



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO –
UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONTROLE
E AUTOMAÇÃO E TÉCNICAS FUNDAMENTAIS**



IAN EIRAS VERSIANI PASSOS

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO
INTERNA DE UMA MOTOCICLETA COM O USO DE MISTURA
COMBUSTÍVEL-HIDROGÊNIO**

**OURO PRETO - MG
2017**

IAN EIRAS VERSIANI PASSOS

passosian@gmail.com

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO
INTERNA DE UMA MOTOCICLETA COM O USO DE MISTURA
COMBUSTÍVEL-HIDROGÊNIO**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: Dra. Elisângela Martins Leal

**OURO PRETO – MG
2017**

P289a Passos, Ian Eiras Versiani.
Análise de desempenho de um motor de combustão interna de uma
motocicleta com o uso de mistura combustível-hidrogênio [manuscrito] / Ian
Eiras Versiani Passos. - 2017.

87f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Profa. Dra. Elisângela Martins Leal.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas
Fundamentais.

1. Motocicleta. 2. Motor de combustão interna. 3. Motores - Combustível -
Hidrogênio. 4. Combustível - Hidrogênio - Desempenho. I. Leal, Elisângela
Martins. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 681.5

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO E TÉCNICAS FUNDAMENTAIS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA

Ao 31º dia do mês de março do ano de dois mil e dezessete às 14 horas, na sala 06, localizada na Escola de Minas - Campus Morro do Cruzeiro - UFOP, foi realizada a defesa de monografia do aluno **Ian Eiras Versiani Passos**, sendo a comissão examinadora constituída por: Prof. DSc. Luís Antônio Bortolaia, Prof. DSc. Luiz Joaquim Cardoso Rocha e Profª. DSc. Elisângela Martins Leal. O candidato apresentou o trabalho intitulado: “**Análise de Desempenho de um Motor de Combustão Interna de uma Motocicleta com o uso de Misturas Combustível-Hidrogênio**”, sob orientação da Profª. DSc. Elisângela Martins Leal. Após as observações dos avaliadores, em comum acordo os presentes consideram o aluno aprovado com a nota/conceito 9,7.

Ouro Preto, 31 de março de 2017.

Elisângela Martins Leal

Profª. DSc. Elisângela Martins Leal
Professora Orientadora

Luis Antonio Bortolaia

Prof. DSc. Luís Antônio Bortolaia
Professor Avaliador

Luiz Joaquim Cardoso Rocha

Prof. DSc. Luiz Joaquim Cardoso Rocha
Professor Avaliador

Ian Eiras Versiani Passos

Ian Eiras Versiani Passos
Aluno

Aos meus pais, Duval e Rita, e ao saudoso Prof. Duca dedico mais esta etapa vencida.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente à minha família, por acreditar no meu potencial e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação foram responsáveis por me fazer acreditar e ter esperança que tudo isso seria possível. Pais, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada tão difícil que foi muitas outras que virão.

Agradeço à minha professora orientadora Elisângela Leal, pelo incentivo e orientação neste trabalho. Elisângela, assim como uma mãe, seu cuidado e dedicação foram essenciais para que este trabalho fosse concluído com êxito. Peço aqui licença para agradecer também por ter acreditado na minha ideia, moldando-a da melhor forma. Além disso, por ter incentivado as propostas inovadoras ou empreendedoras e ter me acolhido como (des)orientado no momento em que ninguém acreditava no projeto inicial. Agradeço ainda pela paciência, compreensão dos imprevistos e por ter, principalmente, buscado comigo novas soluções para cada ponto final que encontrava pelo caminho das respostas por esse trabalho apresentado.

Agradeço aos meus amigos Saulo e Ícaro, pelas alegrias, tristeza e desafios compartilhados na busca pelas nossas ideias e pelas respostas para as soluções deste projeto em especial. A Equipe Motocicleta não seria a mesma e muito menos tão marcante caso não fosse composta por nós três, a única e melhor equipe possível!

Agradeço aos meus amigos e colegas de sala 126 da Escola de Minas, em especial à Fernanda Durães e Damiana, aos agregados dessa grande sala, e ao Diogo Souza pelas gargalhadas e distrações, brincadeiras e puxões de orelhas que, durante este trabalho, foram de extrema importância para o seu sucesso e conclusão.

Agradeço ao grandioso amigo Anderson Xavier que, em meio a tantos imprevistos e desmotivações, foi fundamental por aquecer o amor pelo presente trabalho e por tudo o que ele significa para mim, sem falar por nortear e ensinar o que a universidade não nos passa sobre a Engenharia Mecânica e muito menos sobre a vida.

*“Sonhar o sonho impossível,
Sofrer a angústia implacável,
Pisar onde os bravos não ousam,
Reparar o mal irreparável,
Amar um amor casto à distância,
Enfrentar o inimigo invencível,
Tentar quando as forças se esvaem,
Alcançar a estrela inatingível:
Essa é a minha busca.”*

Dom Quixote de La Mancha – Miguel Cervantes

RESUMO

PASSOS, Ian Eiras Versiani. Análise de Desempenho de um Motor de Combustão Interna de uma Motocicleta com o Uso de Mistura Combustível-Hidrogênio. 2016. Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Ouro Preto.

A primeira motocicleta foi proposta como um veículo muito similar a bicicleta com a utilização de uma pequena caldeira logo abaixo do banco. Com o passar dos anos e o aparecimento de novas tecnologias, o sistema responsável por gerar e transferir energia para as rodas sofreu modificações até chegar na configuração atual, um motor de combustão interna. Este motor pode obedecer a dois ciclos, o ciclo Diesel e o ciclo Otto, contudo, independente do ciclo, ele é uma máquina térmica que permite transformar calor em trabalho através da utilização de diversas fontes, como o petróleo. Um dos derivados do petróleo, mais utilizado no meio automobilístico é a gasolina que apresenta diversas deficiências, mas que continua como um dos principais combustíveis do mundo. Contudo, para reduzir o seu consumo e melhorar a sua eficiência, assim como desempenho do motor, pode-se optar por utilizar diversos aditivos, entre eles, o hidrogênio, elemento mais abundante no universo. Por apresentar propriedades como temperatura de autoignição, velocidade de propagação da chama e coeficientes de difusão do ar que complementam as características da gasolina, a utilização do hidrogênio se torna, por assim dizer, uma opção tentadora de aditivo e, principalmente de combustível alternativo, todavia, esbarra-se na forma de armazenamento que o torna perigoso. Assim, no presente trabalho é discutida a utilização do hidrogênio como aditivo e a sua influência no desempenho do motor. Foram observados para a análise do desempenho o Ciclo Otto ideal e real do motor 4 tempos escolhido, a vazão mássica, variação de pressão e temperatura, conforme cada processo e os diagramas de pressão *versus* volume e temperatura *versus* entropia do ciclo.

Palavras-chave: motocicleta, motor de combustão interna, combustível, hidrogênio, eletrólise, análise de desempenho.

ABSTRACT

The first motorcycle was proposed as a bike with the use of a small boiler just below the seat. With the passing of the years and the appearance of new technologies, the system responsible for generating and transferring energy to the wheels has undergone modifications until arriving at the current configuration, an internal combustion engine. This engine can comply with two large cycles, the Diesel cycle and the Otto Cycle, however, independent of the cycle, it is a thermal engine that allows turning heat into work through the use of various sources, such as petroleum. One of the most widely used petroleum products in the automotive industry is gasoline that has several deficiencies but remains one of the world's leading fuels. However, to reduce its consumption and improve its efficiency as well as engine performance, one can choose to use various additives, among them, hydrogen, and the most abundant element in the universe. Because it has properties such as auto ignition temperature, flame propagation velocity and air diffusion coefficients that complement the characteristics of gasoline, the use of hydrogen becomes, as it were, a tempting additive and, in particular, alternative fuel option, however the storage of this fuel makes it dangerous. Thus, the present work discusses the use of hydrogen as an additive and its influence on engine performance. The optimum and real 4-stroke engine of Otto Cycle, the mass flow rate, the pressure and temperature variation, according to each process and the pressure versus volume and temperature versus entropy diagrams were observed for the performance analysis.

Keywords: *motorcycle, internal combustion engine, fuel, hydrogen, electrolysis, performance analysis.*

LISTA DE SIMBOLOS

Q	Calor
Q_h	Calor fornecido
Q_c	Calor dissipado
Q_{4-1}	Calor cedido ao meio
Q_1	Calor de entrada na admissão
C_p	Calor específico a pressão constante
C_v	Calor específico a volume constante
Q_{2-3}	Calor fornecido durante a compressão
U_{final}	Calor interno final
$U_{inicial}$	Calor interno inicial
Q_u	Calor útil
k	Constante adiabática
R	Constante universal dos gases
ΔT	Diferença de temperatura
η_t	Eficiência térmica do ciclo
$\eta_{t,Carnot}$	Eficiência térmica do ciclo de Carnot
U_2	Energia interna de compressão
U_3	Energia interna de exaustão
f	Fração residual de gases
m	Massa
m_{ar}	Massa do ar
m_{comb}	Massa do combustível
m_{res}	Massa residual
m_{tot}	Massa total
N_c	Potência do ciclo
p	Pressão
p_1	Pressão de admissão
p_2	Pressão de compressão
n	Rotação do motor
r_v	Taxa de compressão de um motor de combustão interna
T_c	Temperatura da fonte fria
T_h	Temperatura da fonte quente

T	Temperatura
T_1	Temperatura de admissão
T_2	Temperatura de compressão
T_3	Temperatura na exaustão
T_4	Temperatura no escape
x	Tipo de motor
W	Trabalho
W_{compr}	Trabalho de compressão
W_{exp}	Trabalho de expansão
W_c	Trabalho do ciclo
W_{2-3}	Trabalho durante a compressão
ΔU	Varição da energia interna
Δu	Varição da energia interna específica
ΔH	Varição de calor
Δh	Varição do calor específico
V	Volume
v	Volume específico
v_1	Volume específico de admissão
v_2	Volume específico de compressão
V_1	Volume no ponto morto inferior
V_2	Volume no ponto morto superior

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo Final por Fonte	3
Figura 2 - Estrutura do Consumo no Setor de Transporte.....	4
Figura 3 - Motocicleta proposta por Sylvester H. Roper.....	9
Figura 4 - Conjunto móvel de transmissão do motor	12
Figura 5 - Caixa de mudança de transmissão	13
Figura 6 - Movimento rotativo da manivela.....	15
Figura 7 - Os quatro tempos para o Ciclo Otto.....	16
Figura 8 - Ciclo Otto ideal completo	17
Figura 9 - Motor dois tempos de ignição por centelha	18
Figura 10 - Consumo total vs. Produção de petróleo.....	22
Figura 11 - Gerador de hidrogênio por eletrólise	28
Figura 12 - Eletrolisador molhado.....	29
Figura 13 - Eletrolisador a seco.....	29
Figura 14 - Diagramas p-V e T-S do ciclo Otto ideal	30
Figura 15 - Yamaha XT 225 98'	42
Figura 16 - Sistema proposto do motor em Ricardo Wave®	45
Figura 17 - Vazão mássica dentro dos dutos 02 e 03	51
Figura 18 - Variação da pressão dentro dos dutos 02 e 03 e do cilindro.....	53
Figura 19 - Variação da pressão dentro dos dutos 02 e 03	54
Figura 20 - Variação da temperatura dentro dos dutos 02 e 03 e dentro do cilindro	55
Figura 21 - Diagrama de pressão versus volume.....	57
Figura 22 - Diagrama de temperatura <i>versus</i> entropia	58
Figura 23 - Diagrama pressão versus volume com hidrogênio como aditivo	59
Figura 24 - Variação da pressão nos dutos 02 e 03 e cilindro com hidrogênio como aditivo..	60
Figura 25 - Diagrama temperatura versus entropia para o ciclo com hidrogênio	61
Figura 26 - Variação da temperatura dentro dos dutos 02 e 03 e cilindro com hidrogênio como aditivo.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Crescimento da quantidade de veículos comercializada em 2014 e 2015.	1
Tabela 2 - Valores de Poder Calorífico de diferentes combustíveis.....	20
Tabela 3 - Composição do ar atmosférico seco ao nível do mar.	21
Tabela 4 - Limites de flamabilidade e poder calorífico (fase gasosa ou vapor).....	24
Tabela 5 - Comparativo do número de octanagem de combustíveis.	24
Tabela 6 - Propriedades físicas do hidrogênio e outros combustíveis.....	26
Tabela 7 - Variáveis e Indicadores	39
Tabela 8 - Especificações do Motor	43
Tabela 9 - Cálculo das condições de operação do motor a partir das especificações técnicas.	44
Tabela 10 - Dimensões dos dutos para modelagem	46
Tabela 11 - Temperatura e pressão nos dutos do sistema.....	47
Tabela 12 - Diâmetros das válvulas de admissão e exaustão	47
Tabela 13 - Geometria do motor.....	48
Tabela 14 - Condições iniciais na câmara de combustão	48
Tabela 15 - Composição do ar atmosférico seco ao nível do mar.....	63
Tabela 16 - Cálculo das condições de operação do motor a partir das especificações técnicas com hidrogênio	65
Tabela 17 - Desempenho do ciclo teórico sem e com hidrogênio como aditivo.....	66
Tabela 18 - Resultado do desempenho do ciclo real sem e com hidrogênio em Ricardo Wave®.....	67

