentro dos quais deslizam pistões ligados ao virabrequim pelas bielas com objetivo de transformar a energia química presente no combustível em energia mecânica. Esta transformação se deve aos quatro tempos de funcionamento: admissão, compressão, expansão e exaustão (Figura 2).

Figura 2 – Ciclo de operação em quatro tempos.



Fonte: Adaptado de Heywood (1988, p. 10).

Seguindo a ordem da Figura 2, o autor Martins (2006) explica os quatro tempos do motor a combustão interna por faísca, de ciclo Otto:

- Admissão: o pistão efetua um curso descendente com a válvula de admissão aberta, provocando uma depressão no interior do cilindro. Dessa forma se dá o enchimento do cilindro, com o pistão movimentando-se do Ponto Morto Superior (PMS) ao Ponto Morto Inferior (PMI).
- Compressão: com as válvulas de admissão e exaustão fechadas, o pistão sobe do PMI ao PMS, comprimindo os gases que foram admitidos durante a admissão. Esta compressão vai elevar a temperatura e a turbulência da mistura, causando a vaporização da gasolina líquida restante e a homogeneização da mistura. A temperatura no fim na compressão não deve ultrapassar a temperatura de auto-ignição da mistura.
- Expansão: no momento em que o pistão chega ao final do curso da compressão

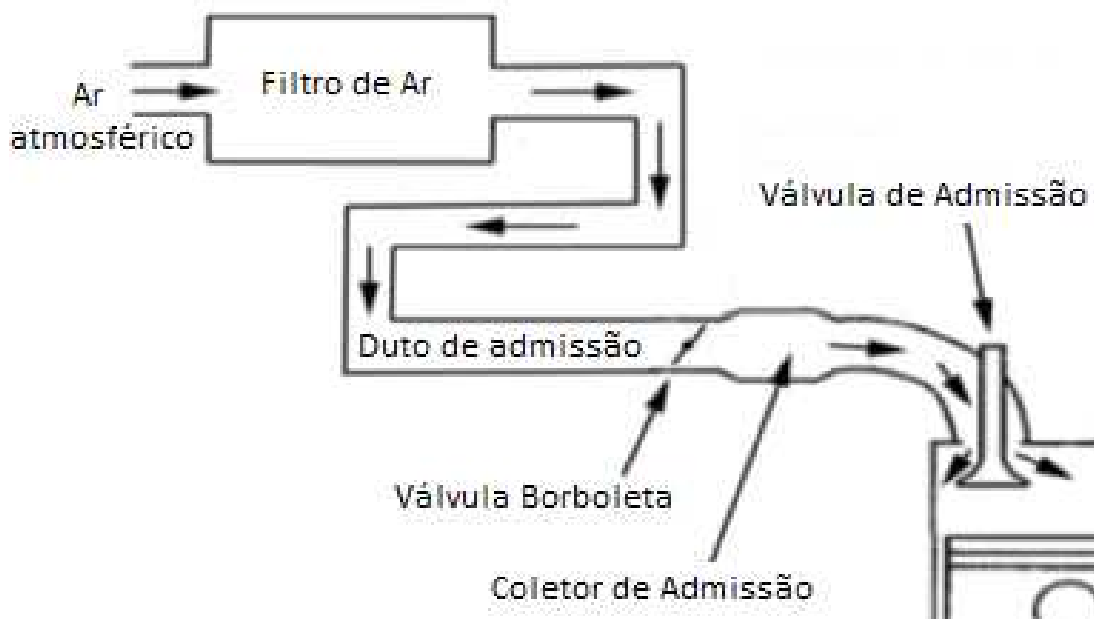
(PMS), uma faísca elétrica é gerada entre os eletrodos da vela. A mistura, já comprimida e aquecida, explode rapidamente gerando uma pressão muito elevada, ocasionando o movimento do pistão de forma violenta até o PMI.

- d. Escape: a válvula de escape se abre e os gases queimados escoam para fora do cilindro em grande velocidade. O pistão ao retornar ao PMS limpa o interior do cilindro, sendo a válvula de escape fechada quando atinge o topo.

2.3 SISTEMA DE ADMISSÃO

O sistema de admissão dos motores à combustão interna possuem como funções principais determinar a massa total de ar admitido e facilitar a homogeneização da mistura ar-combustível, resultando no enchimento do volume dos cilindros. O sistema é composto basicamente pelo filtro de ar, duto de admissão, corpo de borboleta, coletor de admissão e válvula de admissão, como representado na Figura 3.

Figura 3 – Componentes do sistema de admissão de um motor ciclo Otto.



Fonte: Adaptado de Dias (2015, p. 19).

2.3.1 Corpo de borboleta (TBI)

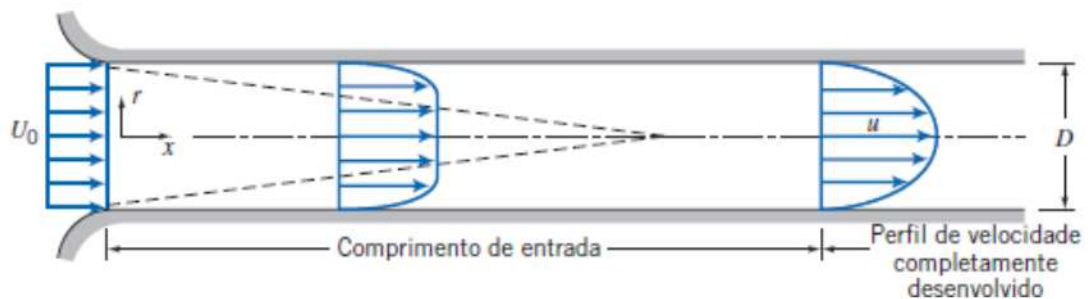
O corpo de borboleta (também conhecido como TBI - Throttle Body Injection) é responsável por levar o ar do filtro até os coletores de admissão do motor. Esta peça possui em seu interior uma restrição à passagem do fluxo, comumente chamada de borboleta. A borboleta pode rodar em seu próprio eixo de modo que aumente ou

diminua a seção de passagem do ar, ocasionando em uma quantidade maior ou menor da mistura ar-combustível que entra na câmara de combustão.

2.4 ESCOAMENTO INTERNO

Segundo Fox, Pritchard e McDonald (2010) os escoamentos completamente limitados por superfícies sólidas são denominados escoamento internos e podem ser laminares ou turbulentos. Desse modo, os escoamentos internos incluem escoamento em tubos, dutos, bocais, difusores, contrações e expansões súbitas, válvulas e acessórios. A Figura 4 apresenta o que acontece com o perfil de velocidade do escoamento ao entrar em um tubo.

Figura 4 – Escoamento na região de entrada de um tubo.



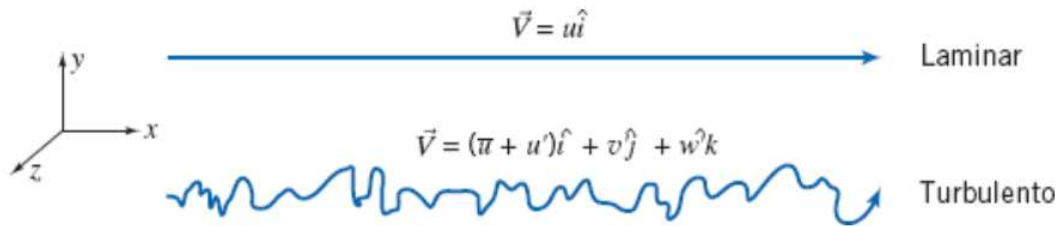
Fonte: Fox, Pritchard e McDonald (2010, p. 289).

Na Figura 4, devido à condição de não deslizamento, a velocidade na parede do tubo é igual a zero em toda a sua extensão. A presença da superfície sólida provoca uma força de cisalhamento que retarda o fluxo, resultando em uma redução da velocidade do fluido na parede do sólido. Quanto mais para dentro do duto, mais o efeito é sentido (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2010).

2.4.1 Escoamentos Laminar e Turbulento

Um escoamento laminar é aquele em que as partículas fluidas movem-se em camadas lisas, ou lâminas; um escoamento turbulento é aquele em que as partículas fluidas rapidamente se misturam enquanto se movimentam ao longo do escoamento devido a flutuações aleatórias no campo tridimensional de velocidades (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2010). Ao abrir uma torneira com uma vazão muito pequena, a água escoará para fora de forma suave, em um escoamento laminar, porém, ao se aumentar a vazão, a água sairá de forma agitada, em um movimento caótico, caracterizando um escoamento turbulento. A Figura 5 exemplifica a trajetória de uma partícula em um escoamento unidimensional, laminar e turbulento.

Figura 5 – Trajetórias de partículas em escoamentos laminar e turbulento.



Fonte: Fox, Pritchard e McDonald (2010, p. 38).

A turbulência em escoamentos em dutos é quase sempre indesejável pois possui uma maior resistência ao escoamento. Porém, há casos onde o escoamento turbulento é desejável, como por exemplo no escoamento do sangue através de vasos sanguíneos, pois o movimento aleatório das partículas favorece a troca de oxigênio e outros nutrientes das células de sangue com as paredes dos vasos (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2010).

2.5 MODELAGEM E SIMULAÇÃO

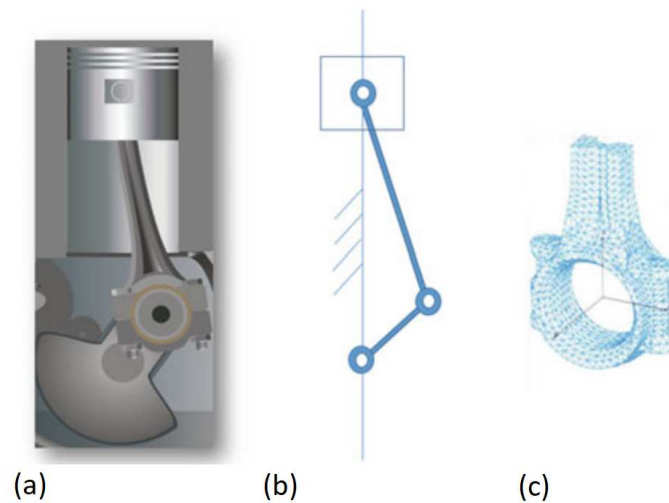
No âmbito da engenharia, é de suma importância o entendimento e uso de softwares que auxiliam o desenvolvimento e simulação de peças, suas aplicações e modos de manufatura.

2.5.1 Desenho Auxiliado por Computador

O CAD, do inglês Computer Aided Design (Desenho Auxiliado por Computador), é uma tecnologia utilizada por projetistas a fim de substituir o desenho manual com o auxílio de um software em um computador. Segundo Um (2018), CAD é definido como a criação e manipulação de imagens em um computador para auxiliar os engenheiros no projeto. Dessa forma o processo de desenho é facilitado, além de ser melhor representado pelas tecnologias computadorizadas 2D e 3D, aumentando a qualidade do projeto.

