



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FELIPE BEZERRA MARTINS

**ANÁLISE DE CONSUMO DE COLETOR DE ADMISSÃO DE GEOMETRIA  
VARIÁVEL POR CADEIA CINEMÁTICA NO GT-POWER**

Recife

2019

FELIPE BEZERRA MARTINS

**ANÁLISE DE CONSUMO DE COLETOR DE ADMISSÃO DE GEOMETRIA  
VARIÁVEL POR CADEIA CINEMÁTICA NO GT-POWER**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

**Orientador:** Prof. Dr. Jorge Recarte Henriquez Guerrero.

Recife

2019

Catálogo na fonte  
Bibliotecário Josias Machado, CRB-4 / 1690

- M386a Martins, Felipe Bezerra.  
Análise de consumo de coletor de admissão de geometria variável por cadeia cinemática no GT-Power / Felipe Bezerra Martins. – Recife, 2019.  
45 f., il., figs., tabs.
- Orientador: Jorge Recarte Henriquez Guerrero.  
TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Graduação em Engenharia Mecânica, 2019.  
Inclui Referências.
1. Engenharia Mecânica. 2. Motores de combustão interna. 3. Coletor de admissão de geometria variável. 4. GT-Power. I. Guerrero, Jorge Recarte Henriquez (orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-322

FELIPE BEZERRA MARTINS

**ANÁLISE DE CONSUMO DE COLETOR DE ADMISSÃO DE GEOMETRIA  
VARIÁVEL POR CADEIA CINEMÁTICA NO GT-POWER**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 19/06/2019.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Jorge Recarte Henriquez Guerrero (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. José Carlos Charamba Dutra (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Álvaro Antonio Ochoa Villa (Examinador Externo)  
Instituto Federal de Pernambuco

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos professores que participaram da minha formação, em especial ao Prof. Dr. Jorge Recarte Henríquez Guerrero e a Prof. Dra. Nadège Sophie Bouchonneau da Silva pela orientação na execução deste trabalho.

Agradeço também a meus amigos que sempre me deram suporte dentro e fora da universidade, a equipe RobôCIn que sempre me incentivou a aprender e a UFPE.

## RESUMO

Os automóveis movidos a motores de combustão interna estão presentes em grande escala no dia a dia, transportando pessoas e cargas ao custo de energia na forma de combustíveis e emissão de poluentes sendo de grande interesse o aumento de eficiência dos motores. Um estudo do consumo para condições reais de uso é desenvolvido para complementar o trabalho realizado por Silva (2019) onde propôs um coletor de geometria variável para melhorar a performance do motor ao longo de todo seu alcance de velocidades de rotação, utilizando o *software* GT-Power e suas ferramentas de otimização para maximizar a eficiência volumétrica para diferentes velocidades do motor em condição de plena carga. Uma simulação da cadeia cinemática de um automóvel foi realizada no *software* GT-Power para os motores com o coletor de geometria variável e original definidos através de seus mapas de performance mecânica para condições de uso definidas por curvas de velocidades padrão do teste de consumo EPA 5 Ciclos. O resultado observado foi uma redução na economia de combustível, dada pela distância percorrida por volume de combustível consumido, ao se utilizar o coletor de geometria variável. Uma redução de 0,62% para ciclos de condução urbana, 0,44% para condução rural e 0,51% para condução urbana e rural combinada.

Palavras-chave: Motores de Combustão Interna. Coletor de Admissão de Geometria Variável. GT-POWER.

## **ABSTRACT**

Automobiles driven by internal combustion engines are present on a large scale on a daily basis, transporting people and cargo at the cost of energy in the form of fuel and emission of pollutants, being the increase of the engine's efficiency of great interest. A consumption study for actual conditions of use is developed to complement the work done by Silva (2019) where it proposed a variable length intake manifold to improve engine performance throughout its range of rotation speeds, using the software GT-Power and its optimization tools to maximize volumetric efficiency for different engine speeds in full load condition. A driveline simulation of an automobile was performed on the GT-Power software for engines with the original and variable length intake manifolds defined through their mechanical performance maps for conditions of use defined by standard velocity curves of the test EPA consumption 5 Cycles. The observed result was a reduction in fuel economy, given by the distance covered by the volume of fuel consumed, when using the variable geometry collector, a reduction of 0.62% for urban driving cycles, 0.44% for driving and 0.51% for combined urban and rural driving.

Keywords: Internal Combustion Engine. Variable Length Intake Manifold. GT-POWER.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Ciclo de motor de combustão Interna de 4 tempos .....	19
Figura 2 -	Diagrama de Coletor de Admissão .....	20
Figura 3 -	Coletor de Admissão Variável de Motor VR .....	20
Figura 4 -	Diagrama de Forças Biela-Manivela .....	21
Figura 5 -	Modelo de Motor 4 Cilindros .....	24
Figura 6 -	Modelo de Cadeia Cinemática .....	25
Figura 7 -	Modelo GT-Power E.torQ 1.6L Aspirado .....	26
Figura 8 -	Borboleta de Acelerador do Modelo no GT-ISE .....	28
Figura 9 -	Controle de Borboleta de Acelerador no GT-ISE .....	29
Figura 10 -	Modelo de Cadeia Cinemática <i>5_Cycle_Fuel_Economy</i> no GT-ISE .....	30
Figura 11 -	Mapa de Performance Mecânica do Motor – Coletor Original .....	35
Figura 12 -	Mapa de Performance Mecânica do Motor – Coletor Geometria Variável.....	36
Figura 13 -	Mapa de Consumo de Combustível – Coletor Original .....	36
Figura 14 -	Mapa de Consumo de Combustível – Coletor Geometria Variável .....	37
Figura 15 -	Velocidade do Veículo Durante Teste EPA 5 Ciclos .....	37
Figura 16 -	Velocidade de Rotação do Motor Durante Teste EPA 5 Ciclos .....	38
Figura 17 -	Consumo para Teste EPA 5 Ciclos .....	38
Figura 18 -	Consumo para Ciclos Individuais do Teste EPA 5 Ciclos .....	39
Figura 19 -	Histograma de Velocidade de Rotação do Motor para Teste EPA 5 Ciclos .....	40
Figura 20 -	Consumo Específico por Carga para 3000 RPM .....	40
Figura 21 -	Consumo Específico por Carga para 2500 RPM .....	41
Figura 22 -	Consumo Específico por Carga para 1000 RPM .....	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Comprimento dos <i>runners</i> do Coletor de Geometria Variável Proposto por Silva (2019) .....	27
Tabela 2 -	Características dos Ciclos do Teste EPA 5 Ciclos .....	30
Tabela 3 -	Modelo de Transmissão Utilizado .....	32

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BMEP	<i>Brake Mean Effective Pressure</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
OBD	<i>On-Board Diagnostic</i>
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior

## LISTA DE SÍMBOLOS

$P$	Pressão
$N$	Potência
$\eta$	Eficiência
$\dot{m}$	Vazão Mássica
$\rho$	Densidade
$n$	Rotação do Motor
$C$	Consumo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização do Problema .....</b>	<b>12</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos Gerais .....</b>	<b>13</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>13</b>
<b>1.4</b>	<b>Apresentação do Trabalho .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>16</b>
<b>3.1</b>	<b>Motor de Combustão Interna .....</b>	<b>16</b>
<b>3.2</b>	<b>Sistema de Admissão de Ar de Motor de Combustão Interna .....</b>	<b>17</b>
3.2.1	Coletor de Geometria Variável .....	17
<b>3.3</b>	<b>Parâmetros de Motor de combustão Interna.....</b>	<b>18</b>
3.3.1	Torque .....	18
3.3.2	Eficiência Volumétrica .....	19
3.3.3	Pressão Média Efetiva .....	20
3.3.4	Pressão Média de Atrito .....	20
3.3.5	Consumo Específico .....	20
<b>3.4</b>	<b>GT-Power .....</b>	<b>20</b>
3.4.1	Simulação de Cadeia Cinemática .....	21
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>23</b>
<b>4.1</b>	<b>Definição Modelo Analisado .....</b>	<b>23</b>
<b>4.2</b>	<b>Obtenção de Dados a Partir de Modelos Definidos .....</b>	<b>24</b>
<b>4.3</b>	<b>Simulação em Cadeia Cinemática a Partir dos Dados Obtidos .....</b>	<b>26</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>31</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>37</b>
<b>6.1</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>37</b>
<b>6.2</b>	<b>Trabalhos Futuros .....</b>	<b>37</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>38</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados uma contextualização do problema, os objetivos gerais e específicos do trabalho e uma breve apresentação do trabalho.

### 1.1 Contextualização do Problema

Os automóveis desde sua criação e a partir de sistemas de produção que possibilitaram a produção em massa teve sua popularização sendo até hoje um dos principais meios de transporte, estando presente em todo o mundo movimentando pessoas e carga. Estima-se em 2018 no Brasil uma frota de quase 37 milhões de automóveis onde entre os licenciados no ano mais de 99,8% contam com propulsão a motor de combustão interna (ANUÁRIO DA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA BRASILEIRA, 2019). Devido a grande escala, um aumento de eficiência desse meio de transporte é desejado, trazendo benefícios para a sociedade por meio de redução de gastos de recursos energéticos, alguns não renováveis, de emissões e de custos. A indústria automotiva possui uma constante demanda por avanços tecnológicos e fazem um alto investimento em busca de um aumento de eficiência dos automóveis devido a competitividade do mercado e demandas dos estados por meio de legislações que impõem limite de emissão de poluentes e maiores taxas para veículos que consomem mais combustível (BRUNETTI, 2012b).

Entre outros fatores, a eficiência do motor a combustão interna é também influenciada pelo funcionamento do sistema de admissão de ar, que afeta a capacidade de produção de potência em função da quantidade de oxigênio disponível para a combustão. O projeto desse sistema é estudado e otimizado considerando efeitos como o reflexo de ondas de pressão que percorrem o coletor de admissão que através de parâmetros do sistema pode ser obtido um aumento da eficiência volumétrica do motor ao sincronizar as ondas de pressão com o tempo de ciclo do motor (HOAG; DONDLINGER, 2016). Esta sincronização fica limitada devido ao motor operar em uma extensão de velocidades e o tempo de reflexão de onda ser atrelado a geometria do coletor, onde em sua configuração mais comum possui comprimento fixo, fazendo que este efeito de ganho de eficiência ocorra apenas para uma faixa de velocidades do motor. Um coletor variável contorna esta limitação ajustando seu comprimento para diferentes velocidades de operação do motor, tendo ganhos de eficiência para diferentes faixas de velocidade do motor.

O uso de ferramentas computacionais no projeto de um motor de combustão interna possibilita uma diminuição de custo e tempo de projeto, sendo utilizados para análise de componentes antes mesmo da necessidade da construção para prototipagem, sendo utilizado em conjunto com as experiências passadas nas primeiras etapas do desenvolvimento e continuamente com auxílio de dados coletados a partir de experimentos utilizando o motor estudado (HOAG; DONDLINGER, 2016). Este estudo utiliza o *Softwares* de simulação *Computational Fluid Dynamics* (CFD) 1D GT-Power, o qual tem sua utilização difundida na indústria, fazer uma análise comparativa do consumo de combustível utilizando um coletor de admissão de ar de geometria variável proposto por Silva (2019) em relação ao coletor original a partir de uma simulação da cadeia cinemática em condições de uso real definida usando curvas de operação padronizadas, perfis de velocidade do veículo ao longo do tempo, utilizadas em testes de consumo, complementando assim o estudo que observa o motor como um componente isolado.