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema	1
1.2	Justificativa.....	7
1.3	Objetivos.....	8
1.3.1	Geral	8
1.3.2	Específicos.....	8
1.4	Estrutura do Trabalho	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	Motocicleta	9
2.1.1	Chassi	10
2.1.2	Sistema de suspensão	11
2.1.3	Sistema elétrico	12
2.1.4	Sistema de transmissão.....	12
2.2	Motor de combustão interna.....	13
2.3	Combustão.....	19
2.4	Combustível.....	21
2.5	Hidrogênio.....	25
2.6	Eletrólise.....	27
2.7	Análise de desempenho	30
3	METODOLOGIA.....	36
3.1	Tipo de Pesquisa.....	36
3.2	Materiais e Métodos	37
3.3	Variáveis e Indicadores	38
3.4	Instrumento de Coleta de Dados.....	40
3.5	Tabulação de Dados.....	40
3.6	Considerações Finais do Capítulo	41
4	RESULTADOS	42
4.1	Especificações do Motor	42
4.2	Modelagem do Problema.....	45
4.2.1	Definição de parâmetros de entrada e saída	46

4.2.2	Definição dos dados do motor.....	48
4.2.3	Especificação dos parâmetros de injeção do combustível.....	49
4.3	Resultados da simulação.....	50
4.3.1	Resultado da Simulação com Gasolina	50
4.3.2	Resultado da Simulação com Gasolina e Hidrogênio como Aditivo	59
4.4	Cálculo da Combustão.....	63
4.4.1	Reação de Combustão com o combustível principal.....	63
4.4.2	Reação de Combustão com Hidrogênio	64
4.5	Cálculo da Potência do Motor com Hidrogênio como Aditivo	64
4.6	Análise de torque e potência.....	66
4.7	Considerações Finais	67
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	68
5.1	Conclusão	68
5.2	Recomendações	69
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

1 INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo será apresentada uma abordagem teórica da composição de uma motocicleta, motores de combustão interna e o uso da mistura gasolina-hidrogênio como combustível, além da relevância e emprego do gás hidrogênio como aditivo e combustível. Sendo assim, a finalidade do primeiro capítulo está vinculada na apresentação do problema, os motivos de sua origem, justificativas para realização, os objetivos e estrutura do trabalho.

1.1 Formulação do Problema

O uso da motocicleta, como meio de transporte, teve seu maior crescimento durante as Guerras Mundiais, onde as mudanças ocorridas em sua estrutura original foram poucas. Entretanto destaca-se, como evolução técnica, o posicionamento do motor embaixo do eixo da armação, movendo o centro de gravidade do veículo e tornando-o significativamente mais estável e seguro, permitindo maior estabilidade e controle durante manobras, conforme o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI, 2002).

Segundo a apostila do SENAI (2002), a popularidade das motocicletas só ocorreu a partir dos anos de 1960 quando surgiram modificações na estética e aerodinâmica, em decorrência da popularização das competições esportivas. Além disso, com o auxílio da crise mundial do petróleo, a produção cresceu notoriamente, sendo, atualmente, o Japão o maior produtor enquanto o segmento segue em crise no Brasil.

De acordo com o balanço anual de 2015 disponibilizado pela FENABRAVE (2016), o segmento das motocicletas no Brasil não se recuperou depois da crise de 2008/2009, em função especialmente do corte de crédito para o seu público alvo, uma vez que esta é a alternativa mais utilizada na comercialização desta modalidade de veículos, porém, como é possível perceber através da Tabela 1 de crescimento da quantidade comercializada em porcentagem, apesar da redução de 11%, as motos ainda representam uma parcela significativa do mercado, com 32% dos veículos emplacados.

Tabela 1 - Crescimento da quantidade de veículos comercializada em 2014 e 2015.

Ano	Total	Automóveis e Com. Leves	Motos	
2014	4.984.554	3.328.711	1.429.929	-5,7%
2015	3.872.260	2.476.904	1.273.250	-11%

Fonte: FENABRAVE, 2015

Para o SENAI (2002), no início do seu desenvolvimento as motocicletas não passavam de bicicletas dotadas de motores, sem uma colocação uniforme e que, geralmente, serviam para mover a roda traseira por meio de corrente. O que nos dias de hoje não é diferente, uma vez que, apesar da grande evolução dos motores de combustão interna, o mecanismo de transmissão de energia e de tração na motocicleta continua o mesmo, permitindo assim alcançar altas velocidades.

O motor de combustão interna é um dos equipamentos utilizados para produzir trabalho através da queima de combustível e conforme Martins (2006), embora seja um dos maiores responsáveis pela poluição atmosférica e diminuição das reservas de petróleo bruto, o seu uso continua a intensificar-se principalmente no setor de transportes, tendo relação direta com a economia de um país.

Para Brunetti (2012), o pioneiro nos motores de combustão por faísca de 4 tempos foi Nikolaus Otto, em 1876, que aperfeiçoou e aplicou o princípio de funcionamento proposto por Beau de Rochas, em 1862, e nomeia até hoje os motores Otto. Já para o motor a 2 tempos o pioneiro foi Dugald Clerck, em 1878, que apesar do avanço, não deu nome ao motor. O motor de ignição por compressão foi desenvolvido inicialmente por Rudolf Diesel em 1892, o qual foi denominado como “motor Diesel”, utilizado até hoje.

Segundo Martins (2006), prevê-se que haverá um aumento do uso do motor de combustão interna nas próximas décadas, principalmente na Europa Oriental e na Ásia (China, Índia). Isto ocorrerá antes do advento da célula combustível, motores elétricos ou outras fontes de energia que venham substituir o motor de combustão que utiliza combustíveis fósseis e álcoois.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2008) define os combustíveis fósseis, principalmente o petróleo, como:

Uma mistura de hidrocarbonetos que tem origem na decomposição de matéria orgânica causada pela ação de bactérias em meios com baixo teor de oxigênio. Ao longo de milhões de anos, essa decomposição foi-se acumulando no fundo dos oceanos, mares e lagos e, pressionada pelos movimentos da crosta terrestre, transformando-se em substância oleosa. Essa substância atualmente é encontrada em bacias sedimentares específicas, formadas por camadas ou lençóis porosos de areia, arenitos ou calcários.

Ainda conforme a Aneel (2008), desde então, o país que detém e controla as reservas de petróleo, principal combustível fóssil explorado, e a estrutura para o seu refino, possui importância geopolítica, segurança interna em setores vitais como transporte e produção de

energia, além do aumento da participação no comércio internacional, tanto por meio da exportação direta do óleo e seus derivados ou custo de produção, como pela competitividade dos produtos industrializados. Em razão destes elementos o petróleo também foi responsável por gerar sucessivas guerras e crises internacionais ao longo do século XX (ANEEL, 2008).

A importância do petróleo e de seus derivados, principalmente na economia do Brasil, fica claro de acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) do ano de 2015 do Ministério de Minas e Energia (MME). No balanço chama atenção o gráfico de consumo final por fonte, mostrado na Figura 1, que faz um comparativo entre as fontes de energias mais utilizadas no país. Neste o petróleo e seus derivados lidera, com quase três vezes mais consumo que a segunda colocada, a eletricidade.

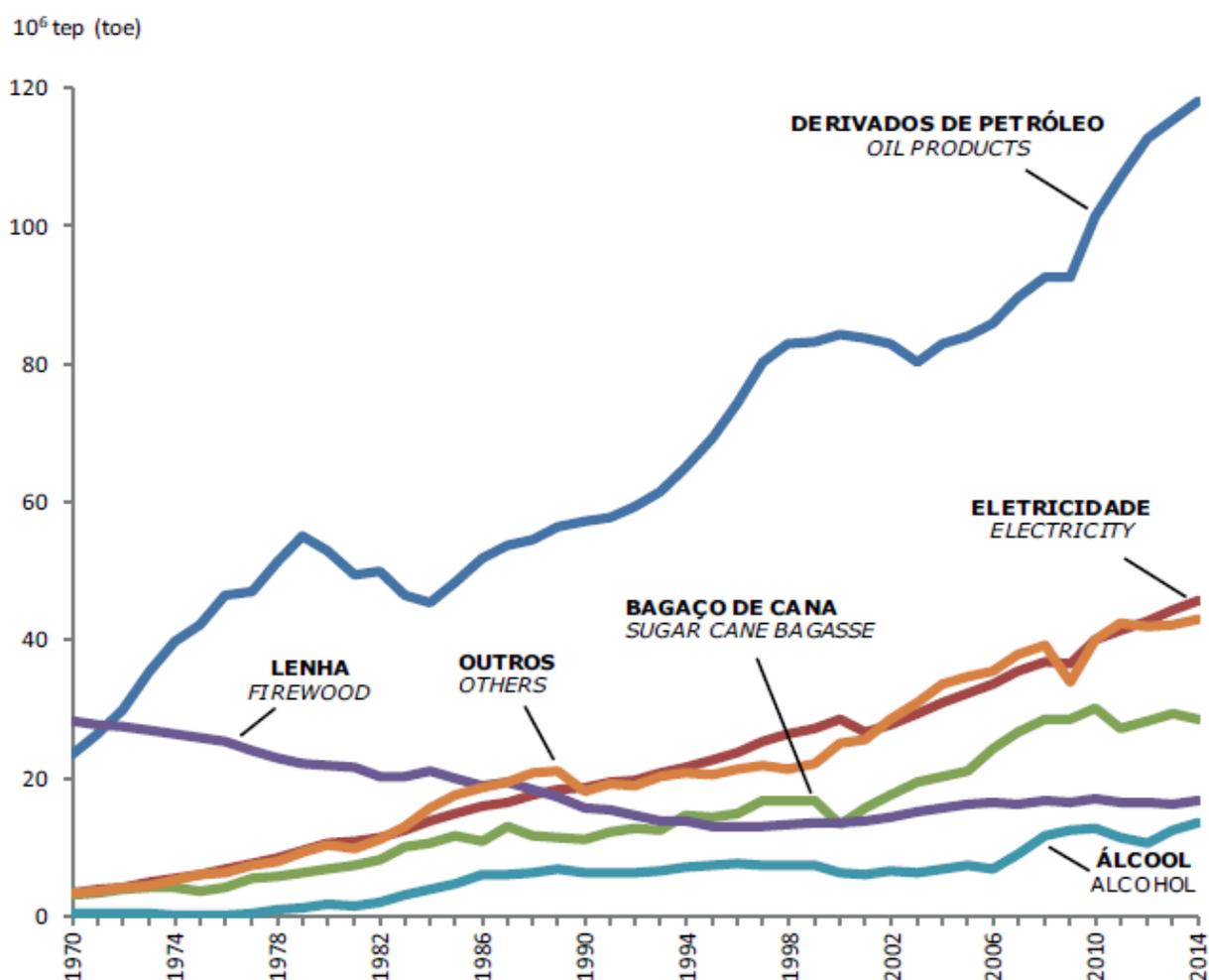


Figura 1 - Consumo Final por Fonte
Fonte: Balanço Energético Nacional - BEN, 2015

Derivados como gasolina e óleo diesel passaram a ser usados como combustível para os meios de transporte, o que fez com que o petróleo rapidamente se transformasse na

principal fonte da matriz energética mundial (ANEEL, 2008). E no Brasil não foi diferente, a partir de 1972 os derivados do petróleo ultrapassaram a lenha, fonte mais consumida até então, e mantiveram uma ascensão até 1979 onde o álcool, a eletricidade e outras fontes começaram a ter importância significativa na matriz energética do país. Porém, em 1984 o petróleo ganhou força novamente e até hoje, é a fonte energética mais consumida no Brasil, aproximadamente 120 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep) seguida, de longe, pela eletricidade, com pouco mais de 40 milhões de toneladas.

Ainda de acordo com o Balanço Energético Nacional de 2015, no gráfico da estrutura do consumo no setor de transporte, mostrado na Figura 2, é possível perceber que os derivados do petróleo alimentam, aproximadamente, 70% do setor. Também deve-se chamar a atenção para a relação entre as curvas da gasolina e do álcool, pois são inversamente proporcionais até 2012.