De acordo com Um (2018), dependendo do propósito da validação do projeto, a mesma estrutura pode ser representada em diferentes modelos geométricos. Por exemplo na Figura 6, o projeto básico da biela é representado por dois modelos geométricos diferentes. A representação da Figura 6b é um modelo cinemático simplificado para análise estática ou dinâmica, enquanto a Figura 6c é um modelo para FEM - Finite Element Method (Método de Elementos Finitos), para análise de tensão e deformação.

Figura 6 – Modelos geométricos diferentes dependendo do propósito da análise.



Fonte: Adaptado de Um (2018, p. 3).

2.5.2 Engenharia Auxiliada por Computador

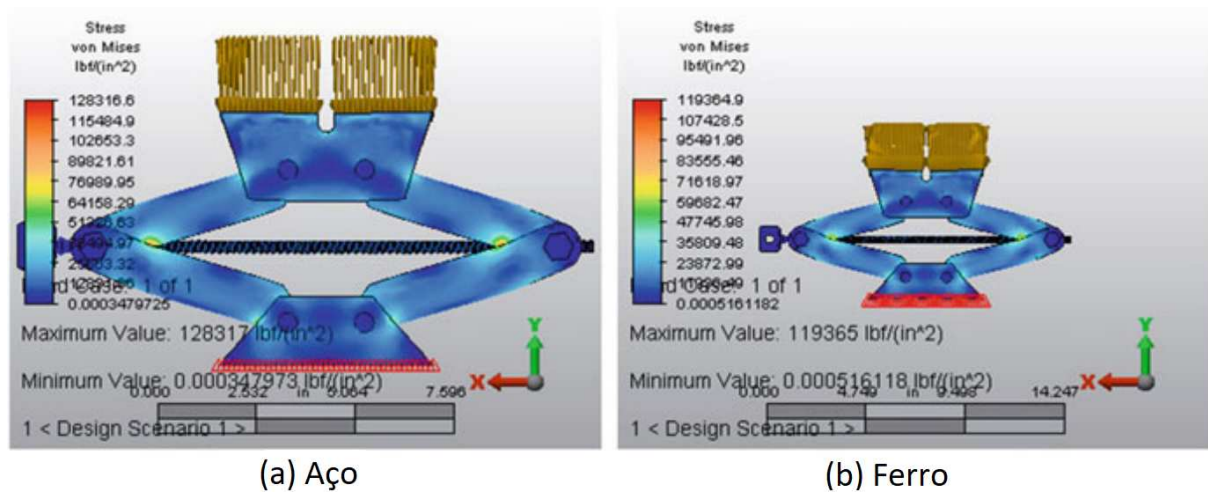
O CAE, do inglês Computer Aided Engineering (Engenharia Auxiliada por Computador), é um termo utilizado para descrever o uso do computador para simular o desempenho real do produto, a fim de melhorar o projeto ou auxiliar na resolução de problemas de engenharia, incluindo simulação, validação e otimização de produtos, processos e ferramentas de fabricação.

Segundo Um (2018), convencionalmente o CAE é realizado separadamente da fase de projeto com ajuda de profissionais de análise. Graças aos avanços realizados na tecnologia CAE, ambos agora são fundidos em um sistema integrado para um ciclo de projeto mais rápido e com mais alternativas de avaliação; assim é possível introduzir o produto no mercado mais cedo e com uma maior satisfação dos clientes.

Um tipo de análise que pode ser feita com a utilização do CAE, é a comparação de tensão gerada sobre uma peça construída com diferentes materiais quando submetida à uma força.

A análise feita na Figura 7 é para comparação da força sobre o macaco automotivo construído com aço e ferro. O foco do estudo é a comparação dos valores de tensão, deformação e deslocamento. Como resultado da análise, o macaco automotivo feito de aço (Figura 7a), demonstra menos deformação comparado ao construído em ferro (7b) (UM, 2018).

Figura 7 – Análise de tensão para macaco automotivo construído com diferentes materiais.



Fonte: Adaptado de Um (2018, p. 15).

2.5.2.1 Análise de Elementos Finitos

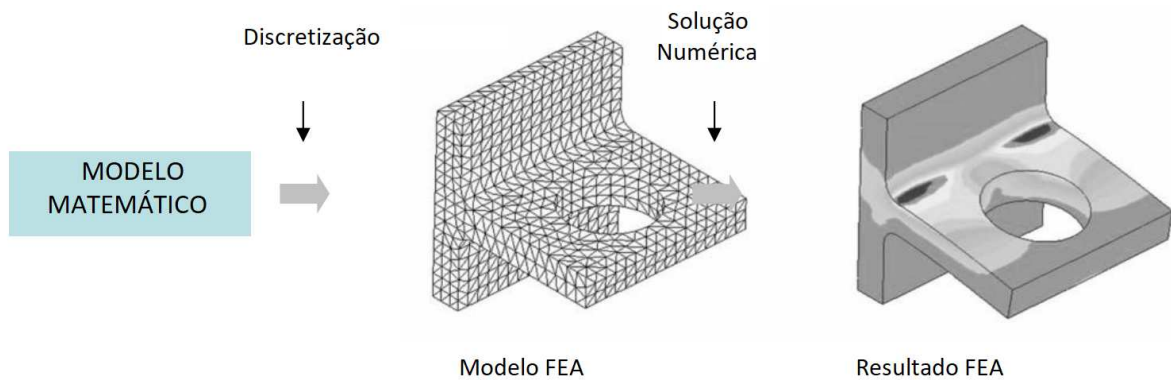
O FEA, do inglês Finite Element Analysis (Análise de Elementos Finitos), é amplamente utilizado em simulações computacionais para realizar previsões, analisando se as características definidas para um produto são coerentes com suas aplicações. A utilização do FEA, economiza tempo e recursos financeiros, dando maior viabilidade no desenvolvimento de projetos.

Segundo Kurowski (2015), FEA é utilizado para solucionar problemas em várias áreas da engenharia, como projeto de máquinas, acústica, eletromagnetismo, mecânica dos solos, dinâmica dos fluidos, e várias outras. Em termos matemáticos, FEA é uma técnica numérica utilizada para resolver problemas de campo que podem ser descritos por um conjunto de equações diferenciais parciais.

Essa abordagem permite a simulação de condições de carga, deformação, tensão e resposta estrutural em diferentes cenários. Ao realizar a análise de elementos finitos, é possível obter informações precisas sobre o desempenho estrutural, identificar pontos de alta tensão ou deformação excessiva, otimizar o projeto e avaliar a segurança e confiabilidade de uma estrutura.

A análise de elementos finitos é realizada por softwares como o SolidWorks™. No programa, o sólido em análise é dividido em "finitas" partes menores conhecidas, como triângulos, facilitando os cálculos para prever os comportamentos dos materiais sólidos em diferentes condições. De acordo com Kurowski (2015), muitas vezes, a etapa mais difícil da FEA é analisar os resultados. A interpretação adequada dos resultados requer que compreendamos todas as simplificações e os erros que elas introduzem, nas três primeiras etapas: definição do modelo matemático, malha e resolução. A Figura 8 demonstra as etapas para produzir os dados de interesse desejados.

Figura 8 – Construção do modelo de elementos finitos.



Fonte: Adaptado de Kurowski (2015, p. 17).

2.5.2.2 Dinâmica dos Fluidos Computacional

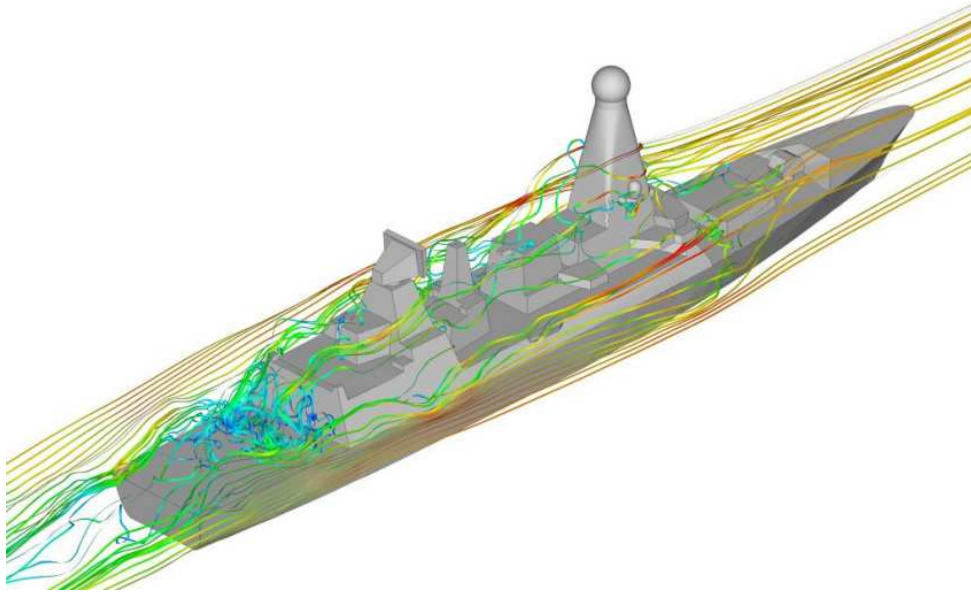
Uma outra área abrangida pelo CAE é a de CFD, do inglês Computational Fluid Dynamics (Dinâmica dos Fluidos Computacional), que trata da simulação numérica de escoamentos de fluidos, transferência de calor e fenômenos relacionados.

Segundo Date (2005), a dinâmica dos fluidos computacional preocupa-se com a solução numérica de equações diferenciais que regem o transporte de massa, momento e energia em fluidos em movimento.

Antes das ferramentas de CAE, a única maneira de um engenheiro otimizar o projeto, era realizar testes físicos nos protótipos do produto. Com o avanço da tecnologia, computadores e softwares, as ferramentas de CFD se tornaram fundamentais para simular as forças e o escoamento sobre o produto antes mesmo dele ser fabricado. Por meio de simulações computacionais, é possível obter informações valiosas sobre os padrões de fluxo, como zonas de separação, vórtices e áreas de alta ou baixa pressão. Através da análise das linhas de escoamento obtidas pela CFD, é possível tomar decisões embasadas em dados para melhorar a eficiência, reduzir arrasto, minimizar turbulência e maximizar o desempenho.

A Figura 9 apresenta a simulação realizada por um software de CFD sobre um navio Destroyer Type 45 atingido por um vento contrário.

Figura 9 – Linhas aerodinâmicas sobre um navio Destroyer Type 45 da Marinha Real realizado por simulação CFD.



Fonte: KÄÄRIÄ (2012, p. 3).

2.5.3 SOLIDWORKS™

De acordo com Howard e Musto (2022), a modelagem sólida se tornou uma ferramenta essencial para a maioria das empresas que projetam estruturas mecânicas e máquinas.