## **1.2 Objetivos Gerais**

Realizar um estudo comparativo de eficiência entre um motor de combustão interna com sistema de coletor de admissão de comprimento fixo e um de comprimento variável por meio de simulações de cadeia cinemática, definida a partir de modelo de motor de combustão CFD 1D, utilizando curvas de operações reais de testes de consumo.

## **1.3 Objetivos Específicos**

- a) Definir modelos 1D de sistema de admissão de geometria variável e de controle;
- b) Gerar curvas de desempenho do motor para modelos definidos;
- c) Realizar simulações para modelos definidos utilizando as curvas de desempenho e curvas de operação de testes padronizados;
- d) Analisar os resultados obtidos e qualidades do coletor de admissão variável.

## 1.4 Apresentação do Trabalho

No capítulo 1, é apresentado o trabalho, o problema abordado e os objetivos.

No capítulo 2, é feita uma revisão bibliográfica, mostrando estudos da influência do sistema de admissão de ar e sua influência na performance do motor a combustão interna, ajudando a contextualizar o trabalho em relação a outros estudos e o estado da arte.

No capítulo 3, é apresentada a fundamentação teórica, nele são abordados conceitos e parâmetros de motores de combustão interna, de sistemas de admissão e da ferramenta de simulação GT-Power.

No capítulo 4, é mostrada a metodologia detalhando a obtenção de dados para definir os modelos de motor na cadeia cinemática e sua simulação utilizando ciclos de operação padronizados.

No capítulo 5, é feita a análise dos resultados, onde são mostrados os dados utilizados para definir o modelo na cadeia cinemática e os valores de consumo de combustível calculados a partir do teste de consumo *Environmental Protection Agency* (EPA) 5 ciclos.

No capítulo 6, são apresentadas as conclusões do trabalho e sugestões para estudos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A busca por ganhos de eficiência não é apenas desejado pela situação global atual de preocupação em reduzir emissões e limites de disponibilidade de recursos não renováveis como também é alinhado com a busca da indústria por melhorias contínuas e do mercado consumidor sempre mais exigente. Esse contexto é observado pelos investimentos e o número de estudos científicos sendo desenvolvidos na área.

Cavaglieri (2014) estudou o fluxo nos coletores de admissão e seu fenômeno pulsante da pressão devido ao movimento do pistão utilizando de modelagens teóricas e testes experimentais, mostrando a importância do coletor e os efeitos acústicos que ocorrem nele, podendo serem usados para ganhar desempenho no motor. Costa, Hanriot e Sodré (2014) observaram uma relação entre a geometria do coletor de admissão e o desempenho do motor a partir de testes experimentais. O estudo não mostrou uma clara influencia sobre o consumo específico de combustível e eficiência térmica, mas para eficiência volumétrica foi observado melhoras para baixas velocidades do motor ao utilizar tubos de pequeno diâmetro e longo comprimento e para altas velocidades utilizando tubos de grande diâmetro e curtos comprimentos.

Potul, Nachnolkar e Bhave (2014) estudaram o fenômeno de ondas e como usá-las para obter melhoras na performance do motor, utilizando a teoria presente em ressonadores de Helmholtz chegaram a 3 valores de comprimento de *runners* para diferentes velocidades de um motor 4 tempos de 1 cilindro, verificando a partir de simulações no *software Lotus Engine Simulation* os efeitos das geometrias nos parâmetros de performance do motor, também construíram um modelo de coletor de geometria variável utilizando um mecanismo pinhão cremalheira e um microcontrolador Arduíno. Bayas Jagadishsingh e Jadhav (2016) utilizaram o mesmo *software* para verificar a partir de simulações o efeito na eficiência volumétrica para um coletor de geometria variável calculado com base na teoria *Chrysler Ram* e Ressonador de Helmholtz, verificando melhoras no torque do motor considerando como um componente isolado, o estudo também utilizou de testes experimentais onde comparou a configuração original e a geometria proposta medindo ganhos na utilização da segunda.

Vichi et al. (2015) utilizando um software de simulação 1D Wave, a partir de modelos verificaram a utilização de um plenum, câmara de ar entre a válvula do

acelerador e a entrada de ar do motor, para contornar perdas de potência no motor devido a uma regra da competição Formula SAE que exige a utilização de um restritor de fluxo no coletor de admissão, também propondo a utilização de um coletor de geometria variável onde seu funcionamento suprime o plenum para certas condições de funcionamento de motor a fim de diminuir o efeito colateral de diminuição de tempo de resposta do motor devido a câmara de ar. A efetividade da solução foi verificada a partir de um modelo numérico que integrou a do veículo a do motor em uma simulação em condições de teste de aceleração no modelo do realizado na competição.

Souza et al. (2019), Alves et al. (2017), Silva, Ochoa e Henríquez (2019) e Silva (2019) utilizaram o software GT-Power para estudar coletores de geometria variável. Souza et al. (2019) propuseram um coletor de admissão para um motor de 4 tempos 4 cilindros com ganhos de 6% na eficiência volumétrica e 3.68 kW de potência em testes numéricos para a velocidade do motor de 3500 RPM, eles utilizaram o software para simulações de 3 geometrias de coletor e verificaram uma diferença satisfatória entre resultados obtidos a partir de testes experimentais para as mesmas configurações. Alves et al. (2017) a partir do modelo de um motor 4 tempos de 1 cilindro utilizaram o software *modeFrontier* para otimizar os parâmetros de comprimento e diâmetro dos runners do coletor de admissão de ar para 5 velocidades de rotação do motor utilizando o efeito de tuning para obter um melhor desempenho do motor para cada velocidade, e propôs um modelo de coletor geometria variável utilizando os 3 parâmetros encontrados buscando a melhor curva de desempenho do motor a longo de todas as suas velocidades, pensando seu funcionamento em 3 estágios variando a geometria do coletor a partir da abertura e fechamento de válvulas. Silva (2019) propôs um coletor de geometria variável de 3 estágios para um motor de 4 cilindros a partir de simulações do motor utilizando 11 velocidades de rotação diferentes na situação de aceleração de plena carga, através de uma operação de otimização por meio de ferramentas disponibilizadas pelo GT-Power, obteve para cada velocidade um comprimento de runners que maximiza a eficiência volumétrica, destes valores 3 comprimentos foram selecionados para compor os estágios do coletor variável, observando com essa configuração, a partir de simulações onde o motor é estudado como um componente isolado, ganhos de eficiência volumétrica e torque ao longo de toda o alcance de operação do motor.

Ma et al. (2019) utilizaram o método cadeias de Markov junto com uma grande quantidade de dados de veículos obtidos a partir do conector On-Board Diagnostic 2

(OBD2) para gerar perfis de velocidade para testes de consumo e emissões que melhor representasse condições de uso real baseado no tráfego chinês, Benajes et al. (2018) compararam a performance e emissões por meio de simulação em cadeia cinemática pelo software GT-Power com o motor definido a partir de dados de dinamômetro para duas configurações de combustão dual-mode em testes padronizados. Bishop et al. (2016) propuseram um método de geração de mapas de consumo de combustível e emissão do motor a partir de dados extraídos do veículo durante seu uso pelo OBD e portable emissions measurement systems e analisou sua acurácia para 3 veículos testados.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são abordados os conceitos de motor de combustão interna, sistema de admissão de ar de motor de combustão interna, parâmetros de motor de combustão interna e do *software* GT-Power.

#### 3.1 Motor de Combustão Interna

Motores podem ser definidos como dispositivos capazes de transformar energia em trabalho, tendo como objetivo transformar, de forma eficiente, a energia química disponível no combustível em energia mecânica por meio da reação exotérmica da combustão (HOAG; DONDLINGER, 2016). O trabalho é gerado a partir de um fluido denominado fluido ativo no qual os motores de combustão interna são caracterizados pela participação direta dele na combustão, sendo formado pela mistura ar e combustível na admissão e produtos da combustão na exaustão (BRUNETTI, 2012a).

Motores de combustão interna podem ser classificados pela forma que o trabalho mecânico é obtido, havendo um destaque para os motores alternativos, que por meio de um mecanismo de biela-manivela transforma o movimento alternativo do pistão em movimento rotativo no virabrequim (BRUNETTI, 2012a), podemos também classificar pelo número de tempos do ciclo de operação sendo atualmente a configuração de 4 tempos a de maior relevância, onde o ciclo é separado nos tempos de admissão, compressão, expansão e escape. Cada tempo foi descrito por Heywood (1988) como:

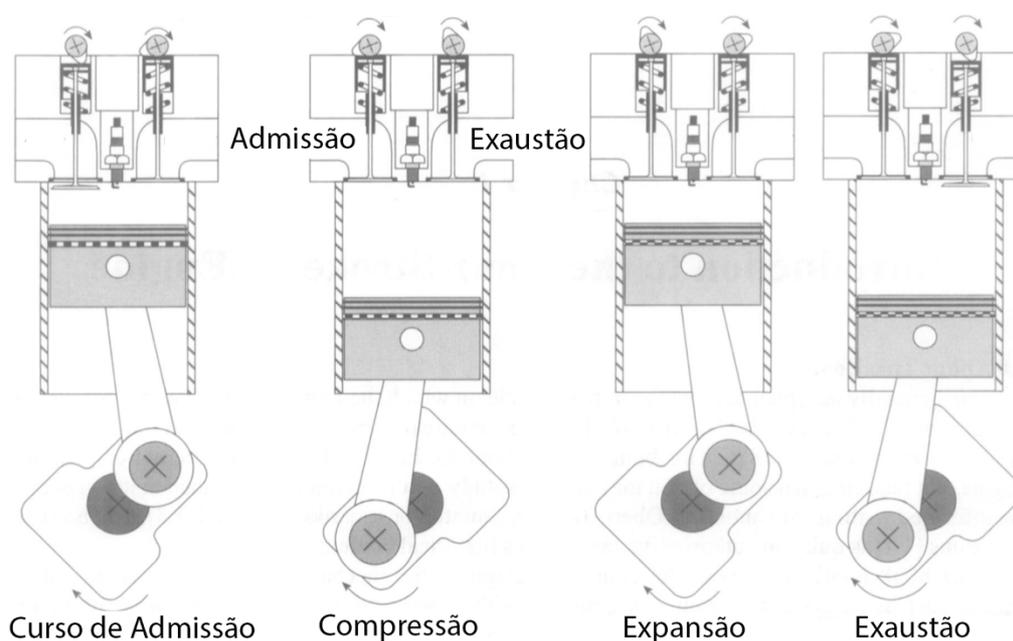
- a) Tempo de admissão se inicia com o pistão em ponto morto superior (PMS) e tem fim no ponto morto inferior (PMI) em conjunto com a válvula de admissão aberta esse deslocamento aumenta o volume do cilindro ocorrendo a entrada do fluido ativo.
- b) Tempo de compressão ocorre com o curso do pistão do PMI ao PMS tendo as válvulas fechadas causando uma diminuição do volume do cilindro gerando uma compressão do fluido ativo, por fim se dá início a combustão aumentando a pressão rapidamente.
- c) Tempo de expansão com início no PMS e fim no PMI, onde a compressão e a combustão levam o fluido ativo a alta temperatura e pressão empurrando o pistão realizando trabalho cerca de 5 vezes maior do que o pistão durante

a compressão, havendo abertura da válvula de exaustão próximo ao fim do curso.

- d) Tempo de escape com a válvula de exaustão aberta o fluido ativo, agora formado de produtos de combustão, é extraído do cilindro pela diferença de pressão e pelo movimento do pistão do PMI para o PMS, próximo ao fim do curso a válvula de admissão é aberta e o ciclo se reinicia.