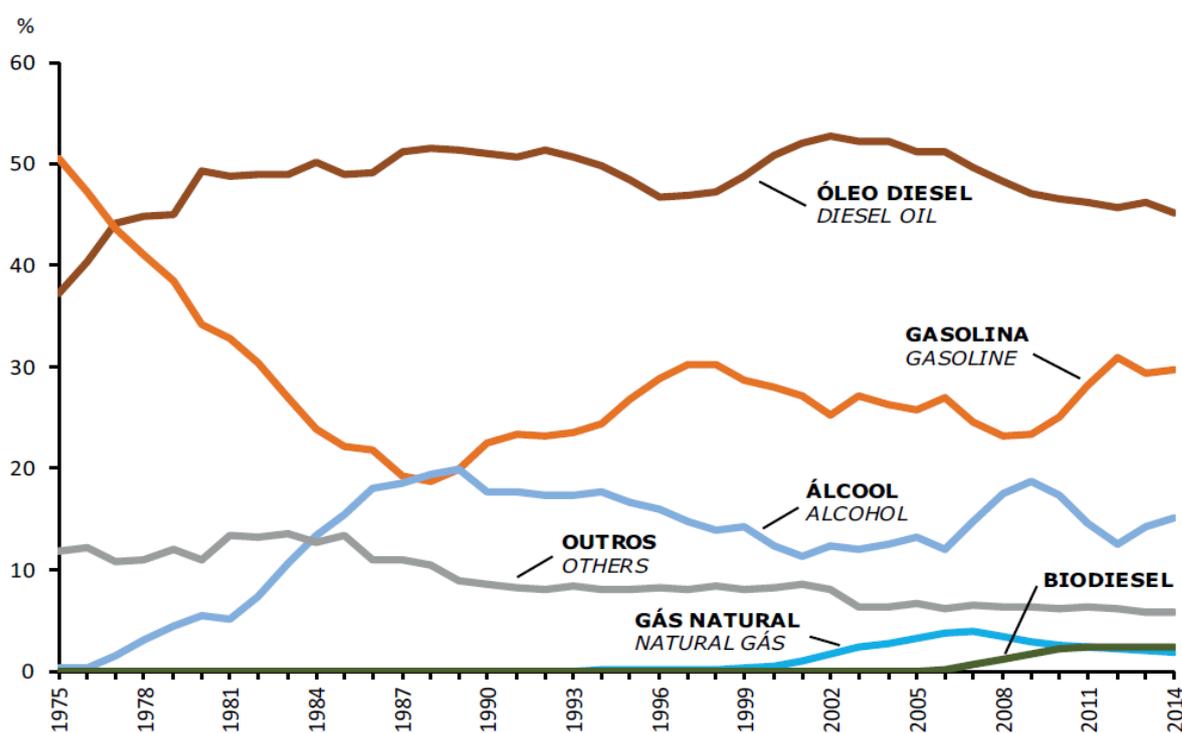


Figura 2 - Estrutura do Consumo no Setor de Transporte
Fonte: Balanço Energético Nacional - BEN, 2015.

Na Figura 2 é possível perceber que, com a crise mundial do petróleo, nos anos de 1970, o Brasil buscou novas fontes de energias e começou a utilizar maciçamente o etanol como combustível, o que proporcionou uma queda no consumo de gasolina, combustível utilizado até então na maioria dos automóveis produzidos no país. A redução do consumo de

gasolina foi tão grande que o aumento da utilização do álcool como combustível a ultrapassou, em 1988, porém, o consumo da gasolina voltou a crescer e manter uma relação inversa com o álcool, concorrente direto no mercado, isto é, o seu consumo aumenta com a redução do álcool. Após medidas do governo, de 2012 em diante, o percentual de álcool na gasolina subiu, até 27% em 2015.

Porém, nos últimos anos, a busca de fontes alternativas se faz muito presente, sendo um dos principais motivos a preocupação ambiental, uma vez que a cadeia produtiva do petróleo e seus derivados é extremamente agressiva ao meio ambiente, inclusive produzindo em várias etapas as emissões de gases que contribuem para o efeito estufa (ANEEL, 2008). Sendo assim, visando reduzir as emissões e aumentar a eficiência dos motores, busca-se nos dias de hoje a melhoria de eficiência da máquina ou a utilização de aditivos ao combustível principal como, por exemplo, o hidrogênio.

Hoje, no mundo, vivencia-se uma grande preocupação em relação às fontes energéticas, sendo as mais utilizadas provenientes de fontes não renováveis. Segundo Estêvão (2008), os combustíveis fósseis são os recursos energéticos mais utilizados mundialmente, principalmente em transportes. Para Silveira (2013) a decadência das reservas energéticas fósseis, como petróleo, carvão e gás natural, e o aumento da poluição são agora, preocupações mundiais. Silveira (2013) ainda crê que, desta forma, haja o aumento e a promoção por soluções alternativas, que não dependem de hidrocarbonetos. Sendo assim, pesquisas sobre novos combustíveis devem ser desenvolvidas para que estes sejam utilizados em motores de combustão interna, sem grandes mudanças mecânicas.

Estêvão (2008) destaca que o hidrogênio é o elemento químico mais abundante do universo. Possui elevada quantidade de energia por unidade de massa e o produto de sua combustão resulta apenas em água. Seu átomo é constituído apenas de um próton e um elétron. É um elemento muito ativo quimicamente, se combina rapidamente com outros elementos formando compostos. De todos os gases é o mais leve e se dispersa rapidamente se não for confinado. Apresenta alto poder calorífico, cerca de 120 kJ/g, o maior de todos os combustíveis conhecidos.

O hidrogênio é o combustível com maior energia por unidade de peso. A energia liberada em sua reação de combustão chega a ser cerca de 2,5 vezes do poder de combustão de um hidrocarboneto - gasolina, diesel, propano (SANTOS, 2005). Um dos desafios na atualidade é então a utilização do hidrogênio como combustível, dificultada principalmente

pelo seu armazenamento, porém motivada pelo seu desempenho, principalmente em motores de combustão interna.

Segundo Estêvão (2008) a utilização do hidrogênio como combustível ainda está muito longe de se tornar um grande sucesso, pois a mistura ar-hidrogênio não apresenta um poder calorífico tão elevado quando comparado com os demais combustíveis fósseis. Porém, engenheiros defendem o uso do hidrogênio como aditivo para diversos combustíveis, principalmente para a gasolina. A adição de pequenas quantidades de hidrogênio à gasolina, aumenta a velocidade da chama em todas as relações equivalente da gasolina, tornando possível o motor trabalhar com uma mistura menor de ar-gasolina.

O gás hidrogênio é quimicamente muito ativo e raramente permanece sozinho, estando, na maioria das vezes, associado a combustíveis fósseis e, principalmente, ao oxigênio, formando a água. Assim, para trabalhar apenas com o gás se faz necessário a separação dos átomos o que obrigou o homem a buscar tecnologias para tal. Existem atualmente diversos processos de separação do hidrogênio dos demais átomos, entre eles a eletrólise (ESTÊVÃO, 2008).

O processo de eletrólise pode ser definido, conforme Tolmasquim (2003), como um processo onde reações são desencadeadas a partir da aplicação de uma força eletromotriz por uma fonte de energia externa. O fornecimento de tensão e corrente é feito através de eletrodos, entre os quais existe um meio condutor iônico que pode ser líquido ou sólido.

Já Estêvão (2008), resume a eletrólise como um processo eletroquímico em que os íons de um eletrólito de carga elétrica positiva e negativa são transportados pela corrente elétrica e transformados em partículas neutras. No caso de se tratar de um composto dissolvido, este sofre uma decomposição mais ou menos completa por ação da água, quando esta se dissocia em íons e ainda segundo o processo de eletrolise da água é comprovado o mais caro e menos eficiente dos métodos de obtenção do gás hidrogênio, uma vez que implica em fornecer uma quantidade muito grande de energia para a quebra da molécula da água e um retorno muito pequeno de gás.

Segundo Martins (2006) os motores de combustão interna têm características de desenho e de funcionamento que os especificam. No geral, os fatores importantes para o seu desempenho são consumo de combustível, rendimento total, potência, torque e, atualmente, emissão de poluentes. Todos esses fatores mostram a eficiência da conversão de energia num motor e o seu desempenho.

Um motor de combustão interna está limitado pela quantidade de combustível e ar que pode entrar em cada ciclo, pois tem um volume varrido fixo. Porém, uma grande dúvida para no ar, unindo-se ao combustível, como aditivo, o hidrogênio qual mudança haveria no desempenho de um motor de combustão interna, principalmente em uma motocicleta, na qual o equipamento é encontrado na sua forma mais simples quando comparado a outros veículos.

De acordo com o exposto, tem-se então a seguinte problemática:

Qual a influência do uso de hidrogênio como aditivo no desempenho de um motor de combustão interna usado em motocicletas?

1.2 Justificativa

Hoje no mundo, vivencia-se uma grande preocupação em relação às fontes energéticas, sendo as mais utilizadas provenientes de fontes não renováveis, como por exemplo o petróleo. Isto porque o petróleo, além de ser, atualmente, a fonte energética mais importante do mundo tem como principais derivados a gasolina e o diesel, combustíveis de quase totalidade dos meios de transporte utilizados pelo homem. Porém, apesar de muito utilizado, a gasolina (PCI de 44,50 kJ/g) e o diesel (PCI de 42 kJ/g) ainda estão muito aquém, em termos de poder calorífico, quando comparados ao hidrogênio (PCI de 119,93 kJ/g).

Sendo assim, um dos grandes desafios em termos energéticos para a humanidade é utilizar o hidrogênio como combustível em suas atividades. Neste trabalho pretende-se realizar a análise de desempenho de um motor de combustão interna de uma motocicleta com o uso de mistura combustível e hidrogênio dando mais um passo para o fim da dependência de combustíveis fósseis.

A mistura de gasolina e hidrogênio visa, primeiramente, reduzir o consumo de hidrocarbonetos, através da inserção do gás hidrogênio como aditivo na combustão, devido ao seu alto poder calorífico, em comparação com os demais combustíveis. Um segundo benefício da utilização do gás é reduzir a emissão de poluentes, uma vez que o motor de uma motocicleta pode produzir até 6 vezes mais poluentes do que o de um carro.

A análise após ser desenvolvida para o motor de combustão interna de uma motocicleta, também poderá ser estendida, com poucas alterações, a motores de veículos maiores, como carros e caminhões, uma vez que o motor de uma motocicleta pode ser considerado como o motor simplificado dos veículos, devido à sua simplicidade, apesar de muito desenvolvido.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Analisar o desempenho de um motor de combustão interna de uma motocicleta utilizando misturas de gasolina e hidrogênio como aditivo.

1.3.2 Específicos

- Realizar estudo teórico do motor de combustão interna e análise de desempenho do motor operado com gasolina como combustível com e sem a adição de hidrogênio;
- Realizar a modelagem do motor de combustão interna e analisar a influência da adição de hidrogênio no seu desempenho;
- Descrever a metodologia adotada, apontar as variáveis e os indicadores do estudo e apresentar a instrumentação de coleta e tabulação dos dados obtidos.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho será dividido em cinco capítulos e estão organizados da seguinte forma:

No primeiro capítulo é apresentada a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho e os objetivos geral e específicos.

O segundo capítulo trata da fundamentação teórica dos conceitos e teorias a respeito do funcionamento de uma motocicleta, da análise de desempenho de um motor de combustão interna e da utilização de hidrogênio como aditivo e combustível. Também são relatados tipos diferentes de motores a combustão interna.

O terceiro capítulo apresenta o processo metodológico adotado na pesquisa, bem como as ferramentas utilizadas para a coleta de dados que são partes essenciais na obtenção dos resultados.

No quarto capítulo são relatadas as discussões e resultados encontrados a partir da coleta de dados. Além disso é descrita a modelagem numérica para análise de desempenho com e sem a utilização de hidrogênio como aditivo para o combustível.

O quinto capítulo encerra o trabalho com as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste segundo capítulo será apresentada uma abordagem histórica e teórica aprofundada da composição de uma motocicleta, motores de combustão interna, dos diversos tipos de combustíveis e o uso da mistura combustível-hidrogênio como combustível, assim como a relevância do gás hidrogênio e seu emprego como aditivo e combustível do futuro. Sendo assim, a finalidade do segundo capítulo está vinculada no embasamento teórico para todo o trabalho.

2.1 Motocicleta

Baseado em Abdo (2013) as motocicletas possuem uma longa história de mais de 100 anos de existência e nos dias de hoje movimentam a economia mundial em milhões de dólares. De acordo com o *Merriam-Webster's Collegiate Dictionary*, a palavra motocicleta é definida como: “um veículo automotivo de duas rodas que possui um ou dois bancos”.

Ainda conforme a revista, a respeito da patente da primeira motocicleta, existe diferentes opiniões, mas, ainda de acordo com a *Merriam-Webster*, ela foi destinada para Sylvester H. Roper em 1869, na cidade de Massachusetts nos Estados Unidos. Abdo (2013) destaca que Roper propôs um veículo muito similar a bicicleta com a utilização de uma pequena caldeira logo abaixo do banco, como demonstrado na Figura 3. A caldeira alimentava um sistema de dois pistões que gerava a força mecânica necessária para mover a roda traseira.



Figura 3 - Motocicleta proposta por Sylvester H. Roper
Fonte: Abdo, 2013

Após o desenvolvimento da invenção de Roper, os historiadores creditam a invenção da primeira motocicleta movida a um motor de combustão ao alemão Gottlieb Daimler em 1885. O motor em questão utilizava como combustível o petróleo. No entanto, a apostila do SENAI (2002) destaca que também se atribuiu a invenção ao inglês Edward Butler em 1884, pela construção de um triciclo a motor, mas apesar da sua invenção o novo veículo não teve grande difusão até 1896, quando passou a desenvolver maior velocidade e se incorporou, definitivamente, como um dos principais meios de locomoção da humanidade.