O SOLIDWORKS™ surgiu em 1995 como um programa de computação gráfica que permite a criação de objetos com modelagem 3D, tendo como principal objetivo atender os profissionais da área técnica. Com o auxílio do software, entre outras coisas, é possível:

- Criar esboços;
- Construir máquinas e observar seu funcionamento;
- Simular movimentos e observar possíveis falhas;
- Criar animações dos projetos;
- Renderizar os projetos de forma realista.

Segundo Lombard (2009), o SolidWorks é uma ferramenta de modelagem extremamente poderosa, muito provavelmente com a melhor combinação de potência e acessibilidade no mercado de CAD.

O SOLIDWORKS™ ainda disponibiliza outras ferramentas dentro do software para realização de diferentes análises. Por exemplo, o Flow Simulation consegue eliminar a complexidade da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) diretamente do ambiente CAD 3D do SOLIDWORKS™, permitindo que os engenheiros utilizem os dados de CFD para embasar suas decisões técnicas por meio de uma abordagem de engenharia (SKA, 2017).

2.6 SHELL ECO-MARATHON

A Shell Eco-Marathon, iniciada em 1939 dentro de um laboratório de pesquisas da Shell, é reconhecida como a maior competição de eficiência energética do mundo. Ela engloba três eventos principais: Shell Eco-Marathon das Américas, Europa e Ásia. Segundo Shell (2019), a competição é dividida em três categorias de energia: combustão interna, bateria elétrica e célula de combustível de hidrogênio, e também está dividida em três classes de veículos: Protótipo, UrbanConcept e o novo Autonomous UrbanConcept. O objetivo fundamental de todas as equipes na competição é projetar e construir um veículo capaz de percorrer a maior distância possível com o mínimo de energia. No entanto, as regras e dimensões variam dependendo da classe de veículo escolhida pela equipe participante. A Figura 10 ilustra os protótipos na pista da competição da Shell Eco-Marathon Brasil de 2019, realizada no Rio de Janeiro.

Figura 10 – Protótipos na pista da Shell Eco-Marathon Brasil 2019.



Fonte: Shell (2019).

2.6.1 TBI na Competição

As equipes participantes da Shell Eco-Marathon Brasil são de diversos estados brasileiros e de diferentes países da América Latina, competindo com seus protótipos dentro da categoria de energia escolhida (Bateria Elétrica e Combustão Interna (Etanol e Gasolina)). Várias equipes da categoria de combustão interna optam por utilizar motores menores, como os encontrados em roçadeiras, como força motor dos seus veículos. Tendo em vista que esses motores normalmente empregam carburadores em seus sistemas de admissão, essas equipes precisam encontrar soluções alternativas para substituir essa peça.

CARLI (2019) apresenta um estudo a respeito do dimensionamento do coletor de admissão aplicado ao protótipo de eficiência energética da equipe Pato a Jato da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

3 METODOLOGIA

3.1 DEFINIÇÃO DO MOTOR

O motor utilizado para esta análise, e o escolhido pela equipe EFICEM para o projeto do protótipo à combustão, é o EM4350UH da Makita (Figura 11). É um motor de baixa cilindrada e sua aplicação na empresa é a de força motriz nos cortadores de grama.

Figura 11 – Motor Makita EM4350UH original de fábrica.



Fonte: PAJM (2019).

Na Tabela 1 estão apresentadas as principais informações técnicas do motor encontradas no manual original de instruções do fabricante Makita (2018).

Tabela 1 – Especificações técnicas do motor Makita EM4350UH.

Tipo de motor	4 tempos
Volume deslocado [cm^3]	43,0
Combustível	Gasolina
Potência Máxima [kW]	1,5 a 7500RPM
Torque Máximo [Nm]	2,1 a 5500RPM
Sistema de injeção de combustível	Carburador do tipo diafragma
Peso líquido [kg]	8,3
Óleo do motor	SAE10W30

Fonte: Autor (2023).

A escolha da equipe EFICEM por um motor pequeno se deve ao fato da equipe buscar a maior eficiência energética com seu protótipo. Embora a competição permita o uso de motores maiores, a equipe EFICEM optou por um motor menor buscando a redução de peso total do protótipo.

3.2 RESTRIÇÕES DE PROJETO

Por se tratar de uma competição, a Shell Eco-Marathon possui um manual de regras que deve ser seguido para a criação e desenvolvimento do veículo por todos os participantes. Segundo Shell (2019), motores com carburadores são proibidos, sendo mandatário o uso da injeção elétrica de combustível e os filtros de ar não são permitidos no sistema de admissão. Desse modo, os dutos de admissão são restritos ao TBI.

3.3 REQUISITOS DO PROJETO

Além das restrições impostas pela competição, a equipe ainda necessita que o corpo de borboleta deve ser projetado para garantir que sua função de levar o ar aos cilindros seja bem executada, pois precisa assegurar que a substituição do carburador pela nova peça mantenha o funcionamento do motor. Além disso, é fundamental que o seu tamanho esteja dentro dos limites da carenagem do protótipo desenvolvido pelo EFICEM e seja o mais leve possível.

Para integrar os componentes essenciais para o funcionamento da injeção eletrônica, é necessário modelar no corpo da TBI as posições dos orifícios e os suportes para encaixe do bico injetor, do sensor de posição da borboleta (TPS) e do sensor de temperatura e pressão do ar. Adicionalmente, é de extrema importância projetar a fixação adequada do corpo de borboleta ao motor.

3.4 ABORDAGEM EXPERIMENTAL

Para realizar a simulação do escoamento sobre o corpo de borboleta, é necessário conhecer vários parâmetros do funcionamento, como a pressão na câmara de combustão e do bico injetor na admissão, o tempo que a válvula de admissão fica aberta e fechada e o comprimento e diâmetro do duto de admissão interno ao motor. Alguns desses dados foram obtidos por meio de medições realizadas por profissional especializado no Laboratório de Metrologia e Qualidade da UFSC/CTJ (METeQ). Os dados obtidos foram utilizados nos cálculos para dimensionamento e modelagem da peça no SOLIDWORKS™.

3.5 DESCRIÇÃO DO MODELO

O primeiro passo para a modelagem do corpo de borboleta é definir quais os requisitos de projeto para o sistema de admissão do veículo. Com as regras da competição, do motor não poder utilizar de carburador e de filtro de ar na admissão, e a limitação no comprimento imposta pela equipe com a carenagem do veículo. A determinação da geometria do modelo ficou dividida na definição de 4 etapas:

- Comprimento e diâmetro do duto de admissão;
- Posição do acoplamento do bico injetor;
- Tipo de borboleta e acoplamento do sensor TPS;
- Posição do sensor de temperatura e pressão do ar.

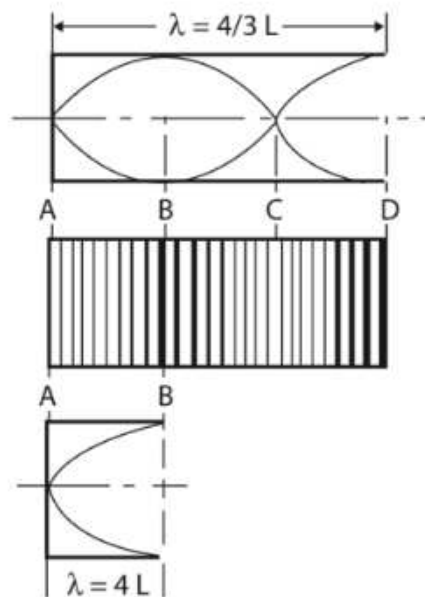
3.5.1 Comprimento e Diâmetro

Para a definição do comprimento e diâmetro do duto de admissão, é necessário a compreensão dos fenômenos que ocorrem no sistema durante o funcionamento do motor.

Um dos fenômenos que ocorre no sistema de admissão é a ressonância tipo "tubo de órgão". Esse fenômeno consiste no fato de a coluna de ar confinado em um tubo vibrar numa frequência inversamente proporcional ao comprimento do mesmo. No motor, isso ocorre da seguinte forma: o ar que está sendo admitido forma uma onda de pressão negativa (sendo aspirado pelo pistão); quando a válvula de admissão fecha-se, a onda de pressão reflete com mesmo sinal e volta pelo duto. Mas ao encontrar a entrada deste aberto, reflete com sinal oposto. Essa onda refletida, ao encontrar a válvula de admissão aberta, aumenta a eficiência volumétrica. (BRUNETTI, 2012, p.72).

O fenômeno descrito por Brunetti (2012) (Figura 12), mostra a onda de pressão em um tubo com uma de suas extremidades aberta.

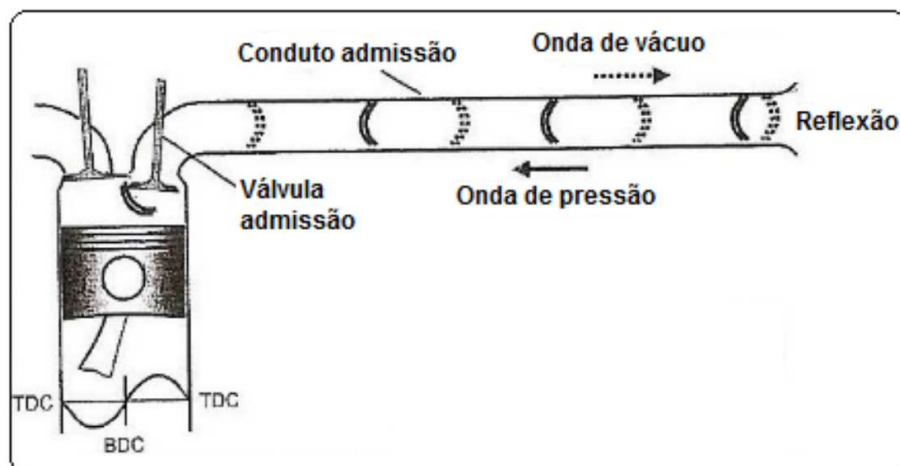
Figura 12 – Ondas de pressão em um tubo com uma de suas extremidades aberta.



Fonte: Brunetti (2012, p. 72).

No funcionamento do motor, o ar atmosférico é acelerado para entrar no cilindro do motor quando a válvula de admissão abre, porém, quando a válvula fecha, o escoamento é interrompido de forma abrupta, causando uma onda de pressão que inicia na válvula e retorna à entrada do duto (Figura 13).

Figura 13 – Onda de pressão ao longo do conduto de admissão.



Fonte: Basshuysen e Schafer (2004) apud QUEIROZ (2015).

Na Figura 13 também é possível perceber que a onda gerada no fechamento da válvula é refletida na entrada do duto. Esta reflexão da onda também pode acontecer na borboleta. Segundo Campiglia (2007), a eficiência volumétrica é determinada pelo nível de pressão na região da válvula de admissão durante o período em que a mesma está aberta.