A Figura 1 mostra os tempos do ciclo de um motor de combustão interna de 4 tempos.

Figura 1 - Ciclo do Motor de Combustão Interna de 4 Tempos



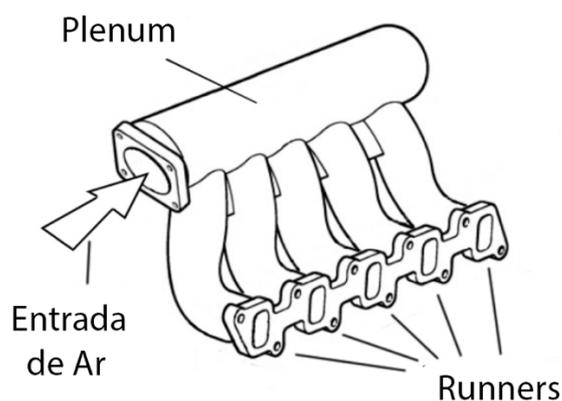
Fonte: Adaptado de Blair (1999)

### 3.2 Sistema de Admissão de Ar de Motor de Combustão Interna

O sistema de admissão de ar fornece para o motor a carga de ar necessária para desenvolver seu ciclo, devendo maximizar a massa de ar admitida por ciclo e distribuir uniformemente entre os cilindros (HEYWOOD, 1988). É composto pelo filtro de ar, corpo de borboleta e coletor de admissão, sendo o corpo de borboleta responsável pela aceleração do motor ao restringir o fluxo de ar. O coletor de admissão, mostrado na Figura 2, possui um *plenum*, uma câmara de ar localizada após o corpo de borboleta, e *runners* que são dutos que conectam o *plenum* até as válvulas de admissão.

Parâmetros como o diâmetro, o comprimento dos condutos e o volume do *plenum* possuem influência sobre os efeitos aerodinâmicos e acústicos do fluxo de ar, sendo dimensionados com o objetivo de melhorar o desempenho do motor a partir de uma sintonização dos efeitos atuantes em uma prática chamada de *tuning*.

Figura 2 - Diagrama de Coletor de Admissão



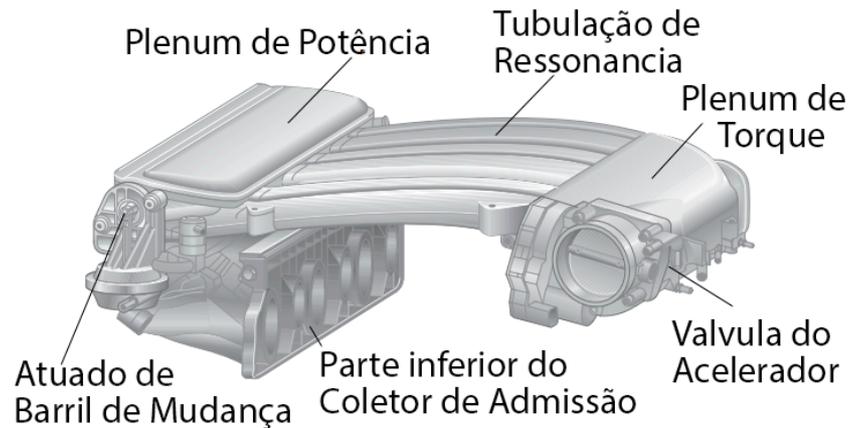
Fonte: ALVES (2017)

### 3.2.1 Coletor de Geometria Variável

O tempo do ciclo do motor tem sua duração relativa à velocidade do motor, sendo assim os ganhos de desempenho relacionados ao *tuning* do motor tem efeito apenas para certa faixa de velocidade do motor. O coletor de geometria variável funciona alterando o comprimento dos *runners* para diferentes velocidades do motor assim podendo aproveitar os efeitos da sintonização ao longo da faixa de operação do motor.

A Figura 3 mostra um coletor de geometria variável de motores VR da Volkswagen, que tem a partir da ação de um atuador que ao posicionar um barril de mudança dá acesso da tubulação a uma câmara de ar mais próxima a entrada de ar dos cilindros efetivamente modificando o comprimento efetivo dos *runners*.

Figura 3 - Coletor de Admissão Variável de Motor VR



Fonte: Adaptado de VOLKSWAGEN AG (1998)

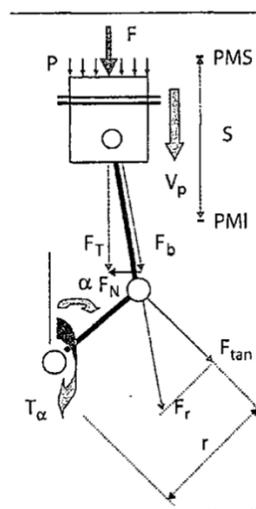
### 3.3 Parâmetros de Motor de Combustão Interna

#### 3.3.1 Torque

Torque é uma medição da capacidade do motor de realizar trabalho (HEYWOOD, 1988). É o momento torçor médio positivo do motor em funcionamento, obtido através da conversão de força exercida no pistão a partir da pressão no cilindro da combustão variando a em função da rotação e da mistura combustível e ar disponível (BRUNETTI, 2012a).

A Figura 4 mostra as forças e momentos que atuam no mecanismo biela-manivela como usado para no conjunto pistão e virabrequim.

Figura 4 - Diagrama de Forças Biela-Manivela



Fonte: Brunetti (2012a)

O momento no virabrequim é dependente área do pistão, seu curso e a pressão sobre ele. Sendo a área e o curso fixos faz com que o torque seja diretamente relacionado a pressão média sobre o pistão (SMITH; WENNER, 1954). O torque pode ser medido a partir da aplicação de um momento externo resistente, podendo ser obtido através de um dinamômetro (BRUNETTI, 2012a).

### 3.3.2 Eficiência Volumétrica

A eficiência volumétrica é calculada pela proporção da massa de ar que é admitida durante o tempo de admissão sobre o volume deslocado pelo pistão vezes a massa específica da atmosfera (BRUNETTI, 2012b).

$$\eta_v = \frac{2 * \dot{m}_e}{\rho_e * V_{cilindros} * n} \quad (3.1)$$

A Equação 3.1 mostra o cálculo da eficiência volumétrica ( $\eta_v$ ) onde o 2 é devido ao ciclo do motor de 4 tempos ter 2 rotações de duração, o  $\rho_e$  é a densidade do fluido ativo admitido nas condições ambiente, o  $V_{cilindros}$  é o volume deslocado pelo pistão,  $n$  é a rotação do motor e  $\dot{m}$  é a vazão mássica que é admitido pelo motor (BRUNETTI, 2012b).

### 3.3.3 Pressão Média de Efetiva

Pressão média efetiva ( $Pm_e$ ) ou *brake mean effective pressure (BMEP)* em inglês, é uma medida de pressão média ao longo do ciclo do motor que aplicada a mudança de volume em um curso dos cilindros resulta na potência efetiva produzida pelo motor no ciclo (BRUNETTI, 2012a).

A Equação 3.2 mostra a relação da pressão média efetiva onde  $x$  é o número de revoluções por curso de expansão,  $N_e$  é a potência efetiva,  $V$  é a cilindrada e  $n$  velocidade de rotações (BRUNETTI, 2012a).

$$Pm_e = \frac{x * N_e}{V * n} \quad (3.2)$$

### 3.3.4 Pressão Média de Atrito

Pressão média de atrito ( $Pm_a$ ) ou *friction mean effective pressure (BMEP)* em inglês, é uma medida de pressão média ao longo do ciclo do motor que aplicada a mudança de volume em um curso dos cilindros resulta na potência perdida devido aos efeitos de atrito produzidos pelo motor no ciclo (BRUNETTI, 2012a).

A Equação 3.3 mostra a relação da pressão média efetiva onde  $x$  é o número de revoluções por curso de expansão,  $N_a$  é a potência de atrito,  $V$  é a cilindrada e  $n$  velocidade de rotações (BRUNETTI, 2012a).

$$Pm_a = \frac{x * N_a}{V * n} \quad (3.3)$$

### 3.3.5 Consumo Específico

O consumo específico ( $C_e$ ) ou *brake specific fuel consumption (BSFC)* em inglês, é uma medição da eficiência do motor em transformar combustível em trabalho, sendo obtido pela relação entre vazão mássica de combustível ( $\dot{m}_c$ ) e a potência efetiva ( $N_e$ ) (HOAG; DONDLINGER, 2016) e (BRUNETTI, 2012a).

A Equação 3.4 mostra a relação do consumo específico (BRUNETTI, 2012a).

$$C_e = \frac{\dot{m}_c}{N_e} \quad (3.4)$$

## 3.4 GT-Power

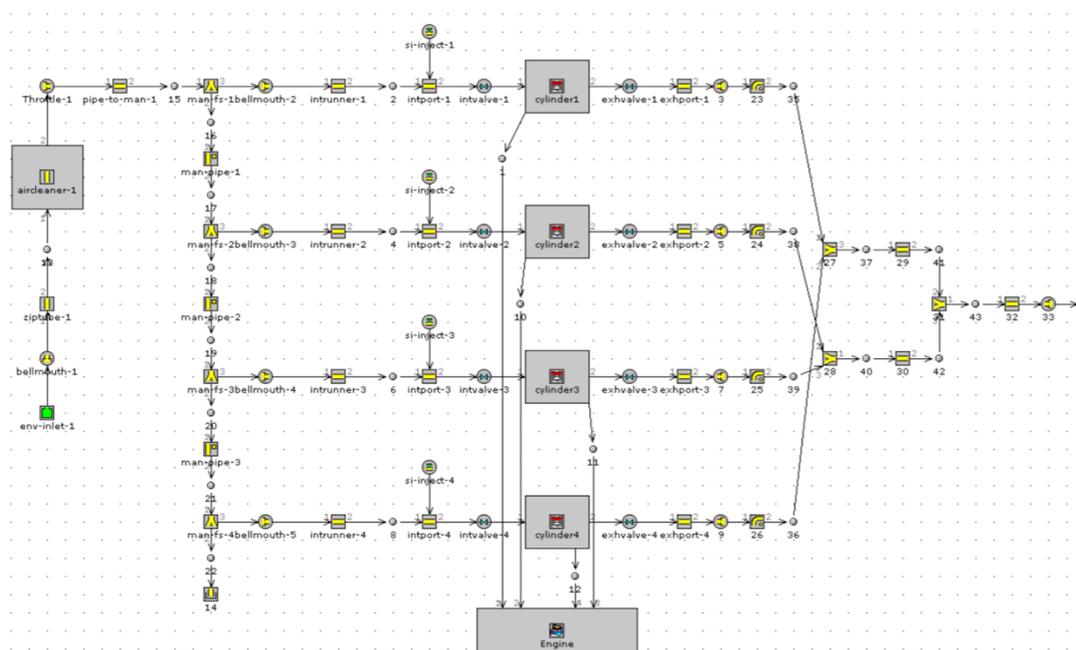
O *GT-Power* é um *software* de simulação de motores da *Gamma Technologies*, o uso de simulações a partir de modelos matemáticos de fenômenos que regem o funcionamento do motor permite a indústria otimizar seu projeto através de modelos antes da necessidade de construção do componente, reduzindo custos e aumentando a velocidade do desenvolvimento (KMEC; KASSEBAUM; NOERENBERG, 2009). A simulação 1D pode aumentar a chance de sucesso de um projeto utilizando equações e conceitos permitindo estudar os parâmetros geométricos do motor com precisão

gerando um protótipo virtual. Também sendo possível acoplar modelos tridimensionais de escoamento (BRUNETTI, 2012b).