Ainda de acordo com a apostila do SENAI (2002), diferentemente de outros países, no Brasil, as motocicletas passaram a ser fabricadas a partir de 1958 tendo como primeiro lançamento uma derivação das motos italianas lambreta e vespa, que fizeram sucesso até meados de 1965. Em seguida, onze anos depois, um modelo derivado da japonesa Honda, voltou a aquecer o mercado, com suas 125 cc e, a partir de então esse meio de transporte vem fazendo parte da vida do brasileiro.

Atualmente o Brasil ocupa uma posição de destaque na produção mundial de motocicletas tendo como líder de mercado nacional a Honda Motor do Brasil que, de acordo com dados divulgados pela FENABRAVE no balanço anual de 2015, teve participação de 78,04% no mercado brasileiro de motos, responsável pela venda de 993.579 veículos.

Dentre as motos fabricadas no Brasil hoje e a primeira geração, muitas coisas mudaram, porém, apesar do desenvolvimento tecnológico desde 1885, ainda é possível resumir as partes de uma motocicleta em chassi, um sistema de suspensão composto, na maioria das vezes, por um amortecedor traseiro e um dianteiro, sistema de direção acoplado à suspensão dianteira, sistema elétrico, sistema de transmissão e motor.

2.1.1 Chassi

A apostila do SENAI (2002) destaca que o chassi é a principal peça estrutural de um veículo, uma vez que é o responsável por suportar boa parte dos impactos durante o trajeto, além de ser a base para acomodação de todos os componentes e sistemas envolvidos no bom funcionamento, principalmente da moto.

Para as motocicletas destaque-se então o processo de fabricação e acabamento dos chassis que influenciam diretamente na sua estabilidade. Sendo assim, de acordo com SENAI (2002) os chassis mais utilizados para motocicletas são:

- De estrutura tubular: são chassis que possuem sua estrutura formada por uma única peça de tubos metálicos dimensionados para suportar todas as forças durante o movimento da motocicleta, oferecendo maior estabilidade e controle na pilotagem, sendo utilizado em motos acima de 200 cc.
- De aço estampado ou prensado: são chassis compostos por duas ou mais peças de aço ou chapas metálicas soldadas em volta de uma estrutura central o que garante um maior peso e rigidez quando comparada à estrutura tubular, porém, do ponto de vista econômico o seu custo de fabricação é menor, apresentando, entretanto, grande dificuldade para o mecânico realizar reparos e manutenções.
- Baseados nos motores: são chassis que, ao contrário dos anteriores, são desenvolvidos de tal forma que o motor é parte auxiliar da estrutura da motocicleta, isto é, se desenvolve toda a estrutura baseada em um determinado motor e utilizando-o como elemento estrutural auxiliar, o que às vezes proporciona vários defeitos, como fraturas e dobras indesejadas, e cuidados quanto aos elementos de fixação do chassi, porém, este tipo de chassi se torna interessante devido ao baixo custo de fabricação.

2.1.2 Sistema de suspensão

Ligado ao chassi, de acordo com a apostila do SENAI (2002), tem-se o sistema de suspensão, composto por suspensão dianteira e suspensão traseira, onde a primeira é a responsável por amortecer irregularidades do solo, além de proporcionar conforto e estabilidade ao piloto. Ainda de acordo com ela, a suspensão dianteira tem como primeiro elemento a coluna de direção, parte onde se prende o conjunto do garfo dianteiro da suspensão e responsável por permitir que o condutor gire o guidão, da esquerda para a direita, facilitando o controle direcional e o seu equilíbrio com o veículo em movimento. Segundo Lear (1977) o tipo de sistema de suspensão dianteira mais comum é o garfo telescópico.

Na mecânica, ainda segundo Lear (1977) um amortecedor telescópico é um sistema hidráulico de forma tubular constituído essencialmente de um cilindro com molas internas lubrificadas que possibilita uma pilotagem macia e segura.

A suspensão traseira vem sofrendo modificações ao longo do tempo a fim de amenizar os efeitos das irregularidades das ruas, proporcionando maior conforto ao piloto e passageiro, e atender às necessidades de carregar, não apenas passageiros como também objetos em segurança. Um fato interessante é que, segundo SENAI (2002), nas primeiras motocicletas

não havia sistema de suspensão, porém, para suprir essa ausência utilizava-se o pneu traseiro mais largo, fato que ocorre até hoje, mesmo com o sistema já desenvolvido. Outra curiosidade é o desenvolvimento de bancos amortecidos, que proporcionaram o desenvolvimento da suspensão traseira das motocicletas, muito com em motos *custom*.

2.1.3 Sistema elétrico

Interligando todos os dispositivos e instrumentos elétricos o sistema elétrico de uma motocicleta é o responsável por conduzir a energia da bateria até os diversos pontos e sistemas a ele acoplados. Segundo Lear (1977) o sistema elétrico é responsável pelo funcionamento do sistema de ignição da moto e, nas motos mais modernas, por toda a comunicação eletrônica dos componentes. O SENAI (2002) ressalta que existem itens básicos e obrigatórios no sistema elétrico de todas as motos e, de acordo com a sua apostila “Mecânica de Motocicletas” eles são: chicote, sistema de iluminação, buzina, sistema de carga, sistema de ignição e sistema de arranque.

Deve-se, entretanto, dar uma atenção especial ao chicote uma vez que, segundo SENAI (2002) é principal elemento do sistema elétrico, o chicote constitui um conjunto de fios e cabos que distribui a corrente elétrica da bateria para os demais componentes, necessária para abastecer os diversos sistemas consumidores ou geradores de energia.

2.1.4 Sistema de transmissão

O sistema de transmissão é composto pelos elementos que formam a propulsão e a tração de um veículo, formados por dois conjuntos, o primeiro móvel, do motor, exemplificado na Figura 4, e o segundo pela caixa de mudanças de transmissão, mostrado na Figura 5, montados em um único bloco.

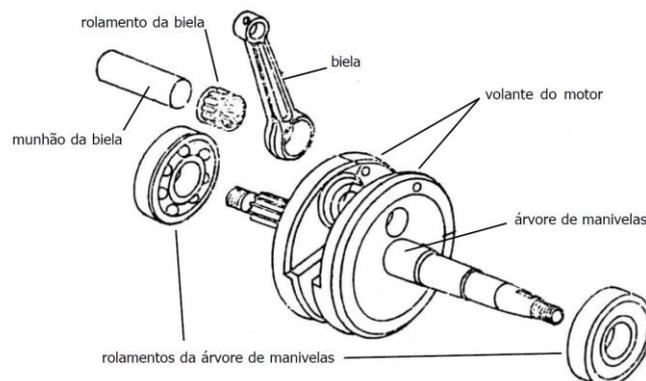


Figura 4 - Conjunto móvel de transmissão do motor
Fonte: SENAI, 2002

Segundo SENAI (2002), o conjunto móvel do motor, exemplificado na Figura 4, é o agrupamento de peças que transformam o movimento do êmbolo em movimento da árvore de manivelas do motor, sendo que a construção da árvore de manivelas é feita de tal modo que inibi qualquer vibração do motor durante o seu funcionamento, evitando a descentralização do volante e a perda de força em virtude da mudança da inércia causada pelo movimento.

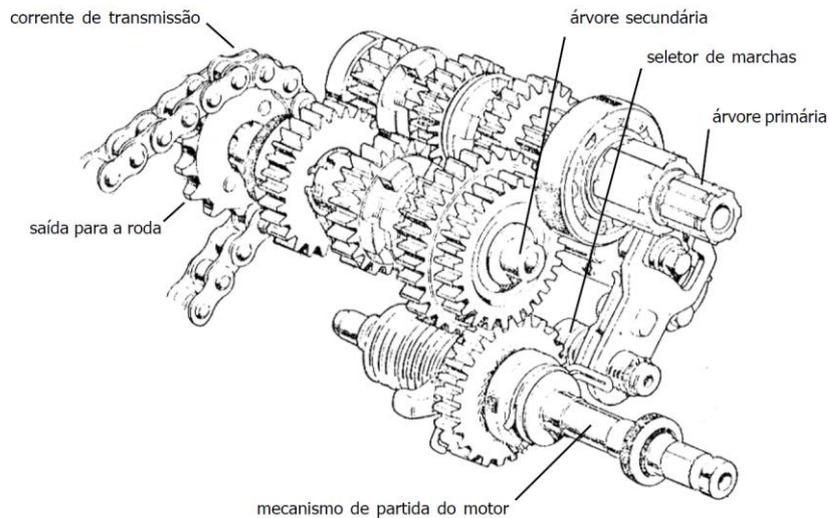


Figura 5 -Caixa de mudança de transmissão
Fonte: SENAI, 2002

Já a caixa de mudança (Figura 5), segundo conjunto do sistema de transmissão, é composto de engrenagens de diversos tamanhos, responsáveis por multiplicar ou desmultiplicar a rotação do motor o que permite variar a velocidade da transmissão em benefício de maior aceleração ou força de tração no veículo. Isso se dá com a relação de que, quando uma engrenagem pequena aciona uma maior, o toque ou força de torção é multiplicado, enquanto que uma redução da força é ocasionada quando se combina uma engrenagem grande com uma pequena, respeitando, respectivamente, o eixo de entrada do motor e o de saída da caixa de transmissão.

2.2 Motor de combustão interna

Segundo Brunetti (2012) uma máquina térmica permite transformar calor em trabalho. Esta energia térmica pode ser obtida de diversas fontes, entre elas se destaca a combustão. Para os motores de combustão interna, máquina térmica utilizada nas motocicletas, o calor é

obtido através da energia química proveniente da queima do combustível e transformado em trabalho mecânico.

A primeira notícia a respeito da transformação de energia térmica em trabalho veio de Leonardo da Vinci em 1508, onde o grande inventor propôs elevar um peso por meio de fogo o que, devido às dificuldades da época, não seria possível. Porém, em 1673, Christiaan Huygens propôs utilizar um mecanismo diferente e como combustível a pólvora, jogando-a na interface do pistão e aproveitando os gases de combustão que arrefeciam, baixando a pressão. A descida do pistão fazia subir a água ou carvão pela ação da própria pressão atmosférica rotacionando o sistema (MARTINS, 2006).

Dando sequência ao desenvolvimento das máquinas térmicas, tempos depois, surgiram os motores a vapor que, inicialmente, funcionavam por depressão tal como os motores propostos por Leonardo e Huygens. Nestas máquinas a pressão atmosférica era responsável por produzir o efeito motor. Inicialmente a condensação se dava pelo arrefecimento do cilindro, processo muito lento que foi aperfeiçoado por James Watt, em 1769, através da invenção de um condensador externo ao cilindro, que permitiu a utilização de vários cilindros por unidade de tempo. Além disso, Watt também propôs utilizar a sobrepressão do vapor como efeito motor, aumentando a pressão sobre o pistão, porém, o sistema originou muitas mortes por explosões (MARTINS, 2006).

Durante anos o homem buscou então desenvolver o motor para aproveitar melhor a energia disponível na natureza, aumentar a eficiência do seu trabalho e das máquinas existentes e trazer, além de tudo, mais conforto e facilidades no dia-a-dia. Porém, nem todas as alternativas desenvolvidas durante esse curto intervalo de tempo da invenção dos motores foram bem-sucedidas, mas, para Martins (2006), os motores de compressão prévia merecem destaque.

Em 1862, Beau de Rochas apresentou uma proposta de patente que sugeria 4 pontos para o desenvolvimento de um motor de compressão prévia, onde no primeiro ponto, o cilindro apresentava o máximo de volume e o mínimo de superfície, no segundo a mais alta velocidade possível, seguido do terceiro ponto, onde haveria a maior expansão possível e por fim o quarto ponto com a maior pressão possível no início da expansão, porém, devido à falta de pagamento da inscrição a patente foi invalidada. Mas anterior a Beau de Rochas, Barnett, em 1838, já possuía um motor semelhante ao proposto por Nicolaus Otto, pioneiro neste ramo da engenharia, onde se compreendia meios-tempos de admissão, compressão, expansão e escape, denominado de motores de 2 tempos (MARTINS, 2006).

O motor de combustão interna vem sofrendo modificações desde a sua primeira patente e após tantas modificações, SENAI (2002) entende que o motor de combustão interna funciona através da força de expansão dos gases em combustão que impulsiona o êmbolo para baixo, e a biela transforma seu movimento alternado de sobe e desce em movimento rotativo da manivela conforme a Figura 6.

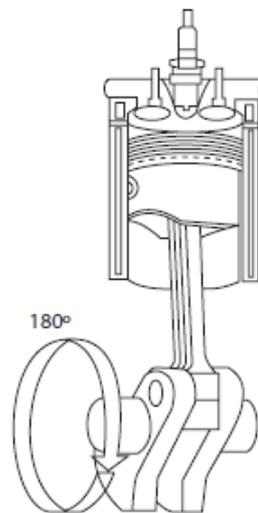


Figura 6 - Movimento rotativo da manivela
Fonte: Brunetti, 2012

Ainda conforme SENAI (2002) esse motor é comumente conhecido como motor ciclo Otto e surgiu simultaneamente na Alemanha e França em fins do século XIX. Desde então vem sofrendo modificações e aperfeiçoamentos técnicos que tem resultado em um extraordinário desempenho em termos de potência e economia.