Assim, para se descobrir o comprimento ideal total do duto de admissão, da válvula até a entrada, para se beneficiar das ondas de pressão geradas no funcionamento do motor, utilizou-se da Equação 1, sendo c a velocidade do som (m/s), N a rotação do motor (RPM) e θ_t o deslocamento angular do virabrequim com a válvula fechada por ciclo do motor.

$$L = \frac{c \cdot \theta_t}{0,012N} \quad (1)$$

De acordo com SOUZA (2010), ao desenvolver a geometria do duto de admissão é possível aproveitar os fenômenos de pulsação, tendo como objetivo aproveitar a onda de pressão positiva no momento que a válvula está aberta, impulsionando para dentro do cilindro uma quantidade adicional de gás que normalmente não entraria.

Com o objetivo de aumentar a eficiência energética, a rotação de trabalho foi estabelecida com base no torque máximo apresentado pelo motor Makita UM4350UH, conforme evidenciado na Tabela 1. Na Shell Eco-Marathon, os veículos podem desligar o motor durante as voltas, aproveitando-se da inércia do veículo gerada na fase de aceleração, de modo a passar boa parte do percurso com o motor desligado, buscando aumentar a marcas da equipe na competição. Portanto, para os cálculos, definiu-se a rotação do motor em 5500 rpm e a velocidade do ar em 343 m/s. Por fim, foi utilizado o valor de 421° para o deslocamento angular do virabrequim por ciclo, valor que foi obtido nas medições realizadas no laboratório METeQ.

Com todos os valores definidos para a Equação 1, foi possível calcular o valor de 2,19 m como o ideal para o duto de admissão. Porém, com esse comprimento, seria impossível adaptar o duto dentro do veículo, sendo necessário encurtá-lo de modo que a onda de pressão ainda atinja a válvula de admissão no momento em que está aberta, sem perder os benefícios do fenômeno do tipo "tubo de órgão". Uma abordagem viável é dividir o comprimento pela metade, permitindo que a onda percorra duas vezes a tubulação e ainda alcance a válvula no momento adequado. Além disso, é possível realizar mais divisões nos dutos para alcançar o mesmo objetivo.

É relevante destacar que o valor do comprimento obtido engloba desde a válvula do motor até a entrada de admissão. Por esse motivo, é necessário subtrair o comprimento do duto interno presente no cabeçote do motor para obter o comprimento real do corpo de borboleta.

O diâmetro utilizado para o corpo de borboleta foi de 14,2 mm, o mesmo obtido nas medições do duto interno de admissão no cabeçote do motor realizadas no laboratório METeQ.

3.5.2 Bico Injetor

O bico injetor é o componente responsável por pulverizar o combustível necessário para o funcionamento do motor. O controle da quantidade de gasolina injetada depende dos parâmetros de funcionamento, como a rotação do motor e a abertura da borboleta. Este comando é feito através de pulsos elétricos provenientes do módulo de injeção. Como o motor da equipe não possui injeção direta, é necessário que este elemento importante nos motores seja acoplado ao duto de admissão, no corpo de borboleta.

O bico injetor utilizado pelo EFICEM é da marca Honda, utilizado no modelos da motoneta Biz. O bico de injeção está representado na Figura 14 e o suporte que faz a fixação do bico no corpo de borboleta na Figura 15.

Figura 14 – Bico injetor Honda Biz.



Fonte: SBS (2023).

Figura 15 – Suporte bico injetor Honda Biz.



Fonte: Motokart (2023).

3.5.3 Borboleta

A borboleta do acelerador controla o fluxo de ar que entra no motor. A mais comum, é uma placa que gira em torno de um eixo central para facilitar ou restringir a passagem do ar em direção ao cilindro do motor. Nos veículos de passeio, este componente é controlado pelo pedal do acelerador.

A posição da borboleta é monitorada por um sensor, o TPS, do inglês Throttle Position Sensor (Sensor de Posição do Acelerador), que envia informações para o sistema de controle do motor, permitindo ajustes precisos na injeção de combustível. A eficiência e a responsividade do motor dependem em grande parte do correto funcionamento e calibração da borboleta do acelerador. O TPS utilizado pela equipe (Figura 16) é o empregado em vários veículos, dentre eles o Volkswagen Gol G2.

Figura 16 – Sensor de Posição da Borboleta (TPS) utilizado pela equipe.



Fonte: DS (2023).

Desse modo, o eixo da borboleta precisa ser adaptado e dimensionado para se encaixar ao sensor de posição da borboleta mostrado na Figura 16. Além disso o corpo de borboleta a ser desenvolvido precisa possuir um encaixe e fixação específico para o mesmo sensor.

3.5.4 Sensor de temperatura e pressão do ar

O sensor de temperatura e pressão do ar tem uma função importante no sistema de admissão do motor, a de medir a temperatura e pressão do ar que entra na câmara e passar essa informação para o sistema de controle do motor, pois esses parâmetros do ar afetam diretamente a quantidade de combustível injetada pelo bico injetor e o tempo de ignição. Com base na leitura do sensor, o sistema de controle ajusta a mistura

ar-combustível para garantir uma combustão adequada e eficiente.

De modo geral, o sensor de temperatura e pressão do ar de admissão desempenha um papel fundamental no controle e na otimização do desempenho do motor, garantindo uma operação eficiente em diferentes condições ambientais.

Como requisito de projeto, é necessário que o corpo de borboleta possua um orifício roscado para que se possa fixar a conexão pneumática (Figura 17), para o sensor de temperatura e pressão do ar.

Figura 17 – Conector pneumático para encaixe do sensor de temperatura e pressão do ar utilizado pela equipe.



Fonte: BRAFER (2023).

3.6 MODELAGEM 3D

A modelagem 3D do corpo de borboleta foi desenvolvida com base na compreensão dos requisitos de projeto, do comportamento do motor, das medidas realizadas e dos cálculos. Utilizando o software SOLIDWORKS™, foi possível criar modelos precisos das peças para análise e manufatura.

3.6.1 Corpo de Borboleta

A primeira peça a ser desenvolvida foi o corpo de borboleta em sua totalidade, uma vez que é nele que todas as outras peças se encaixam para garantir o funcionamento do conjunto como um todo. A partir do cálculo da Equação 1 e levando

em consideração o espaço reduzido para o corpo e a medida do comprimento do duto interno do cabeçote do motor, chegou-se na Equação 2. Os valores utilizados para determinar o comprimento do modelo e o resultado obtido estão apresentados na Tabela 2.

$$L = \frac{c \cdot \theta_t}{8} - L_{int} \quad (2)$$

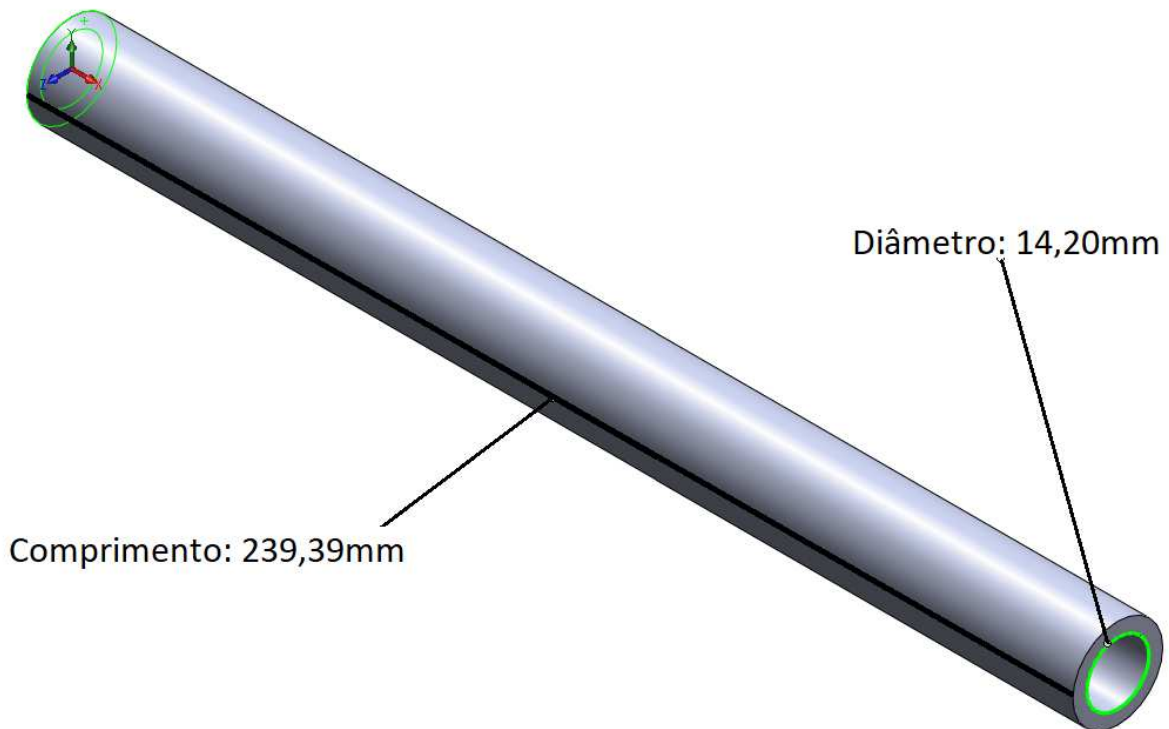
Tabela 2 – Valores utilizados e resultado para o comprimento do corpo de borboleta.

Símbolo	Parâmetro	Valor
c	Velocidade do som	343m/s
θ_t	Deslocamento Angular Virabrequim por ciclo com válvula de admissão fechada	421°
N	Rotação do motor	5500rpm
L_{int}	Comprimento do duto interno do cabeçote do motor	34,10mm
L	Comprimento do duto do corpo de borboleta	239,39mm

Fonte: Autor (2023).

Com o comprimento e diâmetro do corpo definido, é possível iniciar a modelagem. O primeiro passo é o de gerar o duto do tamanho calculado, com diâmetro medido, demonstrado na Figura 18.

Figura 18 – Modelo do duto inicial.