O software possui uma interface o *GT-ISE (Integrated Simulation Environment)* onde o modelo é construído a partir da colocação de blocos para cada componente em um ambiente bidimensional e suas características são introduzidas. Os componentes são conectados criando um mapa do projeto, nessa interface as simulações podem ser programadas e calculadas (GAMMA TECHNOLOGIES, 2016b).

A Figura 5 mostra um modelo de motor de 4 cilindros de combustão por faísca no *GT-ISE*.

Figura 5 - Modelo de Motor 4 Cilindros



Fonte: Gamma Technologies (2014)

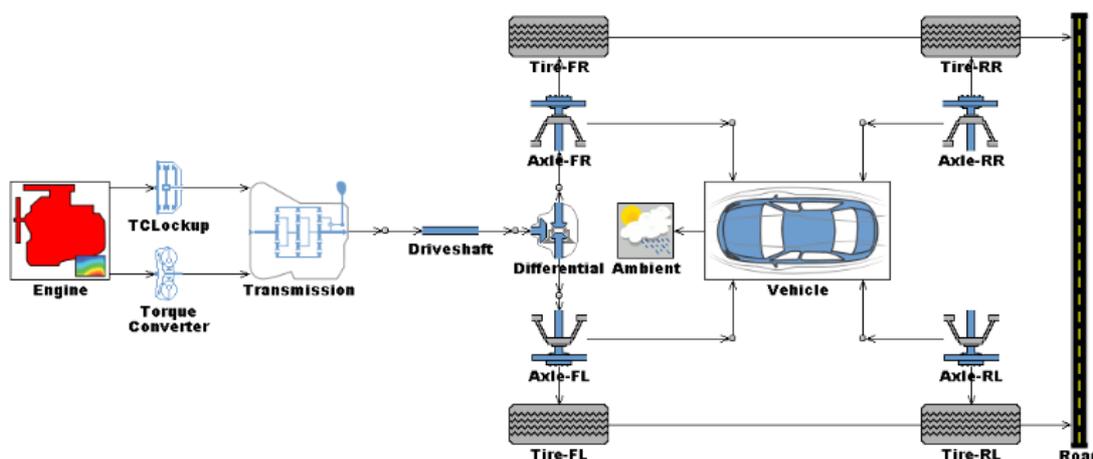
A interface *GT-POST* também está disponível, possuindo uma interface gráfica que a partir dos dados de simulação obtidos ele exibe seus resultados, podendo visualizar graficamente e comparar diferentes simulações.

### 3.4.1 Simulação de Cadeia Cinemática

O *software* GT-Power permite a simulação da cadeia cinemática a partir de um modelo composto pelos componentes da cadeia. Os componentes como motor, veículo, transmissão, eixos e outros necessários para construir o modelo são definidos e conectados assim definindo o comportamento cinemático do conjunto. Com a cadeia cinemática definida é possível a realização de simulações dinâmicas sobre o veículo a partir de adição de energia pelas fontes como o motor e perdas a partir de resistências e freios controladas pelo usuário. Um componente motorista pode ser adicionado ao modelo cuidando na simulação do controle de acelerador e freio para obter um comportamento definido pela velocidade do veículo (GAMMA TECHNOLOGIES, 2016b).

A Figura 6 mostra um modelo de cadeia cinemática no *software* GT-Power com componentes de Motor, veículo e transmissão.

Figura 6 - Modelo de Cadeia Cinemática



Fonte: Gamma Technologies (2016b)

## 4 METODOLOGIA

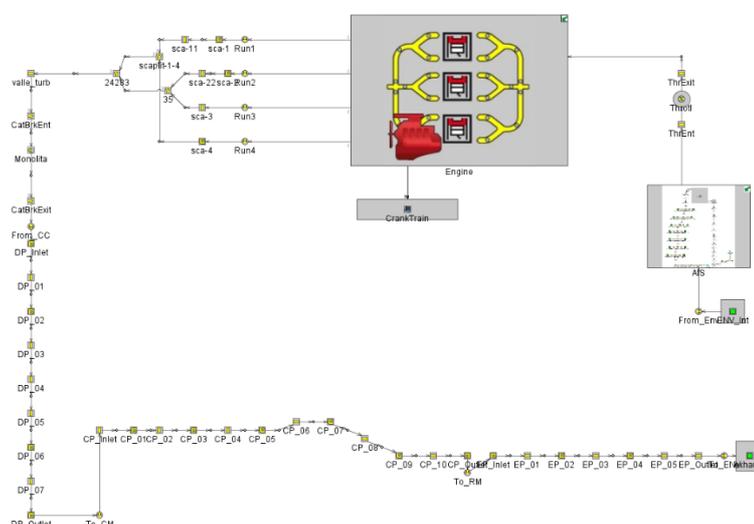
Neste capítulo é os métodos utilizados no trabalho se iniciando pela definição do modelo analisado, seguido da obtenção de dados a partir de modelos definidos e por fim a simulação em cadeia cinemática a partir dos dados obtidos.

### 4.1 Definição Modelo Analisado

Este trabalho tem origem como um complemento do trabalho desenvolvido por Silva (2019) que realizou uma análise e otimização do coletor de admissão de um motor Fiat Chrysler E.torQ 1.6L 16v, tendo como características esse motor uma aspiração natural, 4 cilindros e a utilização de combustível E22, uma mistura composta por 22% de Etanol e 78% de Gasolina. O estudo de Silva (2019) foi realizado a partir do desenvolvimento de um modelo 1D do motor E.torQ aspirado no *software* GT-Power derivado do modelo 1D do motor E.torQ turbo desenvolvido por Gervásio (2017) também no *software* GT-Power.

Este trabalho foi realizado utilizando o modelo desenvolvido por Silva (2019) mostrado na Figura 7, sendo ele utilizado em duas configurações, a primeira com a geometria do coletor de admissão fixa definida pelo comprimento dos *runners* de 400 mm, o segundo com o coletor de admissão variável proposto por Silva (2019) a partir da otimização do modelo buscando maximizar a eficiência volumétrica do motor. O coletor de geometria variável é definido por 3 fases com diferentes comprimentos para os *runners* mostrado na Tabela 1.

Figura 7 - Modelo GT-Power E.torQ 1.6L Aspirado



Fonte: Do Autor

Duas configurações do modelo são usados para permitir uma análise comparativa entre a geometria fixa e a geometria variável do coletor de admissão.

Tabela 1 - Comprimento dos runners do Coletor de Geometria Variável Proposto por Silva (2019)

Velocidade de Rotação	Comprimento <i>runners</i>
1000 a 2500 RPM	387,613 mm
2500 a 4500 RPM	584,921 mm
4500 a 6000 RPM	316,006 mm

Fonte: Do Autor

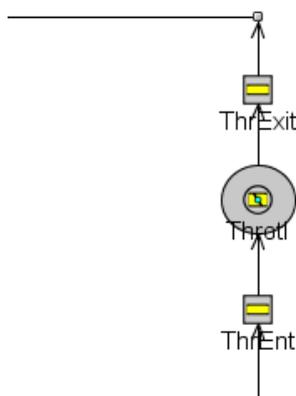
## 4.2 Obtenção de Dados a Partir de Modelos Definidos

O comportamento do motor vai ser modelado a partir de dados obtidos pela simulação dos modelos 1D para diferentes condições de funcionamento do motor em relação a sua velocidade de rotação e carga sendo aplicada.

Os critérios a seguir foram utilizados para estabelecer os casos de uma das simulações, sendo os principais parâmetros a velocidade de rotação do motor e o ângulo da borboleta do acelerador, que indiretamente define a posição do pedal do acelerador. Estes parâmetros estão modelados no GT-ISE como *rpm* e *throtang* para velocidade do motor e ângulo da borboleta respectivamente, e os casos foram definidos a partir de combinações de diferentes valores desses parâmetros. Para a velocidade de rotação do motor foram fixados valores começando em 1000 rotações por minuto até 6000 rotações por minuto em intervalos de 500 rotações por minuto e para cada velocidade do motor foi determinado um caso por valor de ângulo da borboleta começando por 90 graus, válvula de acelerador totalmente aberta ou pedal na posição totalmente pressionada, até 0 graus, válvula de acelerador totalmente fechada ou pedal de acelerador na posição inicial em intervalos de 9 graus, mais um caso para o valor de 4.5 graus para melhor modelar os pequenos ângulos. Estes critérios resultam em 132 casos cobrindo todo o alcance de velocidade de rotação e acelerador do motor, esses casos foram aplicados no GT-ISE para tanto o modelo com o comprimento original dos *runners* de 400 mm quanto ao modelo com o coletor de geometria variável proposto por Silva (2019).

A Figura 8 mostra a parte no modelo *Throtl* referente a borboleta de acelerador o qual tem seu valor modificado como especificado nos casos.

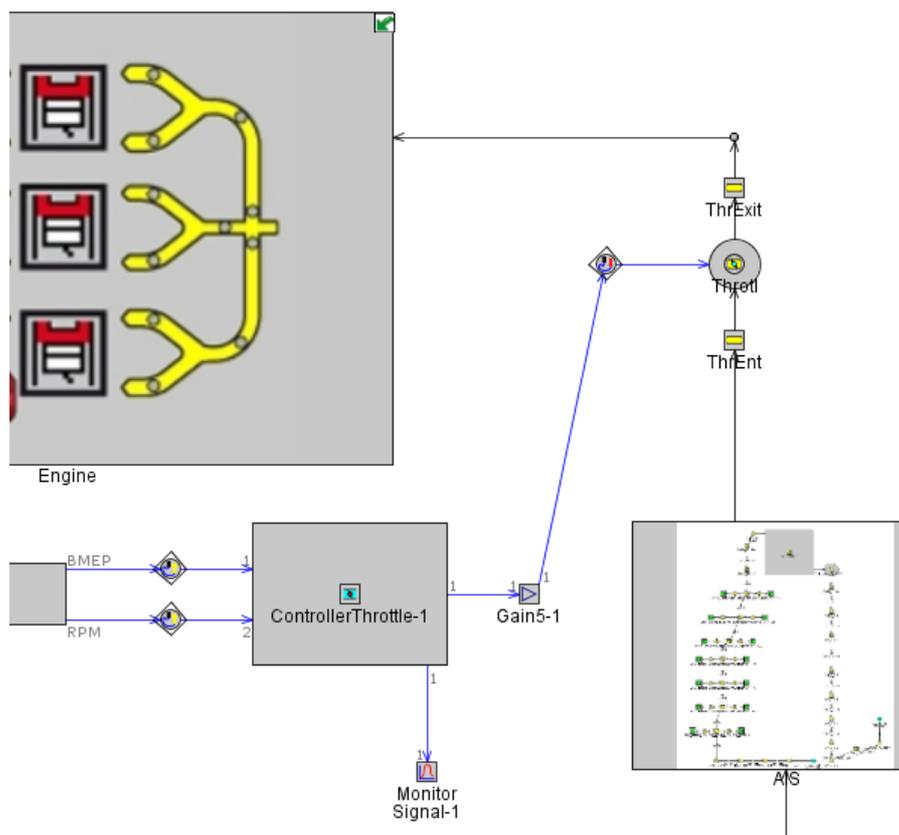
Figura 8 - Borboleta de Acelerador do Modelo no GT-ISE



Fonte: Do Autor

Também foram feitas simulações seguindo outros critérios a fim de obter mais dados de funcionamento do motor, a velocidade de rotação do motor foi um dos critérios com limites e intervalo igual definido na simulação anterior e para a carga aplicada ao motor foi utilizado o valor de BMEP em vez do ângulo da borboleta de aceleração para melhor coletar valores do motor ao longo de seu alcance de carga, os valores de BMEP para definir os casos foram de 0 bar até o valor de carga plena do motor para cada velocidade de rotação arredondado para cima em intervalos de 1 bar. O critério resultou em 135 casos para o modelo com dimensão de *runners* originais e 138 casos para o coletor de geometria variável, sendo a diferença entre os dois modelos devido ao diferente valor de BMEP para plena entre os modelos aos longos das velocidades de rotação do motor. Para se obter a carga desejada nas simulações foi adicionado um controle de ângulo de borboleta nos modelos no GT-ISE mostrado na Figura 9, controlando o ângulo da borboleta para que o valor de carga do motor na simulação seja a desejada.