Brunetti (2012) sugere que os processos que ocorrem com o fluido ativo podem gerar diversas classificações para as máquinas térmicas, são elas:

- Motores de combustão externa: quando a combustão acontece externamente ao fluido ativo, que será apenas o veículo de energia térmica a ser transformada em trabalho.
- Motores de combustão interna: quando o fluido ativo participa diretamente da combustão.

Dando ênfase aos motores de combustão interna, pode-se classificá-los quanto à forma de obtenção de trabalho mecânico em:

- Motores rotativos: quando o trabalho é obtido diretamente por um movimento de rotação.
- Motores de impulso: quando o trabalho é obtido pela força de reação dos gases expelidos em alta velocidade pelo motor.

- Motores alternativos: quando o trabalho é obtido pelo movimento de vaivém de um pistão, transformado em rotação contínua por um sistema biela-manivela.

Os motores alternativos podem ser classificados quanto a sua ignição, uma vez que a combustão é um processo químico exotérmico de oxidação de um combustível. Sendo assim, pode-se classificar como (TAYLOR, 1988):

- Motores de ignição por faísca ou Otto: onde a mistura ar-combustível é admitida, no interior dos cilindros e inflamada por uma centelha gerada pelos eletrodos de uma vela.
- Motores de ignição espontânea ou Diesel: onde o pistão comprime somente ar, até que atinja uma temperatura suficientemente elevada. Quando o pistão se aproxima do ponto morto superior, injeta-se o combustível que reage espontaneamente com o oxigênio presente no ar quente.

As diferentes formas de funcionamento dos dois tipos de motores criam características distintas que obedecem ao ciclo proposto por Otto e Diesel e, de certa forma, direcionam as suas aplicações (BRUNETTI, 2012).

O ciclo Otto é o ciclo ideal dos motores alternativos de ignição por centelha e o seu nome se deve a Nikolaus A. Otto, criador do primeiro motor quatro tempos, em 1876. A denominação de motor de quatro tempos se deve à execução pelo pistão de quatro cursos completos dentro do cilindro, e a realização, pelo eixo de manivelas, de duas revoluções para cada ciclo termodinâmico, como mostrado nas Figuras 7 e 8 (ÇENGEL, 2006).

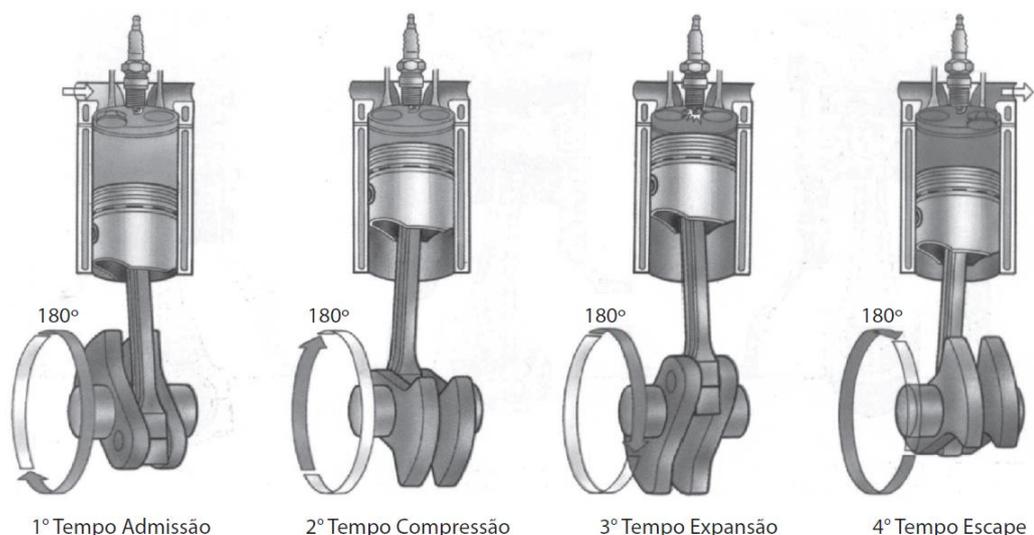


Figura 7 - Os quatro tempos para o Ciclo Otto
Fonte: Brunetti, 2012

Inicialmente, com a válvula de admissão aberta admite-se o ar e o combustível, enquanto a de descarga fica fechada e o pistão se encontra no ponto morto inferior. Em seguida, a válvula de admissão é fechada e o pistão move-se para cima, comprimindo a mistura de ar e combustível. Logo depois que o pistão atinge o ponto morto superior, a vela solta faísca e a mistura sofre ignição, aumentando a pressão e a temperatura do sistema. Os gases à alta pressão forçam o pistão para baixo, o que, por sua vez, força o eixo de manivelas a girar, produzindo trabalho útil durante o curso de expansão. Ao final do ciclo, o pistão se encontra na posição mais baixa e o cilindro está cheio de produtos de combustão. O pistão move-se para cima mais uma vez, expulsando os gases de exaustão através da válvula de escape, e uma segunda vez para baixo sugando a mistura de ar fresco e combustível através da válvula de admissão iniciando um novo ciclo, conforme a Figura 8.



Figura 8 - Ciclo Otto ideal completo
Fonte: UOL Educação, Física do automóvel e GREF, 2016

Pode-se assim resumir que o ciclo termodinâmico ideal do motor de combustão interna tipo Otto em quatro processos internamente reversíveis: compressão isentrópica de B para C, fornecimento de calor a volume constante de C para D, expansão isentrópica de D para E e rejeição de calor a volume constante de E para B.

Já nos motores de dois tempos, de acordo com Çengel (2006), todas as quatro funções descritas anteriormente são executadas apenas em dois tempos: o tempo motor e o tempo de compressão. Nesses motores, o cárter é vedado, e o movimento para baixo do pistão é utilizado para pressurizar ligeiramente a mistura de ar e combustível no cárter. As válvulas de admissão e de descarga são substituídas por aberturas na parte inferior da parede do cilindro, como mostrado na Figura 9.

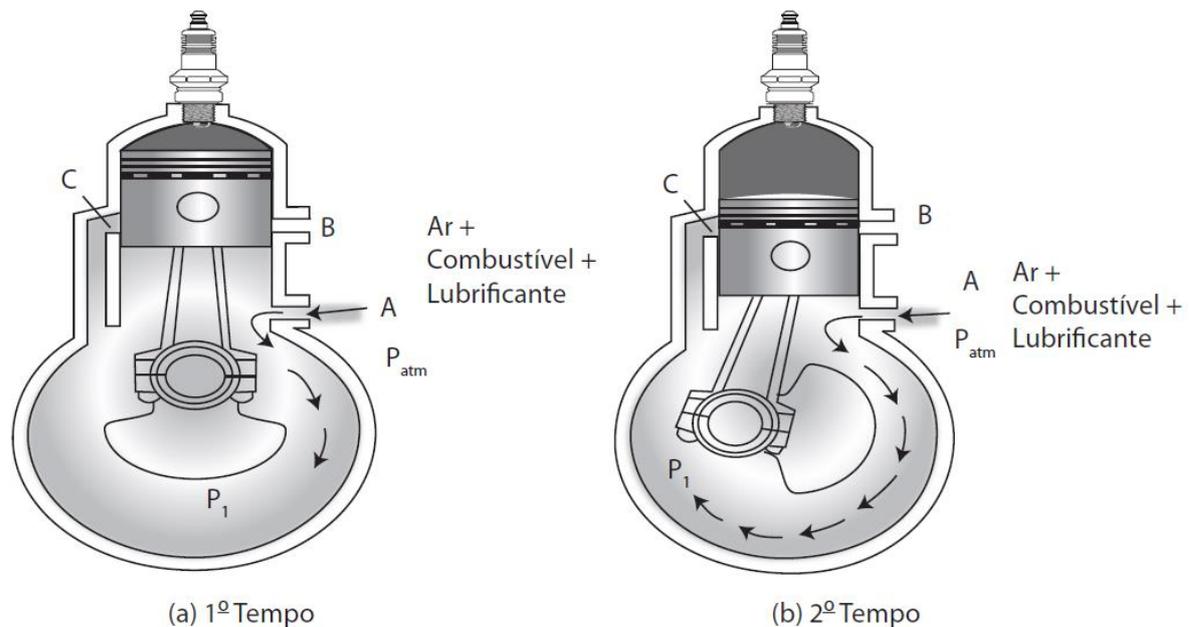


Figura 9 - Motor dois tempos de ignição por centelha
Fonte: Brunetti, 2012

Durante o funcionamento do motor de dois tempos o pistão descobre primeiro a janela de exaustão, permitindo que os gases de exaustão do ciclo anterior sejam parcialmente expelidos e, em seguida, a janela de admissão, permitindo que a mistura de ar e combustível entre e expulse a maior parte dos gases de exaustão restantes do cilindro. Uma nova mistura é então comprimida à medida que o pistão se move para cima durante o tempo de compressão, sofrendo ignição por faísca ocorrendo assim a combustão da mistura, por fim, inicia-se novamente o ciclo de exaustão dos gases e admissão de ar combustível. Vale ressaltar que para motores dois tempos é muito importante a utilização de lubrificante juntamente como combustível, para evitar qualquer problema no funcionamento.

Çengel (2006) destaca que motores de dois tempos em geral são menos eficientes do que seus equivalentes de quatro tempos, por causa da expulsão incompleta dos gases de exaustão e da expulsão parcial da mistura de ar fresco e combustível com os gases de

exaustão. Entretanto, eles são relativamente simples e baratos, e têm melhores relações potência-peso e potência-volume, o que os torna adequados para aplicações que exigem tamanho pequeno e pouco peso como motocicletas.

O ciclo Diesel é o ciclo ideal dos motores alternativos de ignição por compressão. O motor de ignição por compressão, proposto pela primeira vez por Rudolph Diesel, nos anos de 1890 (ÇENGEL, 2006). Neste ciclo, de acordo com Van Wylen (2003), o calor é transferido ao fluido de trabalho a pressão constante e corresponde à injeção e queima do combustível. Em seguida, os gases da combustão sofrem uma expansão isentrópica, até que o pistão atinja o ponto morto inferior e os eliminem pela válvula de escape.

Sendo assim, a grande diferença entre ambos os ciclos é que nos motores à gasolina, uma mistura de ar e combustível é comprimida, e as taxas de compressão são limitadas pelo início da auto-ignição do motor. Nos motores a diesel, apenas o ar é comprimido durante o tempo de compressão, eliminando a auto-ignição. Portanto, os motores diesel podem ser desenvolvidos para operarem a taxas de compressão muito mais altas, entre 12 e 24 (ÇENGEL, 2006).

Brunetti (2012), utiliza, para calcula da taxa de compressão (r_v) de um motor de combustão interna a razão entre o volume total (V_1), encontrado no ponto morto inferior, e o volume morto (V_2) encontrado no ponto morto superior.

$$r_v = \frac{V_1}{V_2} \quad (1)$$

2.3 Combustão

Segundo Leal (2016) o processo de combustão caracteriza-se por uma reação exotérmica muito rápida entre o combustível e o oxidante (comburente), acompanhada por liberação de calor. Em geral, os elementos químicos nos combustíveis responsáveis pela liberação de calor são carbono, hidrogênio e enxofre. Ainda segundo Leal (2016) o termo combustão completa é usado para descrever a reação ideal de combustão, quando todo carbono no combustível é oxidado para dióxido de carbono (CO_2), todo hidrogênio para água (H_2O) e todo enxofre para dióxido de enxofre (SO_2). Considera-se, também, para efeito de cálculo, que todo o nitrogênio presente no combustível ocorra nos produtos como nitrogênio gasoso (N_2).

Assumindo que o processo de combustão possa ser descrito por uma reação química simples, Leal (2016) representa-a da seguinte forma:



Sendo o combustível e o oxidante comumente chamados de reagentes. A Tabela 2 mostra uma comparação entre os valores de poder calorífico inferior e superior dos combustíveis comumente utilizados no Brasil e o hidrogênio.

Tabela 2 - Valores de Poder Calorífico de diferentes combustíveis.

Combustível	Poder Calorífico Superior a 25°C e 1 atm [kJ/g]	Poder Calorífico Inferior a 25°C e 1 atm [kJ/g]
Hidrogênio	141,86	119,93
Metano	55,53	50,02
Gasolina	47,50	42,50
Diesel	46,00	43,00
Gás Natural	52,00	47,00
Etanol	30,57	27,71

Fonte: Santos, 2005

De acordo com a Tabela 2, o alto poder calorífico do hidrogênio, tanto superior de 141,86 kJ/g, quanto inferior, de 119,93 kJ/g, chega a quase 2,5 vezes aos dos demais combustíveis, em especial quando comparado à gasolina, de poder calorífico superior de 47,50 kJ/g e inferior de 44,50 kJ/g. Assim, para satisfazer à mesma quantidade de energia de um hidrocarboneto são necessárias 2,5 vezes menos massa de hidrogênio, de acordo com Santos (2005). Sem levar em conta que os gases poluentes provenientes da combustão do gás hidrogênio são insignificantes, quando comparados também à queima de hidrocarboneto.