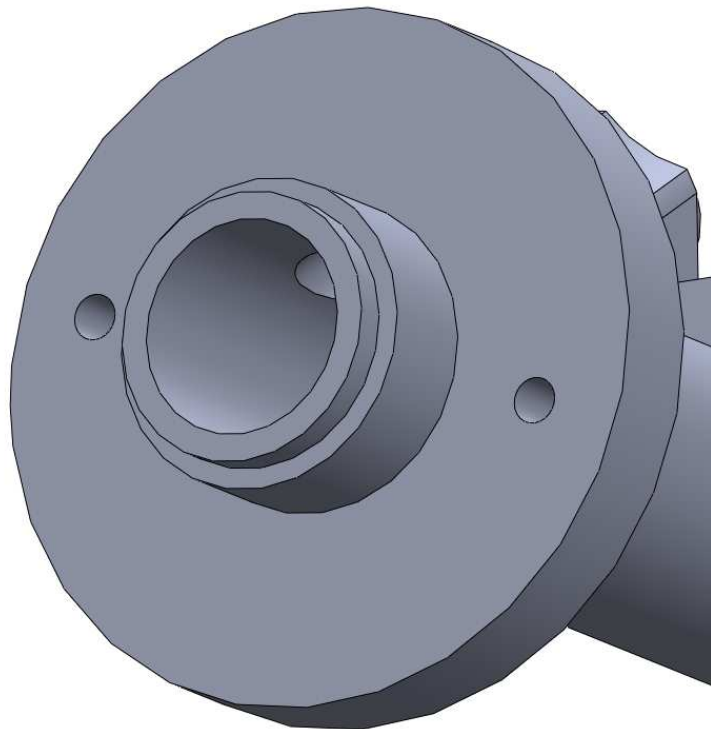
Fonte: Autor (2023).

A fase inicial assume uma importância crucial, pois todas as etapas subsequentes, incluindo a criação de ressaltos, rebaiços, fixações e orifícios modelados, devem ser executadas de maneira a não interferir ou restringir o fluxo contínuo que se espera passar pelo duto apresentado na Figura 18.

A etapa seguinte consiste em projetar a fixação da peça no motor. Com base nas medidas obtidas experimentalmente, foi adicionada uma flange para prender o corpo com os furos para acoplar a peça.

A flange foi posicionada a uma distância de 10 mm da saída do duto de admissão do cabeçote, considerando a diferença existente no motor, em que a entrada do duto se encontra a essa distância dos orifícios projetados para fixação. A flange modelada está ilustrada na Figura 19.

Figura 19 – Modelo da flange de fixação do corpo ao motor.

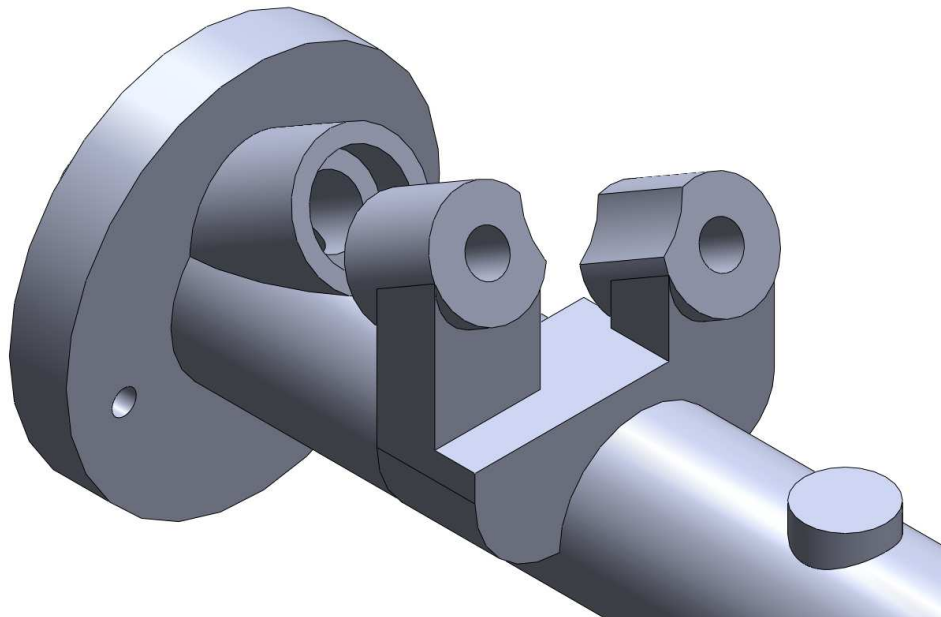


Fonte: Autor (2023).

Ao observar a Figura 19, pode-se notar que a geometria que fica mais próxima à entrada do duto apresenta um rebaiço, que permite um acoplamento mais eficiente entre a peça e o motor.

Após definir de forma precisa a fixação do corpo ao motor e obter as medidas do bico de injeção e do conector pneumático, foi possível realizar a modelagem do suporte do bico injetor e do ressalto para a fixação do sensor de temperatura e pressão do ar. Essas representações estão ilustradas na Figura 20.

Figura 20 – Fixação do bico injetor e ressalto para sensor de temperatura e pressão modelados no SOLIDWORKS™.

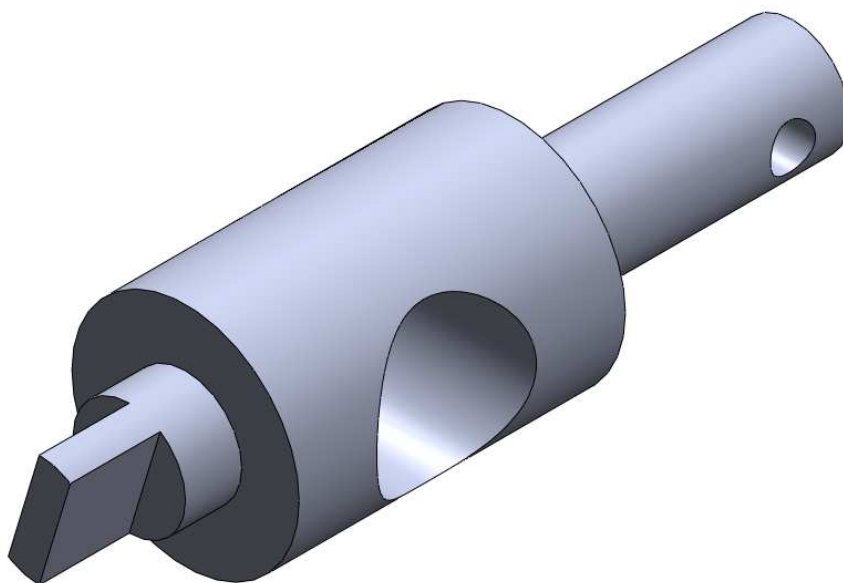


Fonte: Autor (2023).

3.6.2 Eixo da borboleta

A definição e modelagem do eixo da borboleta precisou ser determinada para que se possa ajustar o corpo para acoplar esse componente. O modelo desenvolvido pode ser visualizado na Figura 21.

Figura 21 – Eixo da borboleta do tipo tambor modelado no SOLIDWORKS™.



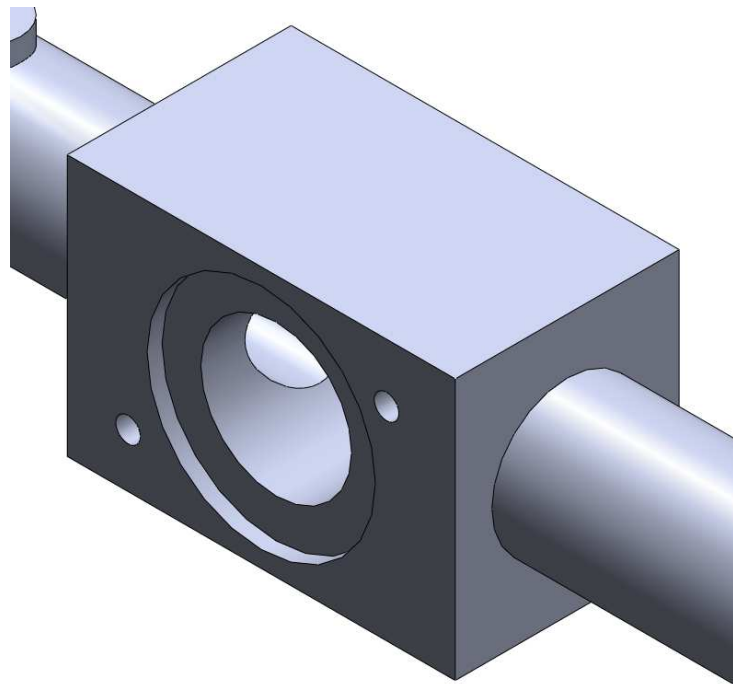
Fonte: Autor (2023).

Optou-se pela utilização de uma borboleta do tipo tambor, devido à sua facilidade de instalação, capacidade de proporcionar um fluxo de ar mais uniforme quando totalmente aberta, exatamente como projetado para funcionar, e visando mitigar as entradas de ar "falsas", ou seja, entradas de ar que não são provenientes diretamente da abertura no início do duto de admissão.

O diâmetro do orifício presente no tambor é igual ao do duto de admissão, de 14,2 mm. Essa escolha permite que, quando totalmente aberta, a borboleta forme um duto contínuo e sem restrições, desde a entrada da admissão até a válvula. Dessa forma, o fluxo de ar não é limitado ou obstruído, garantindo um desempenho ideal do sistema de admissão.

Para o encaixe da borboleta e a fixação do sensor de posição no corpo, foi desenvolvido um bloco na metade do duto. Na Figura 22, é mostrado o furo destinado à passagem do eixo da borboleta, o rebaixo no bloco para encaixe do sensor de posição (TPS) e os furos para fixá-lo devidamente.

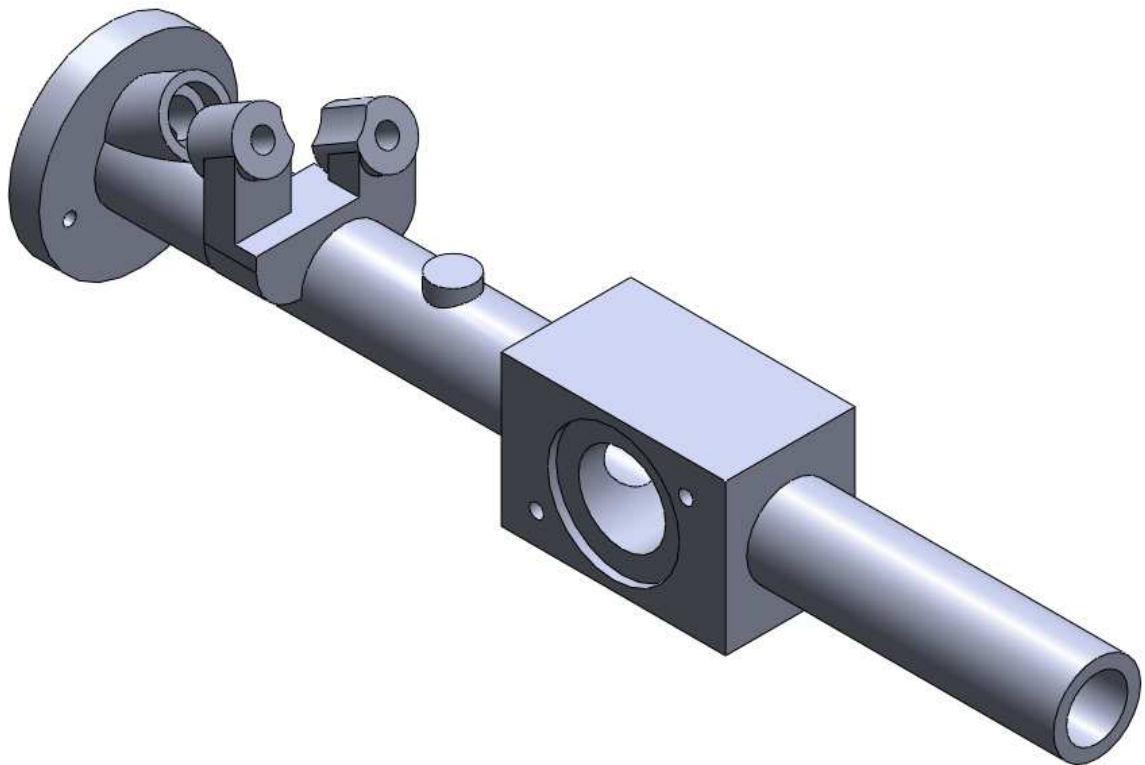
Figura 22 – Bloco para fixação do sensor de posição e passagem do eixo da borboleta.