Figura 9 - Controle de Borboleta de Acelerador no GT-ISE



Fonte: Do Autor

Foram realizados então para os dois modelos 4 simulações somando um total de 537 casos simulados, os resultados são armazenados podendo ser acessados a partir do *software* GT-POST.

### 4.3 Simulação em Cadeia Cinemática a Partir dos Dados Obtidos

Usando como base o modelo de exemplo disponível no *software* GT-ISE chamado *5\_Cycle\_Fuel\_Economy* que possui um modelo de cadeia cinemática configurado para realizar testes de consumo de combustível como definido pela agência de proteção americana EPA. O teste de consumo da *Environmental Protection Agency* (EPA) é composto por 5 ciclos definidos por curvas de velocidade do veículo em relação ao tempo, os ciclos são *Federal Test Procedure* (FTP), *Highway Fuel Economy Test* (HWFET), *US06 Supplemental Federal Test Procedure* (SFTP), *Speed-Correction03* (SC03) e *Cold FTP*, a Tabela 2 detalha as características destes ciclos. (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2006)

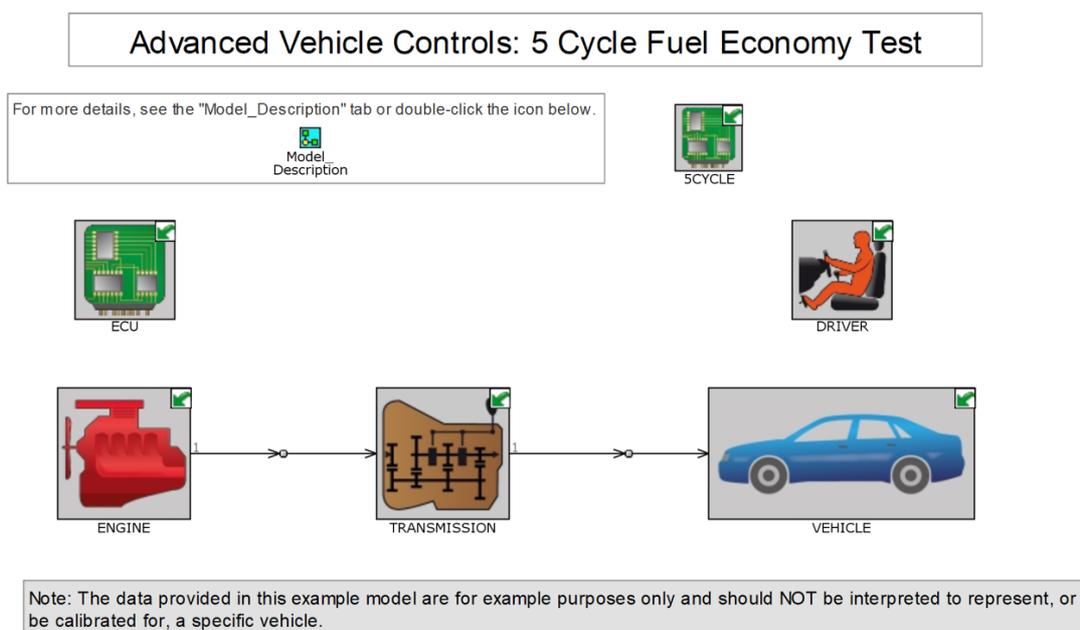
Tabela 2 - Características dos Ciclos do Teste EPA 5 Ciclos

Ciclo	Objetivo	Velocidade média	Temperatura Ambiente	Uso Principal
FTP	Condução Urbana	34 km/h	24 C	Emissões e Consumo
HFET	Condução Rural	77 km/h	24 C	Consumo
US06	Condução Agressiva	77 km/h	24 C	Emissões
SC03	Ar Condicionado	35 km/h	35 C	Emissões
Cold FTP	Baixas Temperaturas	34 km/h	-6.7 C	Emissões

Fonte: Adaptado de Environmental Protection Agency (2006)

A Figura 10 mostra o modelo exemplo no *software* GT-ISE. Este é composto pelas sub-montagens de motor, transmissão, veículo, motorista, modulo ECU e modulo 5-cycle.

Figura 10 - Modelo Cadeia Cinemática 5\_Cycle\_Fuel\_Economy no GT-ISE



Fonte: Do Autor

O modelo de exemplo foi usado como base para simulações de consumo dos modelos estudados a partir de modificações utilizando os dados coletados com as simulações da seção anterior para definir o motor no modelo da cadeia cinemática. Segundo o Gamma Technologies (2016b) o motor é definido pelo seu volume de deslocamento, inercia rotacional efetiva e mapa de performance mecânica, também podendo ser inseridos mapas secundários como fricção, consumo de combustível e emissões. O volume de deslocamento do motor é de  $1598.2 \text{ cm}^3$ , calculado utilizando a Equação 4.1 utilizando os valores da geometria dos cilindros definida no modelo,

diâmetro do cilindro (*bore*) de 77 mm e curso do pistão (*stroke*) de 85.8 mm e o número de cilindros no motor ( $n_{cilindros}$ ), 4.

$$Deslocamento = \frac{\pi * \left(\frac{bore}{2}\right)^2 * stroke * n_{cilindros}}{1000} \quad (4.1)$$

O valor de inercia rotacional efetiva utilizado foi o de  $0.3 \text{ kg.m}^2$ , este valor utilizado permite a realização da simulação sem que a velocidade de rotação de motor seja menor que o limite imposto pelo *software*, também foi introduzido a densidade do combustível utilizado no modelo do motor o E22 ( $\rho_{E22}$ ), composto por uma mistura de 22% de etanol e 78% de gasolina, o valor da densidade de  $757.7 \text{ kg/m}^3$  foi calculado a partir da Equação 4.2 utilizando a densidade do etanol ( $\rho_{etanol}$ ) de  $785 \text{ kg/m}^3$  e a densidade da gasolina ( $\rho_{gasolina}$ ) de  $750 \text{ kg/m}^3$ , valores disponíveis da biblioteca do *software*.

$$\rho_{E22} = \frac{22 * \rho_{etanol} + 78 * \rho_{gasolina}}{100} \quad (4.2)$$

O mapa de performance mecânica foi inserido utilizando os dados resultantes das simulações dos modelos dos motores, estes dados tem valores diferentes para o modelo com coletor original e o de coletor de geometria variável, foi criado um mapa para cada modelo com seus respectivos valores. O mapa é formado pelos valores de BMEP do motor para uma respectiva velocidade do motor e um respectivo valor do pedal de acelerador, os dados foram obtidos através das simulações utilizando o angulo da borboleta do acelerador especificado na seção anterior, sendo os valores de angulo convertidos para posição de pedal linearmente de 0 a 90 graus para 0 a 100%. O mapa de fricção foi obtido a partir de dados já disponíveis no modelo que definem a fricção resultante no motor em termos de pressão para a velocidade de rotação do motor. O mapa de consumo de combustível foi definido a partir dos dados resultantes das simulações como para o mapa de performance, também resultando em um mapa para o modelo de coletor de geometria fixa e um para o modelo de geometria variável, os dados utilizados é o fluxo de combustível em  $g/h$  para uma respectiva velocidade de rotação do motor e carga do motor em BMEP.

O componente motor possui também conectado a ele um componente de ar condicionado, este componente é modelado por um valor de perda de torque em função da velocidade, sendo os valores utilizados aqueles já definidos no exemplo presente no *software*. O componente é necessário para a realização do teste SC03 e seu funcionamento dado por um perfil indicando o tempo na simulação onde deve ser acionado.

Inseridos estes dados o motor do modelo foi implementado na cadeia cinemática a partir de suas características de funcionamento especificadas pelos dados. As outras partes da cadeia cinemática foram definidas a partir dos valores já definidos no exemplo *5\_Cycle\_Fuel\_Economy*.

O Gamma Technologies (2016b) especifica que para definir a transmissão é necessário definir os seguintes dados, as relações de transmissão, as eficiências de engrenagem, a estratégia de troca de marchas e inércia efetiva, foram utilizados os dados já definidos pelo modelo exemplo, sendo as características explicitadas pela Tabela 3 onde a velocidade de subida de marcha se refere a velocidade na qual irá realizar a troca de uma marcha mais baixa para a especificada e a velocidade de descida é onde irá realizar a troca da especificada para uma mais baixa. Para todas as marchas a inércia de entrada e saída foi definida como  $0,1 \text{ kg.m}^2$  e tempo de troca de marcha de  $0,3 \text{ s}$

Tabela 3 - Modelo de Transmissão Utilizado

Marcha	1	2	3	4	5
Relação de Transmissão	3.538	2.125	1.36	1.029	0.72
Eficiência de Engrenagem	0.9704	0.9776	0.9753	0.9752	0.9741
Subida de Marcha	-	36 km/h	60 km/h	80 km/h	100 km/h
Descida de Marcha	-	23 km/h	50 km/h	70 km/h	90 km/h

Fonte: Do Autor

Os demais dados necessários para definir a cadeia cinemática do veículo segundo o Gamma Technologies (2016b) foram usados os definidos no exemplo sendo os dados o torque máximo estático da embreagem de  $300 \text{ N.m}$ , a relação final de transmissão do diferencial de 3,55, eficiência de 0,97 e inércia de entrada e saída de  $0,001 \text{ kg.m}^2$ , pneus com raio de  $300 \text{ mm}$  e coeficiente de resistência a rolagem de

0,01, coeficiente de arrasto aerodinâmico do veículo de 0,31, área frontal de 0,8  $m^2$  e massa do veículo de 1500 kg.