Segundo Leal (2016), na maior parte das aplicações de combustão, o oxidante considerado é o ar atmosférico, cuja composição volumétrica é dada na Tabela 3. Para fins de cálculo, considera-se o ar como tendo 21%v de oxigênio e 79%v de nitrogênio. Dessa forma, assume-se que as frações molares do oxigênio (X_{O_2}) e do nitrogênio (X_{N_2}) no ar são de 0,21 e 0,79, respectivamente, o que se presume que o ar contém, aproximadamente 3,76 moléculas de nitrogênio para cada molécula de oxigênio. Sendo as massas moleculares de oxigênio e nitrogênio gasosos iguais a 32 e 28 g.gmol⁻¹, a composição mássica do ar será de 23,2%p de oxigênio* e 76,8%p de nitrogênio.

Tabela 3 - Composição do ar atmosférico seco ao nível do mar.

Componente	Porcentagem por volume
Nitrogênio	78,084
Oxigênio	20,946
Argônio	0,934
Dióxido de Carbono	0,037
Neônio	0,001818
Hélio	0,000524
Metano	0,0002
Criptônio	0,000114
Hidrogênio	0,00005
Monóxido de Nitrogênio	0,00005
Xenônio	0,000009

Fonte: UFSC, 2014

2.4 Combustível

A Aneel, em seu Atlas de Energia Elétrica do Brasil de 2015, sugere que inicialmente os combustíveis fósseis eram utilizados por diferentes povos, como romanos, chineses e incas, para atividades específicas e, somente a partir de meados do século XIX, começaram a ser empregados em larga escala, principalmente em países como os Estados Unidos, como substituto do carvão mineral na produção de vapor. Porém, destaca também que o crescimento maior veio a partir da invenção do motor de combustão. Sendo assim, no final do mesmo século, com o advento do crescimento do transporte motorizado a demanda de gasolina cresceu muito rapidamente, consolidando a indústria do petróleo.

Brunetti (2012) destaca que no século XIX a gasolina era composta basicamente de destilados leves de petróleo, com baixa resistência à detonação, mas a adição de álcoois etílico e metílico mostrou-se eficaz na inibição e melhorou a qualidade do combustível. Ainda, no século XIX, mais precisamente em 1921, Midgley e Brown constataram em laboratório que o Chumbo-Tetra-Etila também era bastante eficaz na inibição da detonação espontânea, tornando-se então o principal aditivo para a gasolina.

Sendo assim, durante o século XIX, o petróleo foi o grande propulsor da economia internacional, chegando a representar nos anos 70, de acordo com dados da Aneel (2015), quase 50% do consumo mundial de energia primária, panorama que não mudou muito nos dias atuais, com um consumo de 43%, segundo dados da Agência Internacional de Energia (2003).

De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2015 feito pelo Ministério de Minas e Energia – MME a produção nacional de petróleo cresceu 11% em 2014, atingindo a média de 2,25 milhões de barris diários. Esse crescimento também resultou no aumento de 2,4% na produção de derivados nas refinarias nacionais, atingindo a marca de 110,4 milhões de tep, com destaque para óleo diesel e gasolina, que participaram com 39% e 20%, respectivamente, da produção total.

No Brasil, parte da desaceleração do crescimento do consumo de gasolina nos últimos anos se deve à presença obrigatória de álcool etílico, desde 1935 que começou em 5%. Atualmente, esse teor é definido pelo Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Brasil e se encontra, conforme a Lei no 12.490/2011 entre 18 a 25%. Entretanto, esse valor já está alterado e ultrapassando os exigidos 25%.

Pelo lado do consumo foi registrado também um crescimento de 3,5% de óleo diesel e de 5,3% de gasolina automotiva. Sendo que o setor de transporte respondeu por 77,1% do consumo final energético de óleo diesel (EPE, 2015). É importante ressaltar que atualmente o Brasil é um país autossuficiente em petróleo, visto que nos últimos anos a produção ultrapassou o consumo do combustível no país, como demonstra a Figura 10.

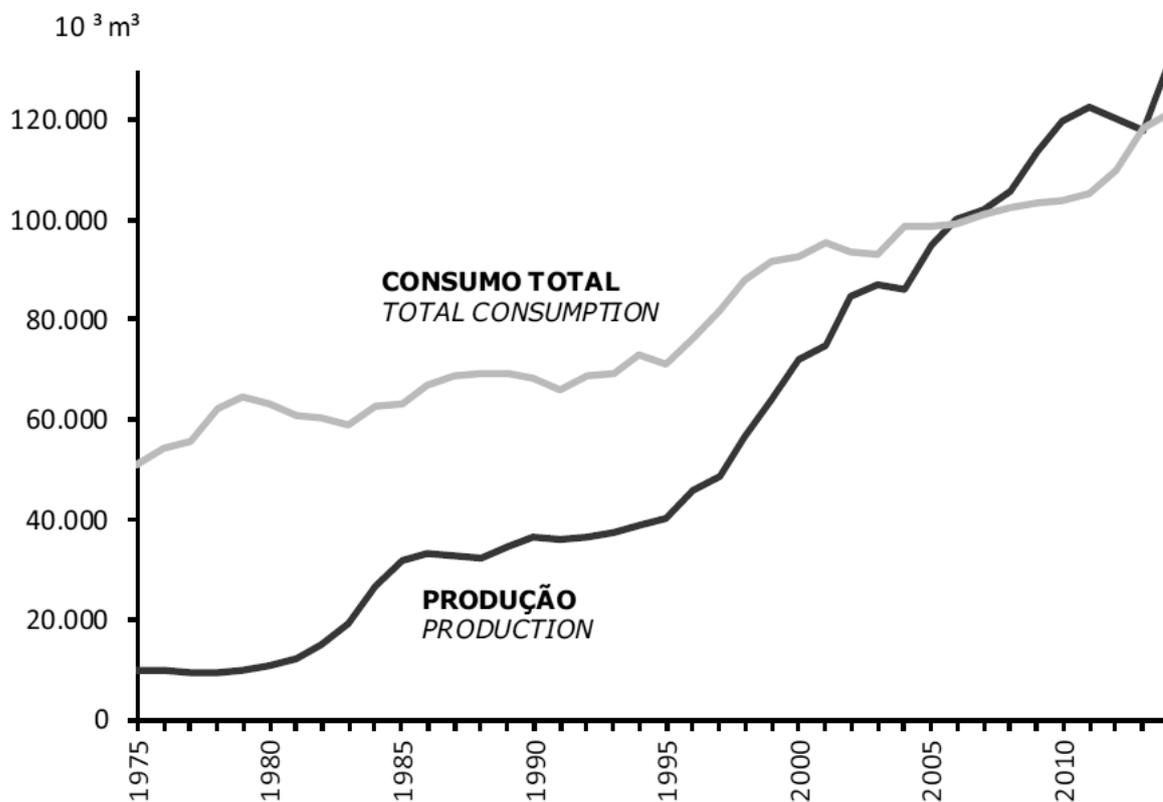


Figura 10 - Consumo total vs. Produção de petróleo
Fonte: Empresa de Pesquisa Energética, 2015

De acordo com a Figura 10, o consumo de petróleo no Brasil era incipiente até a década de 1980. Com a fundação da Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras) em 3 de outubro de 1953 a exploração de petróleo no Brasil se tornou mais forte, porém, a partir de 1980, o crescimento da produção disparou e não diminuiu mais, enquanto o consumo apresentava pequenos aumentos. Como o crescimento da produção muito maior que o consumo 25 anos depois o Brasil conseguiu suprir a sua necessidade de petróleo.

O petróleo é um recurso mineral, de origem orgânica, líquido oleoso, inflamável de cor castanha, com forte cheiro característico e, geralmente, menos denso que a água, retirado do subsolo ou, em casos particulares, da superfície, tal como nos lagos de asfalto. Conforme o local de onde é extraído, as propriedades físicas e composições químicas sofrem variações, mas quimicamente a sua composição se resume em uma mistura complexa de hidrocarbonetos, podendo apresentar em sua estrutura orgânica pequenas quantidades que variam entre 1 a 10% de enxofre, nitrogênio e oxigênio (BRUNETTI, 2012).

Ainda segundo Brunetti (2012), a grande maioria dos motores de combustão interna no mundo utilizam dos derivados do petróleo como combustível. Sendo assim, buscou-se diversos processos para obtenção desses derivados que variam conforme a propriedade que se deseja para o combustível, mas possuem como ponto de partida a destilação atmosférica e a vácuo. Entre os derivados do petróleo, porém, existem dois que se destacam pelo alto consumo no mundo inteiro, são eles a Gasolina e o Óleo Diesel.

A gasolina consiste em uma mistura de diversas naftas obtidas do processamento do petróleo e suas propriedades são balanceadas de modo a dar um desempenho satisfatório em uma grande variedade de condições operacionais dos motores. O óleo diesel, assim como a gasolina, varia bastante de composição em função das especificações de cada país. No Brasil, por exemplo, o combustível recebe adição de $(5 \pm 0,5)\%$ de biodiesel por força de lei federal, definido e regulamentado pela Agência Nacional do Petróleo (ANP). Por fim, as propriedades que mais influem no desempenho do veículo diesel são número de cetano e a volatilidade, o que varia as propriedades do combustível (BRUNETTI, 2012).

Segundo Martins (2002) os combustíveis são constituídos basicamente de carbono e hidrogênio, sendo estes os reagentes, juntamente com o ar para a queima. No caso dos combustíveis líquidos para que ocorra essa mistura é necessária a sua vaporização, assim, é necessário calor (latente de vaporização). No caso dos motores de ignição isso acontece através do seu arrefecimento.

Para que ocorra a combustão completa de um combustível em um motor regido pelo Ciclo Otto é necessário que a mistura esteja dentro do limite de flamabilidade, pois assim, será respeitada a temperatura para a qual mistura inicia espontaneamente a sua combustão. Segue abaixo na Tabela 4 uma relação dos principais combustíveis, seguida da temperatura de ignição e o seu poder calorífico (MARTINS, 2002).

Tabela 4 - Limites de flamabilidade e poder calorífico (fase gasosa ou vapor).

Combustível	Temperatura de Ignição (°C)	Poder Calorífico (MJ/kg)	Poder Calorífico (MJ/m³)	Poder Calorífico (Mistura) (MJ/m³)
Etanol	510	23,5	53,9	4,0
Metanol	464	20	28,5	3,5
Gasolina	300	42	216,5	3,8
Hidrogênio	560	120	10,2	3,0

Fonte: Martins, 2002

É importante ressaltar que apesar do alto poder calorífico em massa do hidrogênio, quando comparado a outros combustíveis, a sua interpretação pode ser enganosa, isto porque, deve-se atentar para o poder calorífico da mistura de ar-combustível pois não há combustão apenas com o combustível. Assim sendo, o hidrogênio perde muito do seu poder calorífico ao ser misturado com o ar, enquanto o gásóleo e a gasolina se mostram mais eficientes.

Outro dado importante para o mundo dos combustíveis e o desenvolvimento do seu meio de trabalho é a octanagem. Pois esta é a propriedade que quantifica a resistência que o combustível tem para explodir por pressão quando usado em motores de combustão interna. Vale ressaltar que no caso dos motores de ignição por centelha, a octanagem pode ser denominada como uma detonação secundária.

Para a medição e comparativo da octanagem dos diversos combustíveis existentes utiliza-se como norma para medir a resistência a explosão o valor de 100 para o combustível octano que serve como parâmetro para os demais, como mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Comparativo do número de octanagem de combustíveis.

Combustível	Número de octano
Hidrogênio	130 + (queima branda)
Metano	125
Propano	105
Octano	100
Gasolina	87
Metanol	30

Fonte: Wollmann, 2013

Além da gasolina e do diesel, é importante ressaltar a importância do etanol como combustível no Brasil, uma vez é obtido através da fermentação natural de açúcares ou pela hidrólise enzimática da celulose (Brunetti, 2012). Seu consumo de acordo com o Balanço Energético Nacional (EPE, 2015) teve um grande aumento entre 1975 e 1989, conseqüentemente, com a exploração do combustível, a gasolina perdeu lugar no mercado, mas nos últimos anos, ambos têm seu consumo aumentado de forma proporcional, uma à outra, fato que pode ser relacionado à nova legislação brasileira que proporcionou o aumento da porcentagem de etanol na gasolina vendida no Brasil.

2.5 Hidrogênio

De acordo com Rifkin (2003) o átomo de hidrogênio foi descoberto em 1776, por Henry Cavendish, através de experimentos onde se realizava a decomposição da água. A partir de então, começaram os estudos sobre este importante elemento. Anos depois, com o avanço da ciência e dos estudos sobre o átomo de hidrogênio, cientistas constataram que ele é o elemento mais simples e abundante do universo, presente em 93% das moléculas. Na Terra, principalmente devido à sua presença na molécula de água, o hidrogênio aparece em 75% da superfície terrestre, segundo Souza (2009).