Fonte: Autor (2023).

Desse modo, a peça do corpo de borboleta pode ser totalmente desenvolvida, seguindo todos os requisitos de projeto e o comprimento calculado. A representação do modelo pode ser visualizada na Figura 23.

Figura 23 – Corpo de borboleta modelado com todos os requisitos.



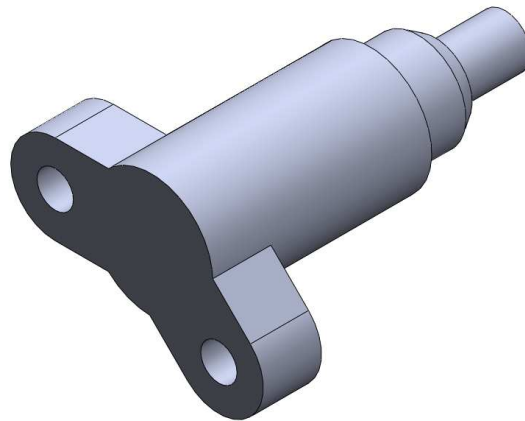
Fonte: Autor (2023).

3.6.3 Peças Auxiliares

O desenvolvimento e modelagem de peças auxiliares desempenham um papel importante para a realização das simulações, análises e da finalização da montagem do corpo de borboleta. Ao integrar esses modelos ao corpo principal, é possível obter uma visualização completa de como irá ficar a montagem final e realizar as simulações de forma mais real, pois elas ajudam na criação de condições de contorno precisas e na definição dos parâmetros de entrada relevantes para a análise.

Através das medidas obtidas experimentalmente do bico injetor utilizado, foi possível desenvolver o modelo correspondente, conforme ilustrado na Figura 24. Essa representação desempenhou um papel fundamental na visualização final da peça durante a montagem, bem como nas análises realizadas dentro do software. É possível visualizar que o modelo (Figura 24) foi simplificado para realizar a análise, porém o comprimento e diâmetro do corpo e a posição dos furos de fixação são fieis à realidade, visto que são importantes para o encaixe e fixação no corpo de borboleta posteriormente.

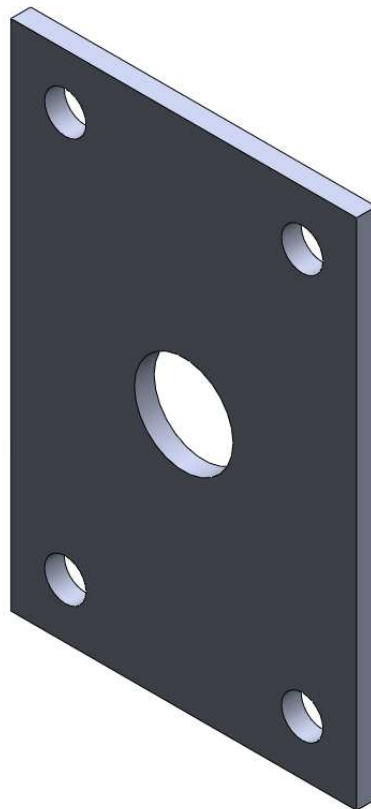
Figura 24 – Bico injetor utilizado modelado em SOLIDWORKS™.



Fonte: Autor (2023).

Uma outra modelagem simples, mas de grande importância, é a placa de contenção da borboleta (Figura 25). Essa placa desempenha um papel crucial ao inibir o movimento axial da borboleta e dificultar ainda mais a ocorrência de entradas "falsas" de ar.

Figura 25 – Modelo da placa de fixação da borboleta.

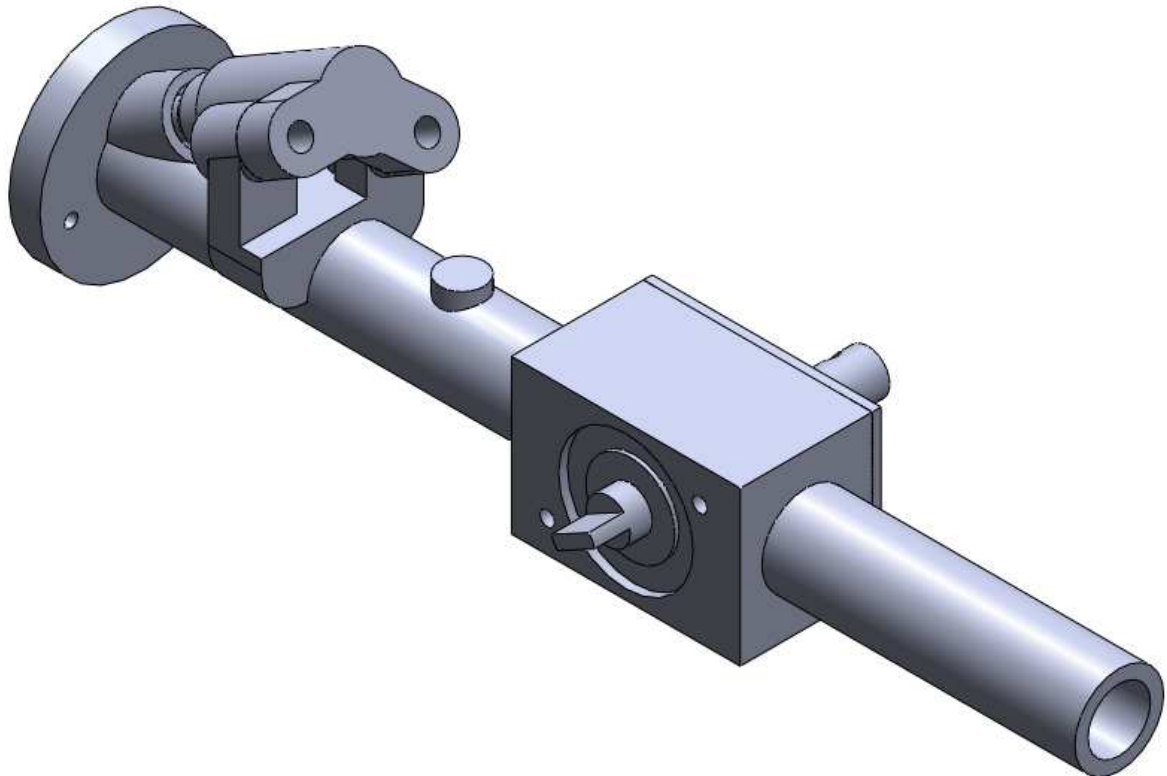


Fonte: Autor (2023).

3.6.4 Montagem

O software SOLIDWORKS™ oferece uma ferramenta de montagem para combinar todos os componentes modelados, sendo utilizada para facilitar a visualização da montagem final e realizar as análises relevantes para o projeto. O modelo resultante da combinação dos elementos desenvolvidos está representado na Figura 26.

Figura 26 – Montagem dos componentes modelados no CAD SOLIDWORKS™.



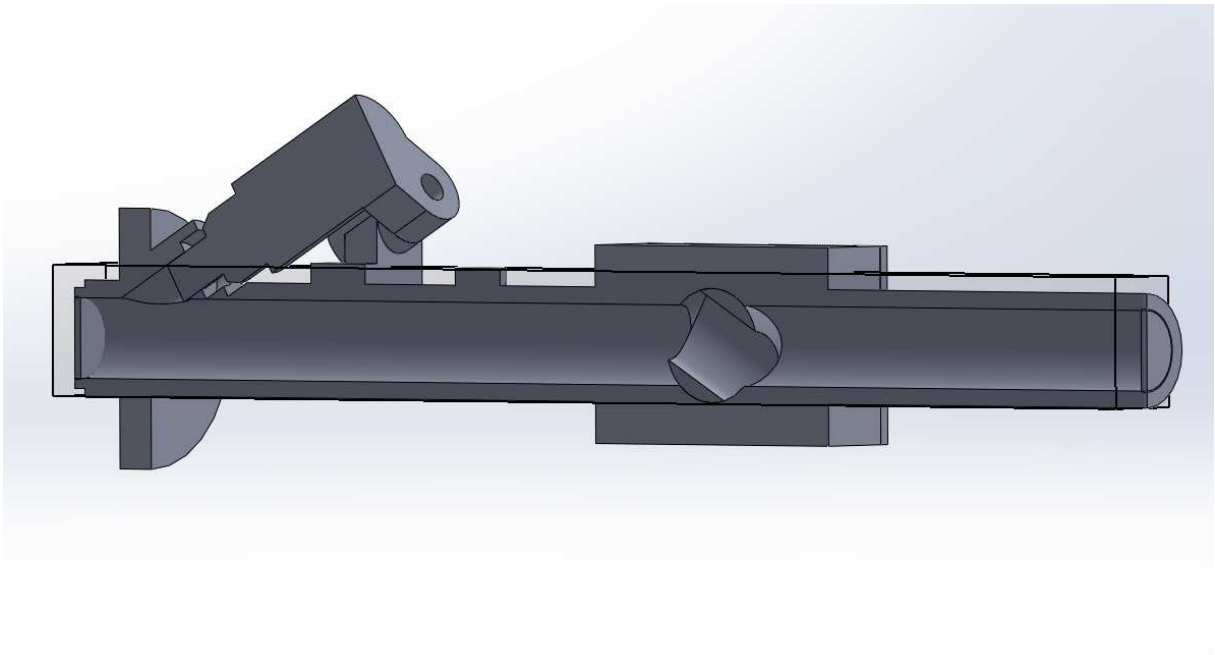
Fonte: Autor (2023).

4 ANÁLISE DE DADOS

4.1 ANÁLISE DO ESCOAMENTO

Para avaliar o fluxo durante o funcionamento do corpo de borboleta, utilizou-se a ferramenta de análise do software (SOLIDWORKS™ Flow Simulation). Para realizar essa análise, foi necessário fechar as entradas e saídas do modelo e inserir os parâmetros de utilização relevantes. Além disso, o modelo foi dividido em duas partes por um plano para permitir a visualização interna do duto, e desse modo, possibilitar a observação da trajetória das partículas ao longo do mesmo. O modelo preparado para essa análise pode ser observado na Figura 27.