O resultado desejado é de economia de combustível, combustível consumido por distância percorrida, o componente 5 *Cycle* realiza o cálculo do consumo de combustível utilizando as curvas de velocidade especificadas anteriormente em sequência de FTP20, FTP75, HFET, US06 e SC03 e realiza o processamento para obtenção dos dados de consumo urbano, consumo em estradas e consumo combinado, segundo as equações a seguir (GAMMA TECHNOLOGIES , 2016a):

A Equação 4.3 especifica a obtenção do valor de consumo combinado entre condução urbana e condução rural onde o cálculo individual destes são obtidos como especificado pelas Equação 4.4 e Equação 4.8 respectivamente.

$$\text{Combined } FE = 0,55 * \text{City } FE + 0,45 * \text{Higway } FE \quad (4.3)$$

A Equação 4.4 especifica a obtenção do valor de consumo para condução urbana onde os valores Start FE e Running FE são obtidos pelas equações Equação 4.5 e Equação 4.7 respectivamente.

$$\text{City } FE = 0,905 * \frac{1}{\text{Start } FC + \text{Running } FC} \quad (4.4)$$

A Equação 4.6 é utilizada para obter o valor das variáveis *Start Fuel<sub>x</sub>* presente na Equação 4.5, onde "Bag X FE<sub>y</sub>" é o consumo de combustível em milhas por galão, o valor de X representa o *bag* especificado do teste e y refere aos testes FTP20 ou FTP75.

$$\text{Start } FC = 0,33 * \frac{0,76 * \text{Start } Fuel_{75} + 0,24 * \text{Start } Fuel_{20}}{4,1} \quad (4.5)$$

$$\text{Start } Fuel_x = 3,6 * \left( \frac{1}{\text{Bag } 1 \text{ } FE_x} - \frac{1}{\text{Bag } 3 \text{ } FE_x} \right) \quad (4.6)$$

Para a Equação 4.7 os valores de US06 City FE, HFET FE e SC03 FE é dado pelo consumo de combustível em milhas por galão para os a porção de condução urbana do ciclo US06, o ciclo HFET e o ciclo SC03 respectivamente.

$$\begin{aligned} \text{Running FC} = & 0,82 * \left[ \frac{0,48}{\text{Bag 2 FE}_{75}} + \frac{0,41}{\text{Bag 3 FE}_{75}} + \frac{0,11}{\text{US06 City FE}} \right] + 0,18 \\ & * \left[ \frac{0,5}{\text{Bag 2 FE}_{20}} + \frac{0,5}{\text{Bag 3 FE}_{20}} \right] + 0,133 * 1,083 \\ & * \left[ \frac{1}{\text{SC03 FE}} - \left( \frac{0,61}{\text{Bag 3 FE}_{75}} + \frac{0,39}{\text{Bag 2 FE}_{75}} \right) \right] \end{aligned} \quad (4.7)$$

O valor para o consumo de combustível para condução rural é dado pelas equações a seguir:

$$\text{City FE} = 0,905 * \frac{1}{\text{Start FC} + \text{Running FC}} \quad (4.8)$$

Nota-se que a Equação 4.9 utilizada para o cálculo da condução rural tem valor diferente da Equação 4.5 utilizada na condução urbana, porem ambas utilizam a Equação 4.6 para obter o valor para *Start Fuel<sub>x</sub>*.

$$\text{Start FC} = 0,33 * \frac{0,76 * \text{Start Fuel}_{75} + 0,24 * \text{Start Fuel}_{20}}{60} \quad (4.9)$$

Para a Equação 4.10 os valores de US06 Highway FE, HFET FE e SC03 FE é dado pelo consumo de combustível em milhas por galão para os a porção de condução rural do ciclo US06, o ciclo HFET e o ciclo SC03 respectivamente.

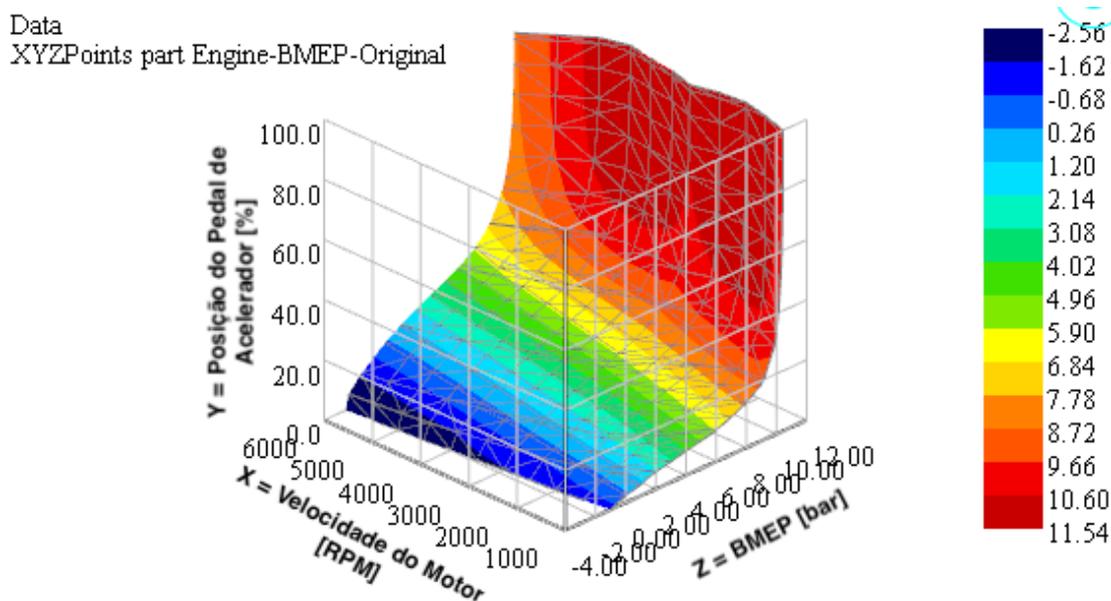
$$\begin{aligned} \text{Running FC} = & 1,007 * \left( \frac{0,79}{\text{US06 Highway FE}} + \frac{0,21}{\text{HFETFE}} + \frac{0,11}{\text{US06 City FE}} \right) \\ & + 0,133 * 0,377 * \left[ \frac{1}{\text{SC03 FE}} - \left( \frac{0,61}{\text{Bag 3 FE}_{75}} + \frac{0,39}{\text{Bag 2 FE}_{75}} \right) \right] \end{aligned} \quad (4.10)$$

## 5 RESULTADOS

Os resultados foram obtidos da simulação da cadeia cinemática a partir do *software* GT-ISE e disponibilizados através do uso do GT-POST, os dados de consumo de combustível são acessados a partir do componente *5\_Cycle*, os resultados são os valores de consumo do teste a partir dos 5 ciclos para condução urbana, rural e combinado, valores de consumo para cada ciclo. Os valores foram convertidos de milhas por galão para quilômetros por litro pelo *software* GT-ISE e depois importados para o *Microsoft Excel* para processamento.

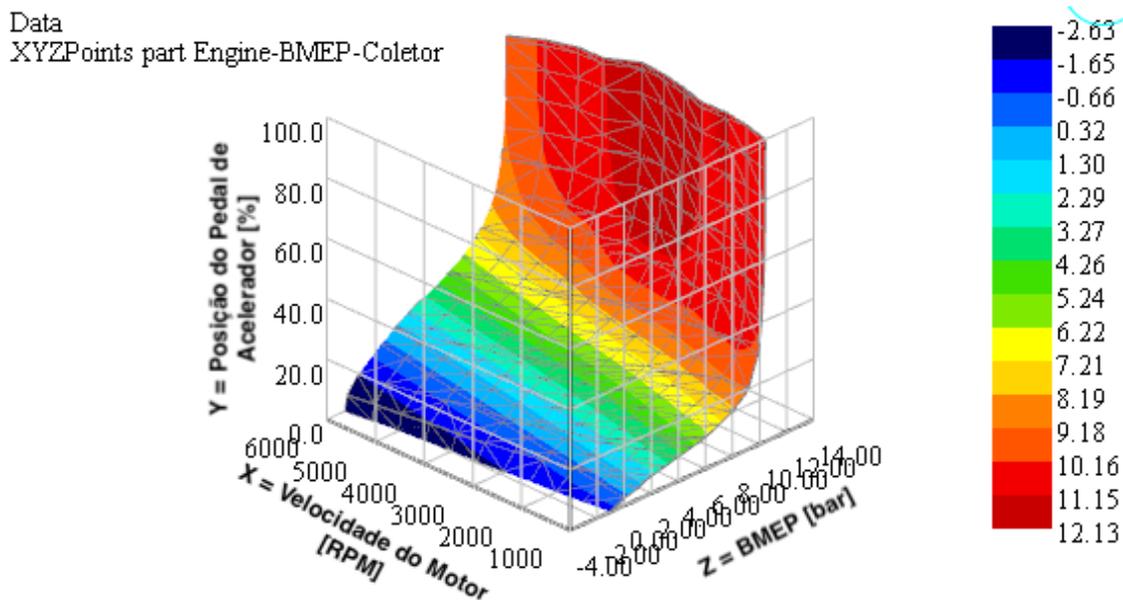
O motor na cadeia cinemática foi definido a partir dos resultados provenientes das simulações 1D do motor, a Figura 11 e Figura 12 são os mapas de performance mecânica dos motores com coletor original e de geometria variável respectivamente, estes foram obtidos através de interpolação de pontos com valores de potência do motor em pressão média efetiva medida em bar, representado pelas cores e pelo eixo Z, para cada combinação de velocidade do motor em RPM e posição do pedal de acelerador em valor percentual, representados pelos eixos X e Y.

Figura 11 - Mapa de Performance Mecânica do Motor - Coletor Original



Fonte: Do Autor

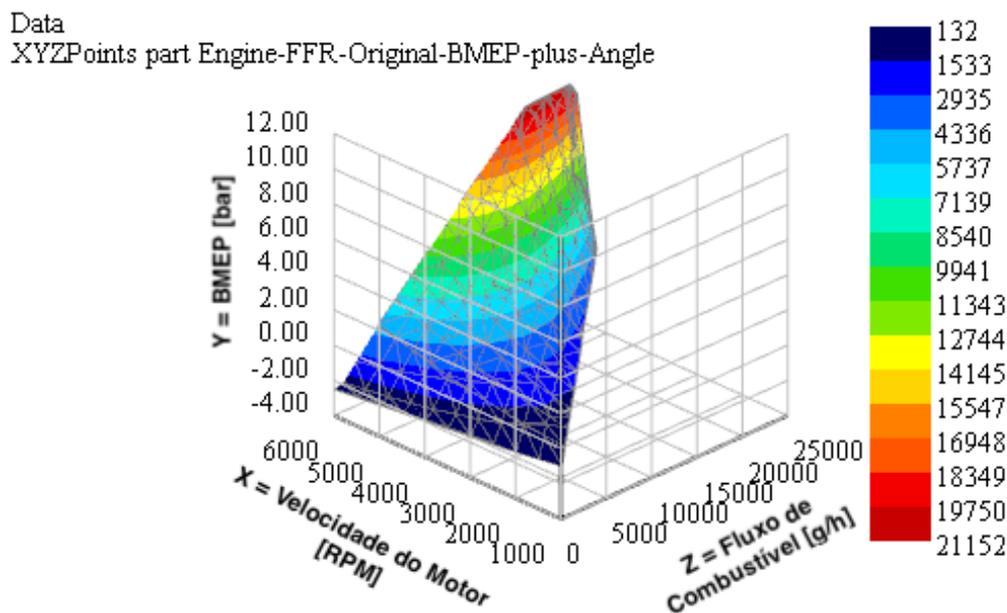
Figura 12 - Mapa de Performance Mecânica do Motor - Coletor Geometria Variável



Fonte: Do Autor

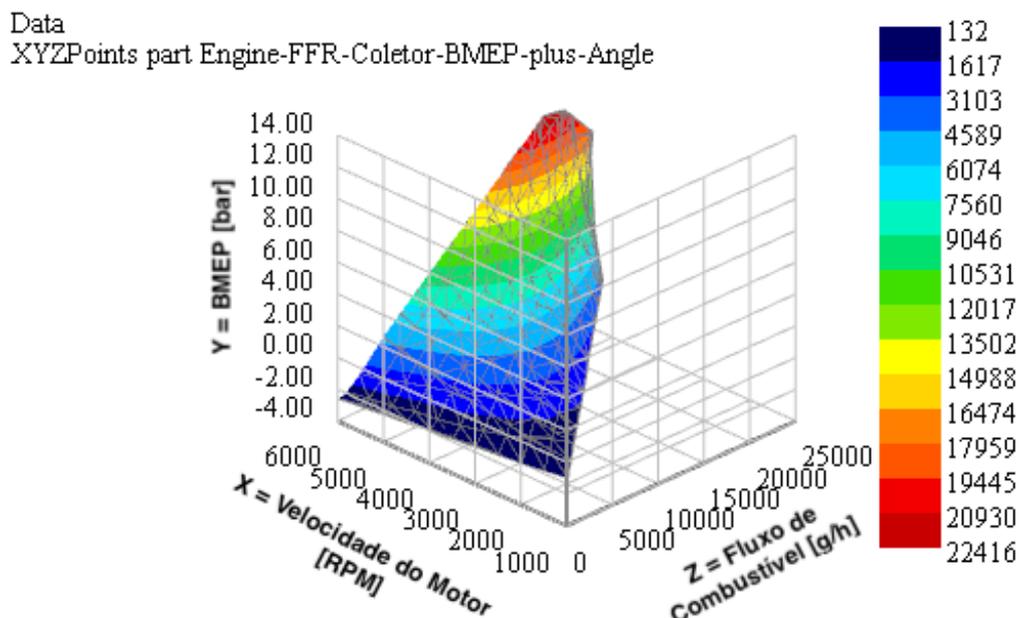
A Figura 13 e Figura 14 são mapas de consumo de combustível para as duas configurações de coletor também por meio de interpolação de pontos de dados de fluxo de combustível em g/h, representado pelas cores e pelo eixo Z, para cada combinação de velocidade do motor em RPM e carga do motor relativa à pressão média efetiva em bar, representados pelos eixos X e Y.