O átomo de hidrogênio é representado quimicamente pela letra H e, como elemento mais simples descoberto, é composto por apenas um próton e um elétron, o que o torna também o mais leve. Com características muito particulares ele não se encaixa em nenhum grupo de elementos, isto porque sua natureza eletropositiva o assemelha à família dos metais alcalinos, porém também se assemelha aos halogêneos, por aceitar apenas um elétron na sua camada de valência.

Como o hidrogênio necessita apenas de um elétron a mais para alcançar seu nível estável ele pode ser encontrado na forma de hidrogênio molecular (H_2), que nada mais é que dois átomos ligados que partilham seus únicos elétrons em uma ligação denominada covalente. Essa molécula, que à temperatura ambiente se encontra em forma de gás, possui uma quantidade de energia por unidade de massa superior a qualquer outro combustível conhecido, com 120,7 kJ/g, possui também a maior quantidade de energia por unidade de peso, 141,9 kJ/g, ou seja, aproximadamente 2,8 vezes mais do que a mesma quantidade de gasolina (SANTOS, 2005).

Segundo Angheben (2013), com dados de Souza (2009) e Saravanan (2010) as propriedades físicas do hidrogênio quando comparada com outros combustíveis utilizados nos dias de hoje são mostradas na Tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades físicas do hidrogênio e outros combustíveis

Propriedades	H₂	CH₄	Gasolina
Temperatura de autoignição (°C)	585	540	237
Temperatura de chama (°C)	2.045	1.875	2.200
Limite de ignição no ar (%v.)	4 – 75	5,3 – 15	1,0 – 7,6
Velocidade de propagação da chama no ar (m/s)	2,65	0,4	0,4
Coefficiente de difusão no ar (cm ² /s)	0,61	0,6	0,05
Toxicidade	Não	Não	Sim

Fonte: Angheben, 2013

É possível perceber, através dos dados da Tabela 6, que o hidrogênio, possui uma velocidade de propagação de chama no ar muito maior do que o dos demais combustíveis. Essa propriedade permite, por exemplo, que a combustão de uma mistura ar-gasolina-hidrogênio seja mais rápida e eficiente, uma vez que o tempo de combustão será reduzido. Outro fator importante é a temperatura de autoignição que, apesar de maior, contribui para o controle da combustão da gasolina, algo procurado séculos atrás a fim de melhorar o desempenho do motor de combustão interna.

Segundo Estevão (2008), o gás hidrogênio, por ser o menor dos elementos conhecidos até hoje apresenta como grande barreira o seu armazenamento de forma segura. O átomo pode ser armazenado de duas formas, a primeira é em estado líquido arrefecido até -253°C e a segunda em forma do próprio gás, que deve ser pressurizado para que se consiga uma quantidade razoável armazenada, do mesmo jeito, deve-se redobrar o cuidado, uma vez que o tamanho do átomo é muito pequeno e não é qualquer cilindro que seja capaz de armazená-lo.

A utilização do hidrogênio como combustível ainda está muito longe de se tornar um grande sucesso, pois segundo Martins (2002) a mistura ar-hidrogênio não apresenta um poder calorífico tão elevado quando comparado com os demais combustíveis fósseis.

Porém, segundo Estevão (2008) engenheiros defendem o uso do hidrogênio como aditivo para diversos combustíveis, principalmente para a gasolina. A adição de pequenas quantidades de hidrogênio à gasolina, aumenta a velocidade da chama em todas as relações equivalente da gasolina, tornando possível o motor trabalhar com uma mistura menor de ar-gasolina.

Ainda segundo Estevão (2008) o conceito de utilização de hidrogênio associado à gasolina tem tido mais importância do que a utilização do hidrogênio puro, pois implica em modificações menores nos motores atuais, além de permitir a redução da emissão de poluentes e melhorias na eficiência térmica.

O átomo de hidrogênio é quimicamente muito ativo e raramente é encontrado sem nenhuma ligação, isto é, apenas como átomo (H) ou molécula (H₂), estando, na maioria das vezes, associado a combustíveis fósseis e, principalmente, a água, presente em todos os organismos vivos. Assim, para trabalhar apenas com o gás se faz necessária a separação dos átomos dos outros elementos.

Existem, atualmente, diversos processos de separação do hidrogênio dos demais átomos que diferem conforme o ambiente de trabalho.

- No laboratório: reação de hidretos metálicos, reação de liga de ferro-titânio, cloroplastos artificiais (Melvin Klain), reação de liga de níquel-magnésio, reações de metais com ácidos
- Na indústria: eletrólise da água, decomposição da amônia, decomposição do metanol, reações de carvão ou hidrocarbonetos com vapor de água em alta temperatura

O hidrogênio pode ser assim obtido através de inúmeros processos, no entanto, aquele que apresenta menor relação custo benefício é a reação de reforma do metano (SMR), onde se retira o hidrogênio do gás natural, encontrado com certa abundância na natureza. Porém, apesar dos benefícios desse processo e de sua eficiência já comprovada, na atualidade, o processo de eletrólise da água vem sendo muito empregado.

2.6 Eletrólise

Segundo Estevão (2008), a eletrólise é um processo eletroquímico em que os íons de um eletrólito de carga elétrica positiva e negativa são transportados pela corrente elétrica e transformados em partículas neutras. No caso de se tratar de um composto dissolvido, este sofre uma decomposição mais ou menos completa por ação da água, quando esta se dissocia em íons.

Para efetuar a eletrólise, mergulham-se dois eletrodos, um polo positivo e outro negativo, na solução do eletrólito que permite a passagem da corrente elétrica derivada de

uma fonte. Os íons de carga positiva, são então atraídos para o catodo que captam os elétrons e os neutralizam, enquanto os íons negativos deslocam-se para o anodo, onde depositam o excesso de elétrons e também se neutralizam, como pode ser visto na Figura 11. Sendo assim, a eletrolise converte a energia elétrica em energia química para a quebra das moléculas (ESTEVIÃO, 2008).

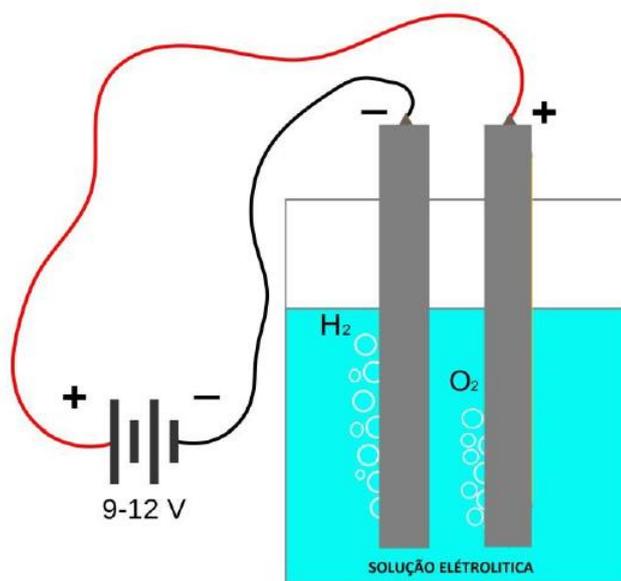


Figura 11 - Gerador de hidrogênio por eletrólise
Fonte: Wollmann, 2003

A corrente sai de uma fonte geradora de 9 a 12 V e é conduzida até uma placa metálica imersa em uma solução eletrolítica. Esta mesma corrente é forçada a passar pela solução em direção a uma segunda placa carregada negativamente. Durante a passagem, a corrente, dissocia a solução eletrolítica em moléculas de hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2). Esses produtos são então liberados em forma de bolhas e captados conforme a necessidade do sistema.

No mercado, podem ser encontrados dois tipos de eletrolisadores, um primeiro que consiste em placas submersas como esquematizado na Figura 11 e mostrado na Figura 12, denominado como eletrolisador molhado. Um segundo tipo, é também conhecido como eletrolisados a seco, mostrado na Figura 13.

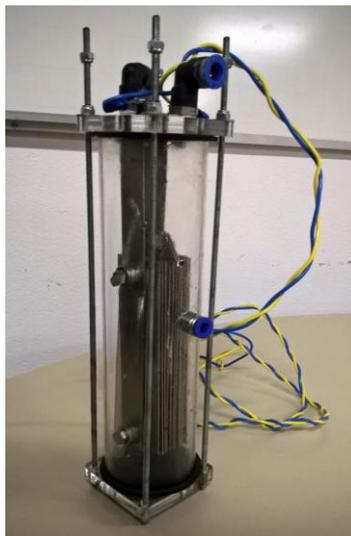


Figura 12 - Eletrolisador molhado
Fonte: Pesquisa direta, 2016

Um eletrolisador do tipo molhado é então caracterizado por ter as placas submersas por completo na solução eletrolítica. A distribuição das placas é feita de tal forma a permitir a passagem da corrente e o seu melhor aproveitamento para a eletrólise, isto é, o maior número de placas e área em contato com a solução. Possui para isso uma entrada de corrente e uma saída, a ser determinado pelo usuário. Além disso, este tipo de eletrolisador possui um borbulhador, contendo uma esponja metálica para evitar que gotas de água com eletrólito sejam carregadas para o motor (atuação como *demister*).

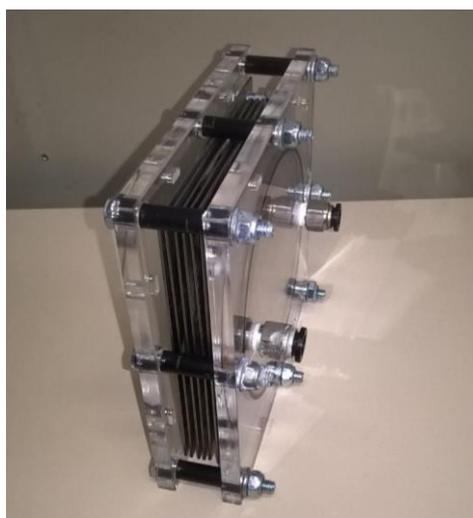


Figura 13 - Eletrolisador a seco
Fonte: Pesquisa direta, 2016

Como é possível perceber, pela Figura 13, a grande diferença entre o eletrolisador a seco e o molhado se dá devido à disposição das placas e o sistema de armazenamento de água,

uma vez que esta fica em contato com uma parte da placa, vedada de tal forma que não permite a perda de solução eletrolítica.

2.7 Análise de desempenho

De acordo com Brunetti (2012) o estudo dos ciclos reais se torna difícil devido à complexidade da composição dos combustíveis que varia durante os processos, além da complexidade dos próprios processos. Porém, para facilitar este estudo e chegar a conclusões qualitativas e quantitativas, associa-se o ciclo real ao ideal (padrão) considerando as seguintes hipóteses:

- O fluido ativo é ar, considerado gás perfeito;
- Não há admissão nem escape, para que seja possível utilizar a primeira lei da termodinâmica para sistemas;
- São isentrópicos os processos de compressão e expansão;
- A combustão é considerada como fornecimento de calor para a mistura;
- É retirado calor por uma fonte isocórico para que o sistema retorne às condições iniciais;
- Todos os processos são considerados reversíveis.

Associadas todas as hipóteses apresentadas é possível obter os diagramas p-V e T-S, mostrados na Figura 14.

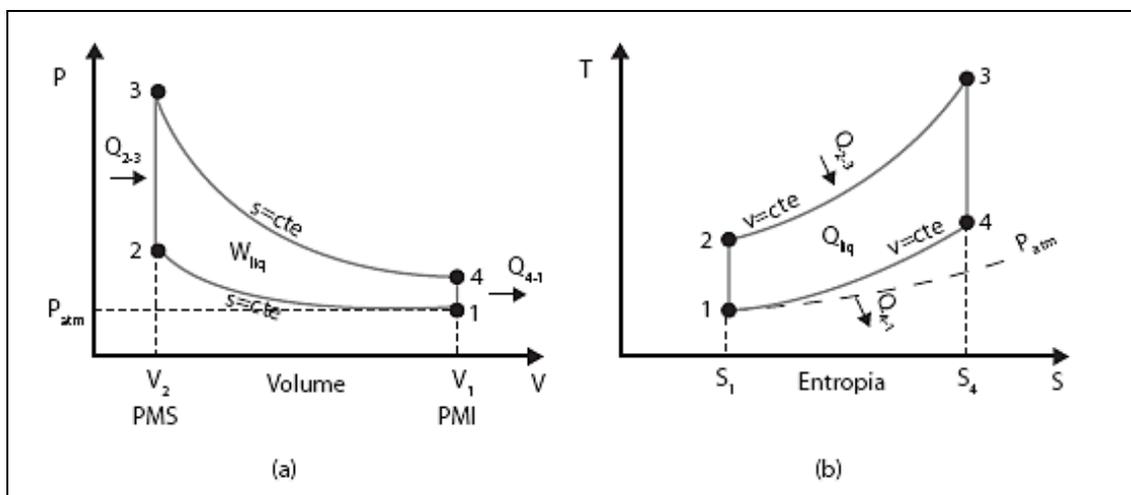


Figura 14 - Diagramas p-V e T-S do ciclo Otto ideal
Fonte: Brunetti, 2012

Sendo assim, o trabalho útil do Ciclo Otto ou apenas o trabalho do ciclo (W_c), como nomeado por Brunetti (2012) será a diferença entre o trabalho de expansão (W_{exp}), e de compressão (W_{compr}), como expresso na equação 2.