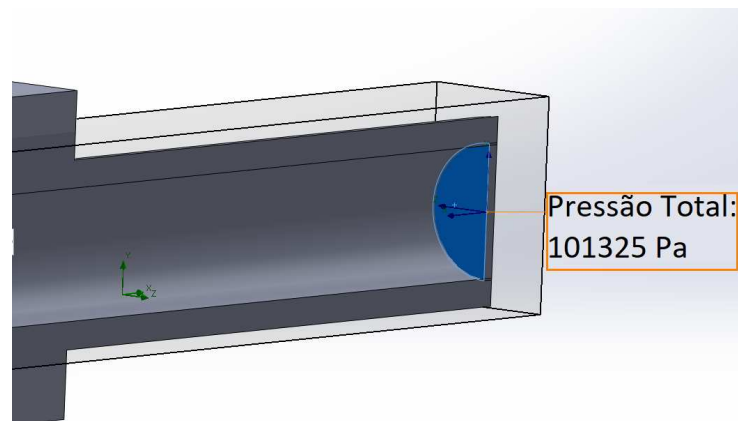
Figura 27 – Modelo preparado para análise.



Fonte: Autor (2023).

Continuando com a etapa de preparação para a análise, é fundamental estabelecer os valores dos parâmetros de entrada para validar o projeto. Levando em consideração que os parâmetros da entrada do modelo são provenientes do ambiente externo, ou seja, o ar atmosférico, e tendo em vista que a competição Shell Eco-Marathon ocorre no Rio de Janeiro, ao nível do mar, foi definida uma pressão de uma atmosfera (101.325 Pa) para a entrada do modelo, conforme está representado na Figura 28.

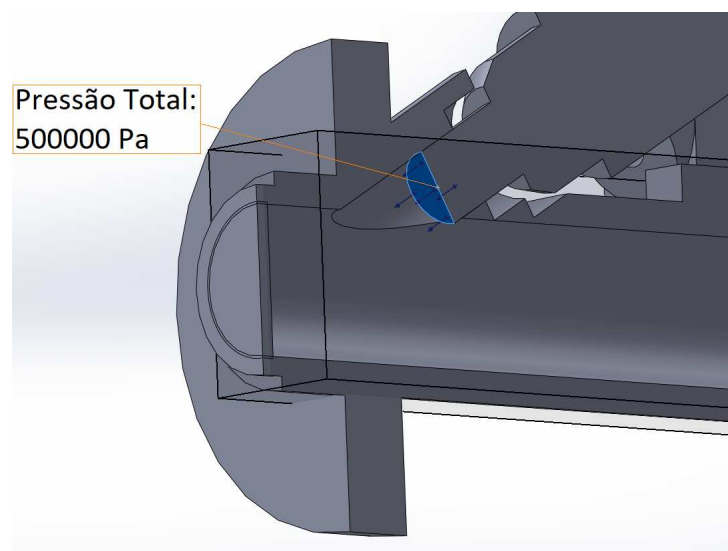
Figura 28 – Parâmetros de entrada do duto.



Fonte: Autor (2023).

Um outro parâmetro de grande importância é correspondente à injeção de combustível pelo bico injetor. De acordo com as especificações da Shell Eco-Marathon (SHELL, 2019), é permitido pressurizar o líquido do tanque de combustível para alimentar o motor, desde que essa pressurização seja feita em uma garrafa de ar comprimido translúcida e não ultrapasse a pressão de 500 kPa. Sendo assim, a equipe EFICEM optou por utilizar a pressão máxima permitida pela competição, de modo que o parâmetro de pressão de entrada de combustível para análise foi definido em 500 kPa, como ilustrado na Figura 29.

Figura 29 – Parâmetros de entrada do bico injetor.

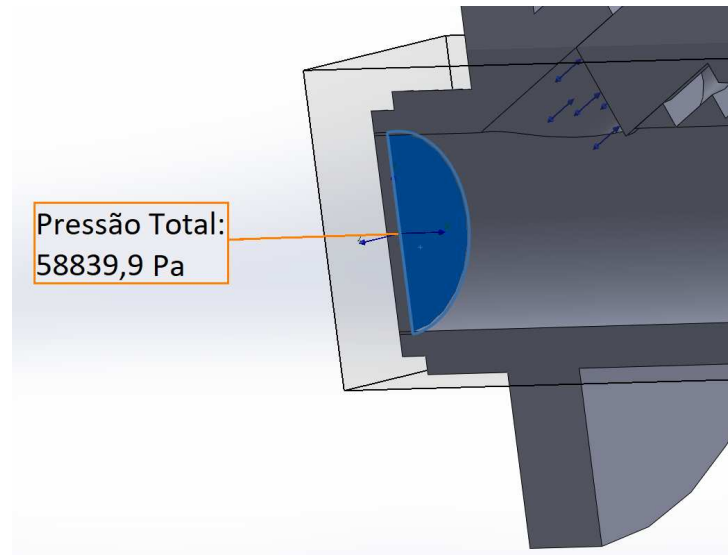


Fonte: Autor (2023).

O último parâmetro necessário é o da entrada do motor, da válvula de admissão. A pressão nesse ponto é gerada pelo movimento de descida do pistão no funcionamento do motor. Segundo Filho (1983), a pressão de aspiração para os motores de ciclo Otto

varia de 49033,3 a 68646,6 Pa. Desse modo, foi utilizado o valor intermediário para a pressão na saída do modelo, de 58.839,9 Pa como ilustrado na Figura 30.

Figura 30 – Parâmetros de entrada na saída do modelo.

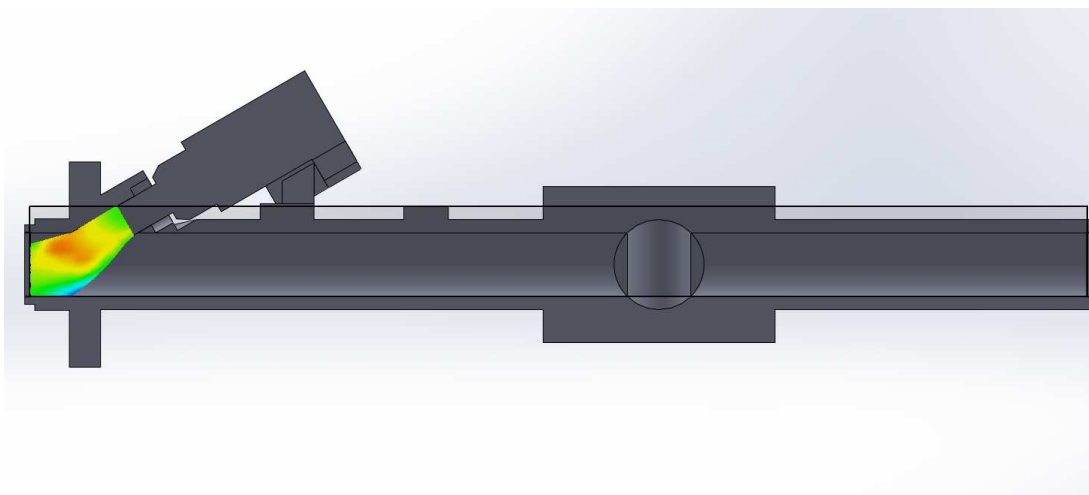


Fonte: Autor (2023).

Com todas as condições de contorno estabelecidas, é necessário informar ao software qual parâmetro será analisado e como ele será representado. Nesse sentido, optou-se por simular o escoamento para avaliar a velocidade do fluxo pelo corpo de borboleta.

Dessa forma, ao variar a abertura da borboleta em graus, é possível investigar o fluxo de ar pelo duto interno do modelo. A primeira simulação, ilustrada na Figura 31, corresponde à borboleta completamente fechada, com um ângulo de 0° , o que impede a entrada de qualquer ar proveniente do ambiente.

Figura 31 – Distribuição de velocidade (m/s) para 0° de abertura de borboleta.

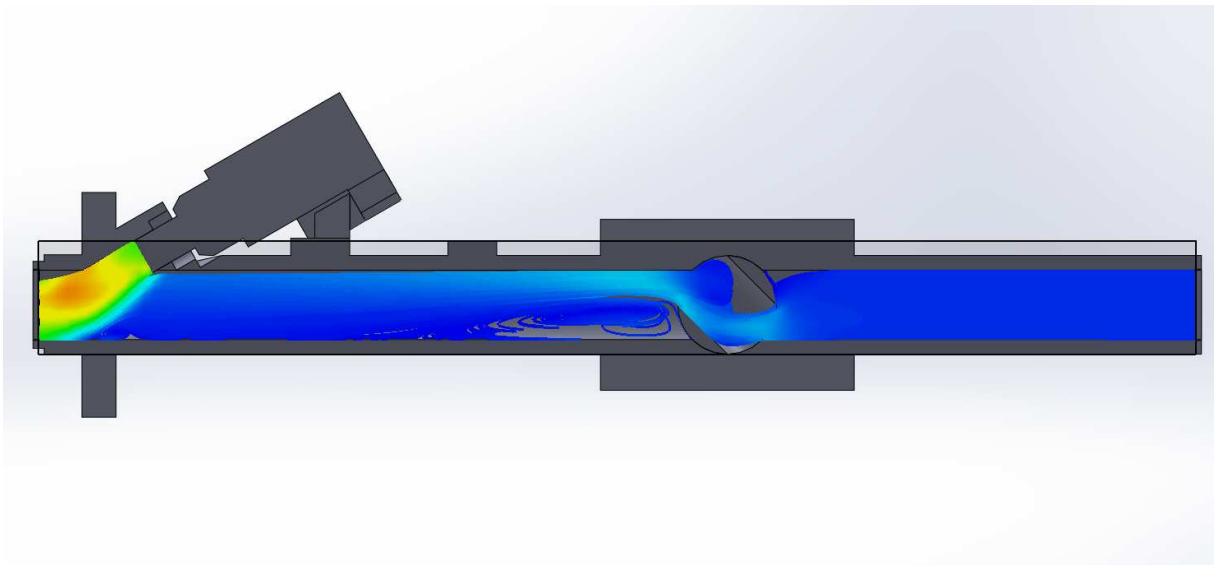


Fonte: Autor (2023).

Na Figura 31, pode-se observar que o ar antes da borboleta não é afetado devido ao completo fechamento da passagem pelo tambor. Desse modo, a única aceleração no fluido se deve à injeção de combustível e a baixa pressão na saída do corpo. A equipe EFICEM não utiliza a borboleta nessa posição, porém essa análise é importante para garantir um ajuste preciso da marcha lenta do motor.