Figura 13 - Mapa de Consumo de Combustível - Coletor Original



Fonte: Do Autor

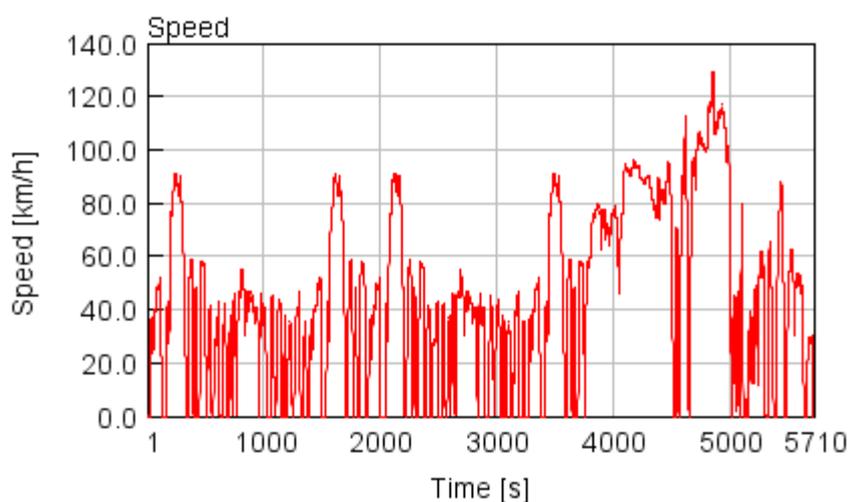
Figura 14 - Mapa de Consumo de Combustível - Coletor Geometria Variável



Fonte: Do Autor

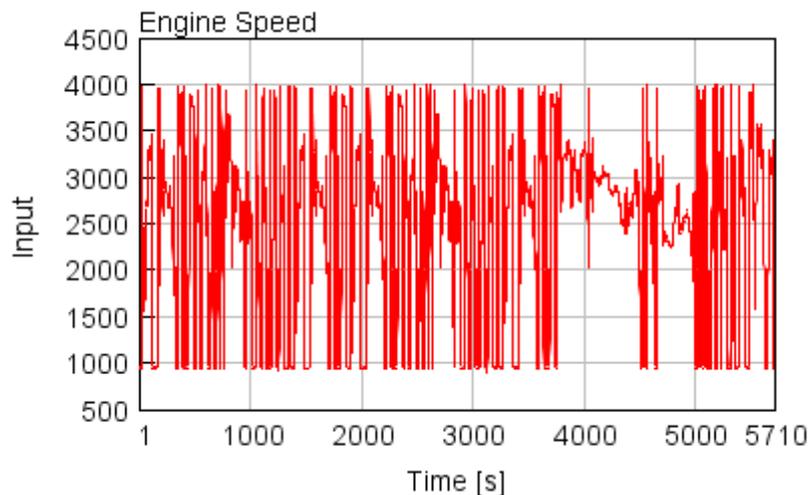
A Figura 15 e a Figura 16 mostram os gráficos de velocidade do veículo e de velocidade de rotação do motor ao longo do tempo durante a realização do teste EPA 5 ciclos, sendo o primeiro definido pelos ciclos que compõem o teste e o segundo não só pelos ciclos como também a transmissão e estratégia de mudança de marcha estabelecidos na cadeia cinemática.

Figura 15 - Velocidade do veículo Durante Teste EPA 5 Ciclos



Fonte: Do Autor

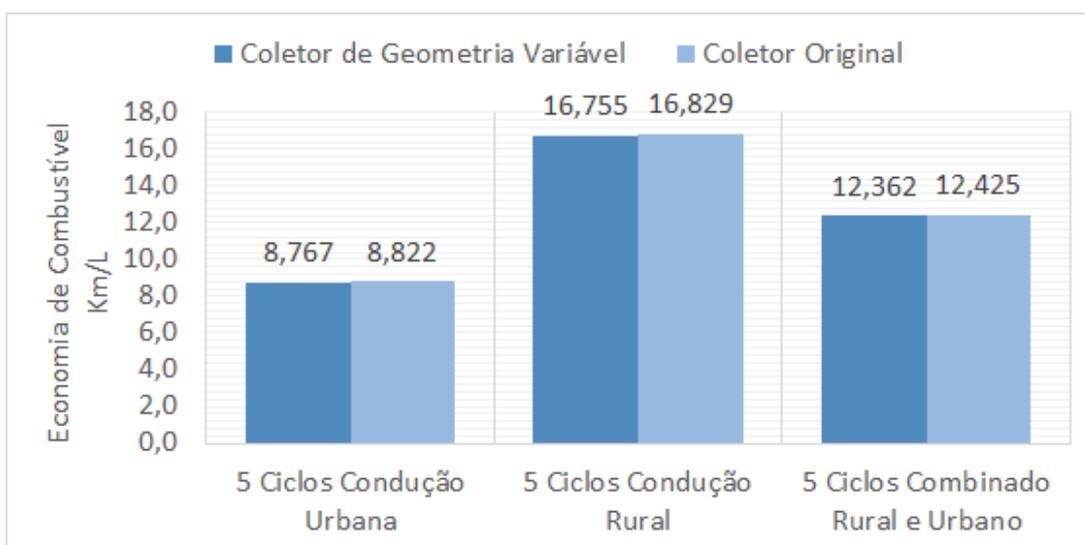
Figura 16 - Velocidade de Rotação do Motor Durante Teste EPA 5 Ciclos



Fonte: Do Autor

A Figura 17 dispõe o valor da economia de combustível para o teste EPA 5 ciclos obtido através da simulação, o motor com coletor de geometria variável teve um aumento no consumo em comparação com o coletor original, houve uma redução de 0,51% na economia de combustível, medido em Km/L, sendo a comparação para condução urbana e rural desassociadas resultando ambas em uma redução de 0,62% e 0,44% respectivamente.

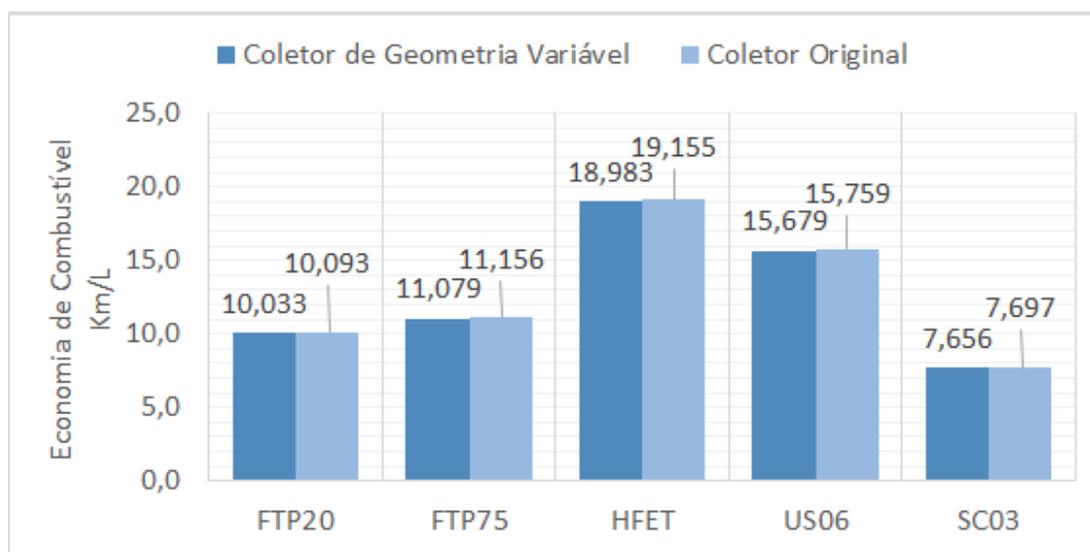
Figura 17 - Consumo para Teste EPA 5 Ciclos



Fonte: Do Autor

A Figura 18 mostra a economia de combustível para cada um dos 5 ciclos que compõem o teste, em todos é observado um aumento de consumo do motor com o coletor de geometria variável comparado ao com o coletor original, sendo para todos a redução na economia não maior que 1%. A menor redução foi observada no ciclo US06 e a maior no ciclo HFET.

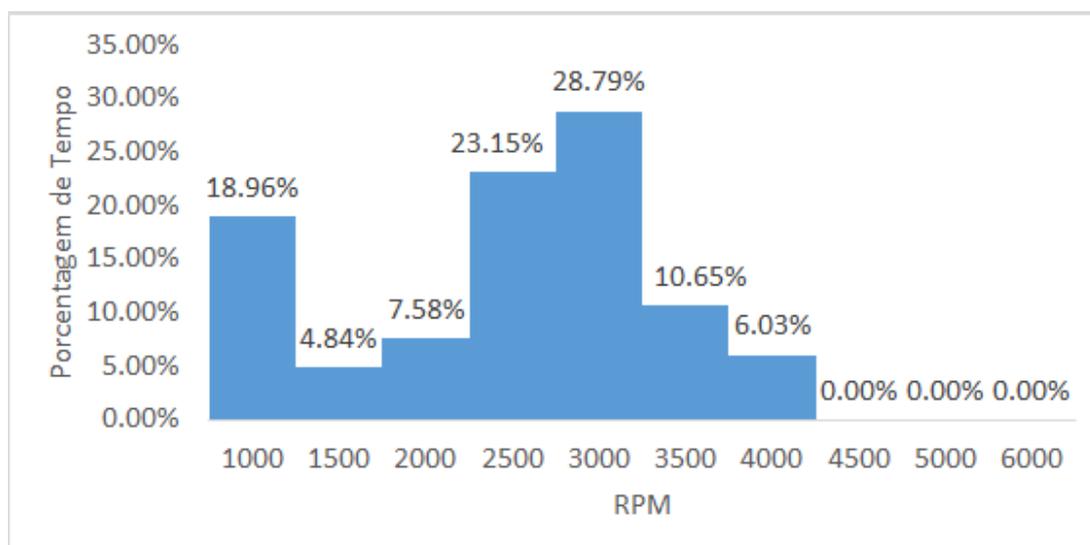
Figura 18 - Consumo para Ciclos Individuais do Teste EPA 5 Ciclos



Fonte: Do Autor

Os dados obtidos pela simulação do motor mostram como foi chegado a este resultado a partir das simulações em ciclos de uso, a Figura 19 mostra um histograma do tempo em que o motor esteve durante o teste composto pelos 5 ciclos em cada rotação do motor. Pelo histograma podemos ver que a maior porção do tempo durante os testes o motor está funcionando a uma velocidade de rotação próximo aos 3000 RPM em seguida pela rotação de 2500 RPM, duas informações também mostradas são que em nenhum momento durante o teste o motor tem sua rotação acima da faixa dos 4000 RPM e que a terceira maior parte do tempo ele fica na faixa dos 1000 RPM, considerado o *idle*.

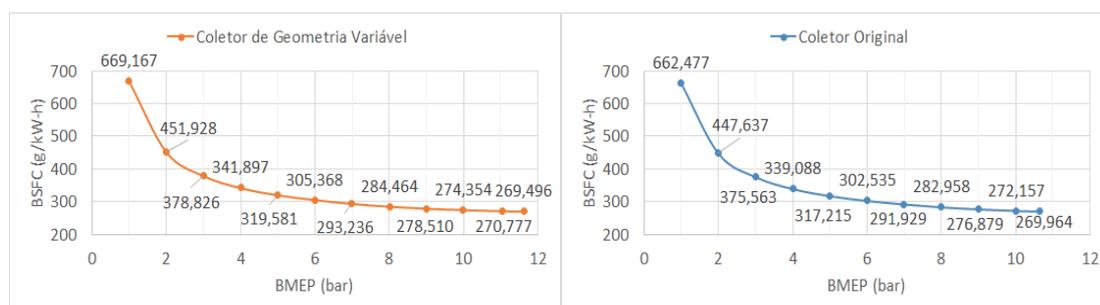
Figura 19 - Histograma de Velocidade de Rotação do Motor para Teste EPA 5 Ciclos



Fonte: Do Autor

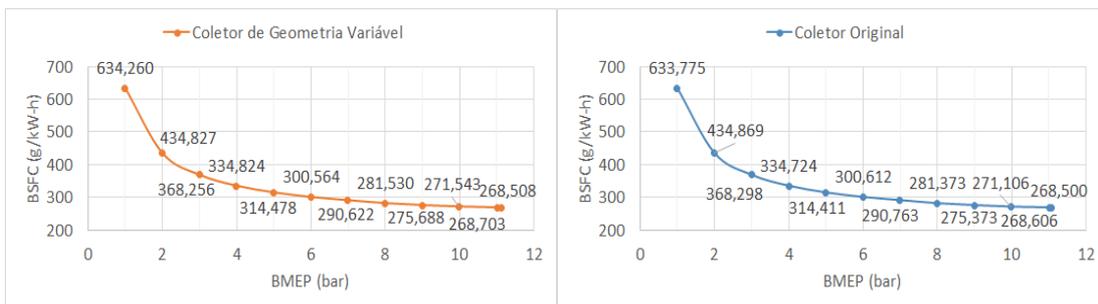
A Figura 20 mostra o gráfico de consumo específico do motor para a rotação de 3000 RPM ao longo de sua faixa de carga, os dados mostram que para todos os pontos onde é possível realizar uma comparação direta para um mesmo valor de BMEP, o motor com o coletor original tem um menor consumo específico com uma redução de em média 0,80% em relação ao coletor de geometria variável. Sendo a exceção nos dados quando comparamos o consumo específico entre os valores de plena carga, esta não sendo uma comparação direta pois para cada configuração o motor possui um diferente valor de BMEP em plena carga, esta comparação mostra uma redução de 0,17% no consumo específico para o coletor de geometria variável, resultado que condiz com a otimização para plena carga do motor. O mesmo comportamento é observado para a velocidade de 2500 RPM e 1000 RPM como mostrado pela Figura 21 e Figura 22 respectivamente.

Figura 20 - Consumo Específico por Carga para 3000 RPM



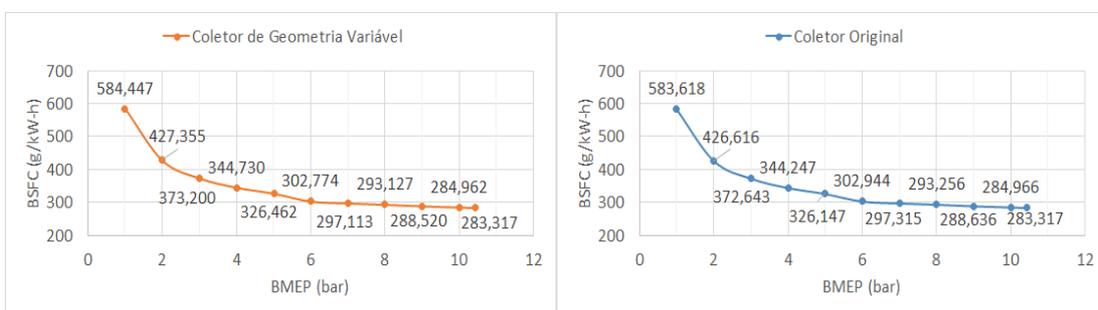
Fonte: Do Autor

Figura 21 - Consumo Específico por Carga para 2500 RPM



Fonte: Do Autor

Figura 22 - Consumo Específico por Carga para 1000 RPM



Fonte: Do Autor

## **6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS**

Neste capítulo são discutidas as conclusões deste trabalho e trabalhos futuros.

### **6.1 Conclusões**

A simulação da cadeia cinemática mostrou uma diminuição da economia de combustível, medida em Km/L, do motor equipado com o coletor de geometria variável proposto por Silva (2019) com base no teste padronizado de consumo EPA 5 ciclos, os dados de consumo específico em condições de carga parcial do motor auxiliam no entendimento do resultado mostrando para as velocidades de rotação onde o motor passa a maior parte do tempo durante o teste um maior consumo específico de combustível utilizando o coletor de geometria variável. O resultado é diferente do esperado visto que foram observadas melhoras nos parâmetros do motor em análise para velocidade de rotação fixa e plena carga onde o cálculo para a frequência de Helmholtz utilizado na validação não varia com a carga. Este estudo complementa o estudo desenvolvido por Silva (2019) com dados referentes a situações de caso de uso, sendo o modelo desenvolvido por ele utilizado para definir o motor na cadeia cinemática a partir de seus mapas de performance mecânica, esta abordagem permite em estudos posteriores realizar os cálculos para diferentes configurações de testes e ciclos com um custo computacional reduzido uma vez que o comportamento do motor já foi definido.

### **6.2 Trabalhos Futuros**

Trabalhos futuros podem ser desenvolvidos para estudar o comportamento dos mesmos sistemas para outros ciclos de velocidade e testes padronizados, outra abordagem de projeto de um coletor de geometria variável onde se é realizado estudos de otimização considerando cargas parciais e também estender os estudos para verificar o efeito do coletor na emissões de poluentes.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, João Vitor. **Análise da influência de coletores de admissão com geometria variável nos parâmetros de desempenho em motores de combustão interna de ignição por faísca e HCCI usando AVL-BOOST**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Automotiva) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville, Joinville, 2017.
- ALVES, Luiz Otávio F. T. et al. Design of a new intake manifold of a single cylinder engine with three stages. **SAE Technical Paper**, 2017.
- ANUÁRIO DA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA BRASILEIRA. São Paulo: ANFAVEA, 2019.
- BAYAS JAGADISHSINGH, G.; JADHAV, N. P. Effect of Variable Length Intake Manifold on Performance of IC Engine. **International Journal of Current Engineering and Technology**, v. 5, p. 47-52, 2016.
- BENAJES, Jesús et al. Fuel consumption and engine-out emissions estimations of a light-duty engine running in dual-mode RCCI/CDC with different fuels and driving cycles. **Energy**, v. 157, p. 19-30, 2018.
- BISHOP, Justin D. K. et al. Engine maps of fuel use and emissions from transient driving cycles. **Applied energy**, v. 183, p. 202-217, 2016.
- BLAIR, Gordon P. **Design and simulation of four-stroke engines**. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1999.
- BRUNETTI, Franco. **Motores de combustão interna**: volume 1. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2012.
- BRUNETTI, Franco. **Motores de combustão interna**: volume 2. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2012.
- CAVAGLIERI, Marcelo Renato. **Estudo experimental do fenômeno de onda em coletores de admissão para motores de combustão interna**: Experimental study of the wave phenomena into the intake manifolds for internal combustion engines. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2014.
- COSTA, Rodrigo Caetano; DE MORAIS HANRIOT, Sérgio; SODRÉ, José Ricardo. Influence of intake pipe length and diameter on the performance of a spark ignition engine. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 36, n. 1, p. 29-35, 2014.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Fuel Economy Labeling of Motor Vehicles: Revisions To Improve Calculation of Fuel Economy Estimates. **Federal Register**, v. 71 n. 21, p. 5425-5513, 2006.

GAMMA TECHNOLOGIES. **GT-ISE**: Integrated simulation environment. Versão 2016: Westmont, IL: Gamma Technologies, 2016.

GAMMA TECHNOLOGIES. **GT-Power Engine Performance Tutorial**. Westmont, IL: Gamma Technologies, 2014.

GAMMA TECHNOLOGIES. **GT-Power User's Manual**. Westmont, IL: Gamma Technologies, 2016.

GERVASIO, Daniel Teixeira. **Metodologia de correlação e análise de modelos fluidodinâmicos 1D para motores de combustão interna**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**, 1<sup>st</sup> Edition. New York: McGraw-Hill, Inc., 1988.

HOAG, Kevin; DONDLINGER, Brian. **Vehicular engine design**. 2<sup>nd</sup> Edition. Vienna Springer, 2016.

KMEC, Joseph F.; KASSEBAUM, David A.; NOERENBERG, Ryan L. First-time experience with engine simulation software in an internal combustion engines course. **American Society for Engineering Education Illinois-Indiana Section**, 2009.

MA, Ruoyun et al. Real-world driving cycles and energy consumption informed by large-sized vehicle trajectory data. **Journal of Cleaner Production**, v. 223, p. 564-574, 2019.

POTUL, Shrinath; NACHNOLKAR, Rohan; BHAVE, Sagar. Analysis of change in intake manifold length and development of variable intake system. **International journal of scientific & technology research**, v. 3, n. 5, p. 223-228, 2014.

SILVA, E. A. A.; OCHOA, A. A. V.; HENRÍQUEZ, J. R. Analysis and runners length optimization of the intake manifold of a 4-cylinder spark ignition engine. **Energy Conversion and Management**, v. 188, p. 310-320, 2019.

SILVA, Ewerton Allyson de Arruda. **Análise e Otimização Geométrica do Coletor de Admissão do Motor E.torQ 1.6**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

SMITH, P. H.; WENNER, D. N. **The Design and Tuning of Competition Engines**. 6th Edition. Cambridge, MA: Bentley Publishers, 1954.

DE SOUZA, Gustavo Rodrigues et al. Study of intake manifolds of an internal combustion engine: A new geometry based on experimental results and numerical simulations. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 9, p. 248-258, 2019.

VICHI, Giovanni et al. Development of an engine variable geometry intake system for a Formula SAE application. **Energy Procedia**, v. 81, p. 930-941, 2015.

VOLKSWAGEN AG. **Self-study programme 212**: Variable intake manifold in vr engines. Wolfsburg: VOLKSWAGEN AG, 1998.