Na sequência, foi realizada uma simulação representando uma abertura intermediária da borboleta, com um ângulo de 45° , conforme mostrado na Figura 32. Observa-se que o ar é puxado da atmosfera devido às diferenças de pressão na saída do duto, e acelerado devido às restrições impostas pelo ângulo do tambor, tanto na parte inferior na entrada quanto na parte superior na saída. A posição da borboleta também cria zonas de recirculação, atrapalhando o fluxo em direção ao motor, como pode ser visualizado na parte superior do tambor e na parte inferior do duto após a borboleta.

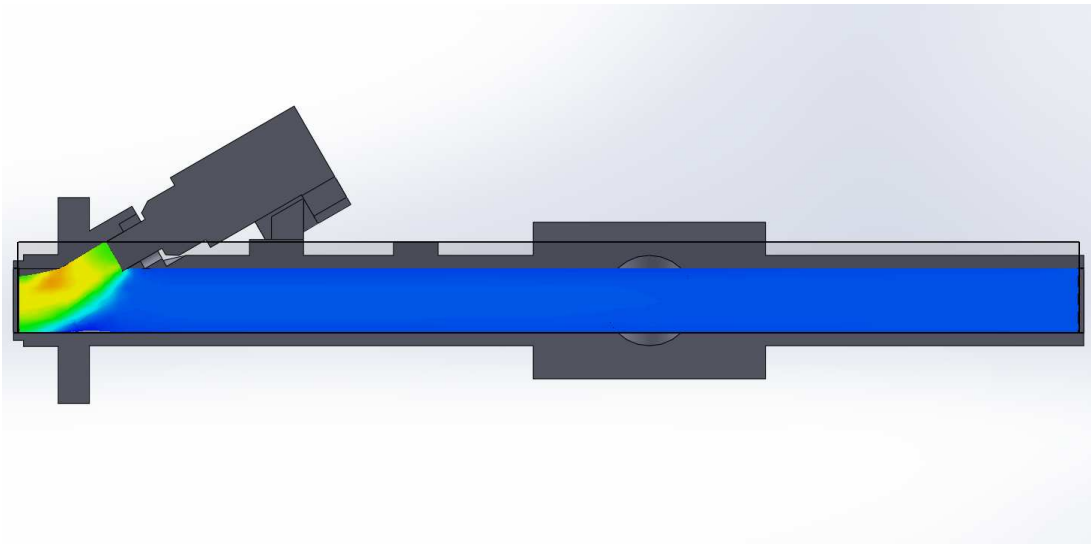
Figura 32 – Distribuição de velocidade (m/s) para 45° de abertura de borboleta.



Fonte: Autor (2023).

A simulação final corresponde à utilização real na Shell Eco-marathon para a qual a TBI foi projetada (abertura de 90°). Nessa configuração, o duto apresenta um perfil uniforme do início ao fim, sem restrições ou alterações no diâmetro, permitindo aproveitar as ondas de pressão geradas durante o funcionamento do motor. A simulação correspondente está ilustrada na Figura 33, na qual é possível observar o fluxo uniforme no modelo, com o ar sendo acelerado da entrada, à pressão ambiente, até a saída, à pressão de aspiração do motor. O aumento na velocidade também é auxiliado por conta da injeção do combustível logo antes de entrar no cabeçote do motor.

Figura 33 – Distribuição de velocidade (m/s) para 90° de abertura de borboleta.



Fonte: Autor (2023).

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho proporcionou uma ampliação dos conhecimentos sobre os fenômenos que ocorrem nos dutos de admissão em pleno funcionamento do motor, e a partir da análise dos requisitos do projeto, calcular, desenvolver e modelar um corpo de borboleta para utilização no protótipo à combustão de uma equipe de eficiência energética.

O sistema de admissão de um motor à gasolina possui grande importância, levando o ar da atmosfera, e posteriormente a mistura ar-combustível, pelos dutos até a câmara de combustão. O comportamento do gás é afetado pelas diferentes geometrias dos componentes, influenciando diretamente na quantidade da mistura que será admitida no motor. Portanto, para a modelagem em SOLIDWORKS™ é necessário entender essas influências e as condições do projeto de forma a desenvolver as peças para alcançar o desempenho desejado.

Em busca de melhorar a eficiência volumétrica do motor, partiu-se da análise da ressonância de ondas dentro de tubos com uma extremidade fechada para calcular o comprimento total ideal do corpo de borboleta. Dessa forma, foi necessário obter medidas experimentais do motor, como os ângulos do virabrequim na abertura e fechamento da válvula de admissão e o comprimento do duto interno ao cabeçote. Outra medida obtida experimentalmente, foi a do bico injetor utilizado pela equipe e o diâmetro da rosca para encaixe do sensor de pressão e temperatura do ar.

A partir do resultado dos cálculos e das medições obtidas, foi possível modelar com auxílio do software SOLIDWORKS™ o corpo de borboleta com comprimento ideal para se beneficiar das ondas geradas no funcionamento do motor. Desse modo, com o uso do SOLIDWORKS™ Flow Simulation, foi simulado e analisado o fluxo do ar dentro do modelo para diferentes ângulos de abertura da borboleta.

Como esperado e projetado, o escoamento com abertura total da borboleta, ficou uniforme, o que garante um maior fluxo de ar-combustível para dentro da câmara de combustão, garantindo uma melhor eficiência volumétrica. Porém para aberturas intermediárias o escoamento foi bastante prejudicado, devido às restrições na passagem do fluido pelo tambor da borboleta e as zonas de recirculação geradas dentro do duto.

Neste trabalho, a abordagem adotada para calcular o comprimento e modelar o corpo de borboleta foi direcionada a aproveitar do fenômeno da ressonância presente no sistema de admissão. No entanto, durante o funcionamento do motor, também ocorrem outros fenômenos nos dutos de admissão, como o efeito RAM. Por este motivo, para futuros trabalhos da equipe, recomenda-se analisar outros fatores da admissão

que possuem influência na eficiência do motor e realizar estudos comparativos com o modelo presente neste trabalho. Também é possível substituir algum dos componentes e verificar a influência no escoamento, como por exemplo, trocar a borboleta tambor por uma comumente utilizada, buscando um fluxo mais uniforme mesmo em valores intermediários de abertura de borboleta, ou ainda, a posição e o ângulo do bico injetor.

REFERÊNCIAS

- BASSHUYSEN, R. V.; SCHAFER, F. **Internal combustion engine handbook : basics, components, systems, and perspectives**. [S.l.]: Society of Automotive Engineers, 2004. (Society of Automotive Engineers.; Electronic publications). ISBN 9780768071962; 0768071968.
- BLAIR, G. P. **Design and Simulation of Four-Stroke Engines**. Warrendale, Pa.: SAE INTERNATIONAL, 1999.
- BRAFER. 2023. Disponível em <https://www.lojabrafer.com.br/conector-reto-rosca-macho-bsp-1-4-tubo-6mm-conexao-rapida/p/827>. Acesso em: 09 de junho de 2023.
- BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna: volume 2**. São Paulo: Blucher, 2012. ISBN 978-85-212-1294-2; 978-85-212-0709-2.
- CAMPIGLIA, R. B. **Estudo da influência da geometria da tubulação a montante da válvula de aceleração no desempenho do sistema de admissão de ar de um motor de combustão interna de ignição por faísca**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- CARLI, M. D. **DIMENSIONAMENTO DO COLETOR DE ADMISSÃO DE GEOMETRIA VARIÁVEL PARA UM MOTOR DE CICLO OTTO APLICADO AO PROTÓTIPO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA EQUIPE PATO A JATO**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) — Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2019.
- DATE, A. W. **Introduction to computational fluid dynamics**. Mumbai: CUP, 2005. ISBN 051113052X; 9780511130526.
- DIAS, B. M. D. A. **Unidade microcontroladora para gerenciamento eletrônico de um motor de combustão interna ciclo Otto**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- DS. 2023. Disponível em <https://www.ds.ind.br/pt/produtos/sensor-de-posicao-da-borboleta-tps/1902>. Acesso em: 08 de junho de 2023.
- FILHO, P. P. **Os Motores de Combustão Interna: para curso de máquinas térmicas, engenheiros, técnicos e mecânicos em geral que se interessam por motores**. Primeira edição. Belo Horizonte: Lemi, 1983.
- FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2010.
- HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engine fundamentals**. New York: McGraw-Hill, 1988.
- HOWARD, W.; MUSTO, J. **Introduction to Solid Modeling Using SOLIDWORKS 2022**. 18. ed. [S.l.]: McGraw Hill, 2022. ISBN 9781264163090; 1264163096.

KUROWSKI, P. M. **Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2015**. [S.l.]: SDC, 2015.

KÄÄRIÄ, C. H. **Investigating the Impact of Ship Superstructure Aerodynamics on Maritime Helicopter Operations**. Tese (Doctor of Philosophy thesis) — University Of Liverpool, Liverpool, 2012.

LOMBARD, M. **SolidWorks 2009 Bible**. 1st ed. ed. [S.l.]: Wiley Pub., inc, 2009. ISBN 9780470258255; 047025825X.

MAKITA. **Original Instruction Manual Makita**. 2018. Disponível em: https://www.icmsmakita.eu/cms/custom/es/user_manual/EM4350UH.pdf. Acesso em: 01 jun. 2023.

MARTINS, J. **Motores de combustão interna**. 2. ed. Guimarães: PubIndústria, 2006.

MOTOKART. 2023. Disponível em <https://www.motokart.com.br/suporte-bico-injetor-biz-125-09-15-mhx>. Acesso em: 08 de junho de 2023.

PAJM. 2019. Disponível em <https://pajm.pl/em4350uh-kosa-spalinowa-makita-2-0km-4-suw-em-4350uh-p-3998.html>. Acesso em: 17 de junho de 2023.

PIVA, R. B. **Economia ambiental sustentável: os combustíveis fósseis e as alternativas energéticas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência Econômicas) — Departamento de Ciências Econômicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

QUEIROZ, C. H. **Influência de ressonador de Helmholtz e da geometria do sistema de admissão na vazão de ar de um motor de combustão interna**. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

SBS. 2023. Disponível em <https://www.sbsmotos.com.br/bico-de-injecao-biz-125-1116-cawu/p>. Acesso em: 08 de junho de 2023.

SHELL. **SHELL ECO-MARATHON 2019 OFFICIAL RULES CHAPTER I**. 2019. Disponível em: <https://www.shell.com.br/energia-e-inovacao/ecomarathon.html>. Acesso em: 01 jun. 2023.

SKA. 2017. Disponível em <https://ska.com.br/produtos/solidworks/solidworks-flow-simulation>. Acesso em: 20 de junho de 2023.

SOUZA, G. R. d. **Estudo experimental e numérico do sistema de admissão de um motor de combustão interna**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

UM, D. **Solid modeling and applications. Rapid prototyping, CAD and CAE theory**. 2nd ed. 2018. ed. [S.l.]: Springer, 2018. ISBN 9783319745947; 3319745948; 9783319745930; 331974593X.