$$W_c = W_{exp} - W_{compr} \quad (2)$$

Para o cálculo do calor útil (Q_u), como é possível perceber pelo diagrama do Ciclo Otto, utiliza-se a diferença do calor fornecido, durante a compressão (Q_{2-3}), e o calor cedido ao meio (Q_{4-1}), durante a expansão, de acordo com a equação 3.

$$Q_u = Q_{2-3} - Q_{4-1} \quad (3)$$

Segundo Brunetti (2012), com a hipótese de que não há admissão ou escape de gases a primeira lei da termodinâmica, desprezando as variações de energia cinética e potencial será dada pela equação 4.

$$Q - W = U_{final} - U_{inicial} \quad (4)$$

E de acordo com a segunda lei da termodinâmica aplicada a motores térmicos é possível a transformação do calor em trabalho, isto é:

$$U_{final} - U_{inicial} \rightarrow Q_u = W_c \rightarrow W_c = Q_{2-3} - Q_{4-1} \quad (5)$$

Como, pela Segunda Lei, não é possível o aproveitamento total do calor fornecido para o ciclo, tem-se então a necessidade de se saber a eficiência térmica (η_t):

$$\eta_t = \frac{W}{Q_h} = \frac{Q_h - Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{Q_c}{Q_h} \quad (6)$$

Ajustando a equação 6 para o Ciclo Otto apresentado, tem-se:

$$\eta_t = \frac{W_c}{Q_{2-3}} = \frac{Q_{2-3} - Q_{4-1}}{Q_{2-3}} = 1 - \frac{Q_{4-1}}{Q_{2-3}} \quad (7)$$

É importante ressaltar também, durante uma análise de desempenho, a eficiência térmica máxima do ciclo que, termodinamicamente falando pode ser dada pela através do

cálculo de eficiência térmica do ciclo de Carnot ($\eta_{t, \text{Carnot}}$), visto na equação seguinte, que consiste apenas de processos reversíveis, sendo dois adiabáticos e outros dois isotérmicos.

$$\eta_{t, \text{Carnot}} = 1 - \frac{Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{T_c}{T_h} \quad (8)$$

Brunetti (2012) destaca que é importante considerar a mistura ar-combustível em um motor de combustão interna como gás perfeito para que seja possível o cálculo tanto da variação energia interna específica (Δu) do sistema, quanto da variação do calor específico (Δh) dadas respectivamente pelas equações de 9 a 12.

$$\Delta u = C_v \cdot \Delta T \quad (9)$$

$$\Delta U = m \cdot C_v \cdot \Delta T \quad (10)$$

$$\Delta h = C_p \cdot \Delta T \quad (11)$$

$$\Delta H = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (12)$$

Além disso, considerando o fluido como gás ideal, pode-se utilizar a seguinte equação para cálculos de diversas variáveis, como pressão, volume, massa e até mesmo temperatura, quando não encontrado diretamente pelo ciclo termodinâmico, uma vez que R representa a constante dos gases.

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad (13)$$

Outras relações importantes para os cálculos, quando se considera o fluido como um gás ideal são a constante adiabática (k) e os cálculos de calor específico a volume constante (C_v) e calor específico a pressão constante (C_p).

$$k = \frac{C_p}{C_v} \quad (14)$$

$$R = C_p - C_v \quad (15)$$

$$C_v = \frac{R}{k - 1} \quad (16)$$

$$C_p = \frac{k.R}{k-1} \quad (17)$$

Ainda para o Ciclo Otto, considerando que os processos de compressão e expansão são isentrópicos tem-se as seguintes relações de pressão (p), volume (V) e temperatura (T), sendo que para o ar a constante k tem o valor de 1,4.

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k \quad (18)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} \quad (19)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (20)$$

Voltando para a Primeira Lei da termodinâmica, considerando o ciclo Otto tem-se a equação 21.

$$Q_{2-3} - W_{2-3} = U_3 - U_2 \quad (21)$$

Onde o processo de compressão é isocórico e o calor que entra no sistema é o mesmo fornecido pela fonte no início do processo (Q_1), isto é, $W_{2-3} = 0$ e $Q_{2-3} = Q_1$, respectivamente. Tem-se então, como resultado, as equações 22 e 23 para a Primeira Lei da termodinâmica para o ciclo.

$$Q_{2-3} = U_3 - U_2 = m.C_v.(T_3 - T_2) \quad (22)$$

$$Q_{4-1} = U_4 - U_1 = m.C_v.(T_4 - T_1) \quad (23)$$

Logo, com essas considerações é possível obter a seguinte relação para a eficiência térmica do ciclo:

$$\eta_t = \frac{W_c}{Q_{2-3}} = \frac{Q_{2-3} - Q_{4-1}}{Q_{2-3}} = 1 - \frac{Q_{4-1}}{Q_{2-3}} = 1 - \frac{m.C_v.(T_4 - T_1)}{m.C_v.(T_3 - T_2)} \quad (24)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{m \cdot C_v \cdot (T_4 - T_1)}{m \cdot C_v \cdot (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \left[\frac{(T_4/T_1) - 1}{(T_3/T_2) - 1} \right] \quad (25)$$

E através da relação de temperatura e volume, com a consideração de que os volumes no ponto inicial 1 e no final 4 são iguais, como também ocorre com os volumes em 2 e 3, ambos comprovados através da análise do diagrama P-v, portanto:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} \quad (26)$$

Assim, é possível três formas diferentes para o cálculo da eficiência térmica de um motor de combustão interna, são elas:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (27)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{r_v^{k-1}} \quad (28)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\frac{k-1}{k}}} \quad (29)$$

Por fim, dois outros fatores também podem ser calculados para análise de desempenho a potência do ciclo (N_c), que leva em consideração o tipo de motor (2 ou 4 tempos) e o trabalho, e a fração residual de gases (f), isto é, segundo Brunetti (2012) a relação entre a massa dos gases residuais e a massa total da mistura existente no cilindro, dadas pelas equações 30 e 31:

$$N_c = W_c \cdot \frac{n}{x} \quad (30)$$

$$f = \frac{m_{res}}{m_{tot}} = \frac{m_{res}}{m_{ar} + m_{comb} + m_{res}} \quad (31)$$

Sendo assim, neste capítulo foi apresentado a revisão bibliográfica sobre motocicleta, motores de combustão interna, combustíveis, hidrogênio e da eletrólise como sua forma de

obtenção. Foi apontando também o funcionamento do mecanismo de eletrolise, o eletrolisador, e os passos para cálculo de desempenho de um motor de combustão interna regido pelo Ciclo Otto.

Os conceitos abordados são importantes para o melhor entendimento de todo o processo de análise de desempenho, inclusive da grande influência positiva da presença do hidrogênio na mistura ar-combustível. Além do conhecimento dos componentes do sistema de uma motocicleta e do funcionamento do motor de combustão interna empregado nesse veículo.

No próximo capítulo serão mostradas as classificações referentes ao tipo de pesquisa, apresentando as ferramentas e técnicas utilizadas para realizar a análise de desempenho do motor de combustão interna de uma motocicleta utilizando o hidrogênio como aditivo para a gasolina. Será apontado também todos os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento efetivo da pesquisa. Além de apresentar também a área em que ocorre esta pesquisa e a forma de coleta de dados do motor as misturas ar-combustível e hidrogênio.

3 METODOLOGIA

Este capítulo tem como finalidade demonstrar as características do desenvolvimento da pesquisa sobre a análise de desempenho de um motor de motocicleta com mistura combustível e hidrogênio. Será apresentada a natureza da pesquisa, o tipo, as variáveis e indicadores coletados, o instrumento de captação e a tabulação dos dados.

3.1 Tipo de Pesquisa

De acordo com o dicionário online Michaelis, pesquisar significa buscar, indagar, inquirir e investigar, mas Minayo (2003) destaca, de forma mais filosófica, que a pesquisa é uma atividade básica das ciências que buscam a realidade, uma atitude e uma prática teórica de constante procura que define um processo inacabado e permanente.

Ainda conforme Minayo (2003), a pesquisa pode ser classificada de duas formas, como qualitativa ou quantitativa, onde o método qualitativo se baseia na interpretação, constituído por um conjunto de técnicas a serem adotadas para construir uma realidade buscando estudar as conjunturas difíceis de serem descritas numericamente, reunindo todas as informações pela análise, descrição e gravação.

Já o conjunto de informação que podem ser quantificadas utilizando métodos estatísticos, opiniões e dados obtidos de acordo com pesquisas, análises numéricas e teste é denominada pesquisa quantitativa (SILVA, 2004).

O objetivo de uma pesquisa, segundo Gil (1999) pode ser classificada como exploratória, isto é, com a finalidade é esclarecer, desenvolver e modificar ideias e conceitos, envolvendo levantamento bibliográfico, documental, entrevistas e estudos de caso, tendo como principal técnica, a coleta de dados; e explicativa, que identifica os fatores que contribuem ou determinam a ocorrência dos fenômenos, de modo a aprofundar o conhecimento da realidade, explicando a razão e o porquê das coisas.

Enfatizando os procedimentos técnicos, ainda de acordo com Gil (1999), a pesquisa bibliográfica baseia-se na utilização de livros e obras acadêmicas e também por meio de dados que se obtém através de estudo de casos e experimentos. Fonseca (2002) especifica a pesquisa documental como sendo aquela elaborada através de diversas fontes sem tratamentos analíticos. Já a pesquisa ação é realizada e concebida a partir de bases empíricas em estreita

associação, com a ação ou resolução de um problema. Por fim, segundo Yin (2001), o estudo de caso envolve um estudo minucioso e exaustivo de um ou mais objetos de maneira a permitir um amplo e detalhado conhecimento, com a lógica do planejamento, da coleta e da análise de dados.

Entretanto, a pesquisa experimental, é a grande responsável pelos maiores avanços científicos, por meio da manipulação de variáveis controladas adequadamente, com o intuito de observar, examinar e interpretar as alterações e reações ocorridas em seu objeto de pesquisa, utilizando técnicas e equipamentos adequados.

Baseado nas informações apresentadas, este trabalho consiste, quanto à abordagem de uma pesquisa, em uma pesquisa quantitativa, pois utiliza de dados numéricos, cálculos e processo de análise estatística. Quanto ao objetivo, em uma pesquisa descritiva, devido ao fato de que irá se observar e analisar o princípio de funcionamento do motor de combustão interna utilizado em motocicletas com uso de mistura de combustível e hidrogênio, a fim de descrever e registrar resultados de consumo, torque e potência com o uso de um aditivo e futuro combustível alternativo. O presente trabalho ainda abrange uma pesquisa de caráter bibliográfico, visto que é fundamentada em uma variedade de livros, teses, dissertações, artigos e internet, com o objetivo de enriquecer teoricamente o estudo.

3.2 Materiais e Métodos

Um estudo bibliográfico foi realizado a fim de auxiliar na análise de desempenho de um motor de combustão interna utilizando hidrogênio como aditivo, tendo sido descrita as principais propriedades do gás hidrogênio, as formas de obtenção e a sua importância como combustível do futuro. Além disso foi abordada a história da motocicleta, juntamente com a dos motores de combustão interna e seus principais componentes e classificações, com ênfase nos ciclos termodinâmicos e nos cálculos de análise de desempenho, onde foram apresentadas as equações.

De forma a obter uma economia no consumo de combustível e uma melhora de desempenho do motor são tomados como conhecidos as propriedades dos combustíveis álcool e gasolina, bem como do hidrogênio, contemplando valores de calor e massa específica e taxa de compressão do motor. Tem-se conhecimento também das dimensões e demais valores do motor fornecidos pelo fabricante.

A análise de desempenho do motor será dividida em três etapas, segundo a ordem lógica de execução de um projeto. A primeira etapa é o levantamento dos dados do motor escolhido fornecidos pela fabricante e das condições de contorno para análise, visando garantir o bom andamento do processo, aplicar e aperfeiçoar os conhecimentos adquiridos no estudo bibliográfico.

A segunda etapa compreende a análise teórica de desempenho onde será utilizado o *software* ExcelTM para a coleta de dados de desempenho, torque, consumo e emissões do motor trabalhando no Ciclo Otto Ideal com e sem o hidrogênio como aditivo.

Em seguida, realiza-se a terceira etapa do estudo, compreendendo então a modelagem da câmara de combustão, dos dutos de admissão e escape do fluido de trabalho feita em 2D através do *software* Ricardo Wave® versão 2016, juntamente com os ensaios numéricos fluido-dinâmicos para aquisição dos dados pretendidos. Durante a modelagem serão realizados dois experimentos visando comparar o Ciclo Otto Real tendo como fluido de trabalho apenas a gasolina e, após, com a mistura gasolina e hidrogênio.

Por fim, na terceira etapa, é feita a comparação dos dados de desempenho, torque, consumo e emissões, através de uma planilha utilizando o programa Excel, possibilitando a conclusão e fechamento de todo o estudo.

A coleta e comparação dos dados permite a comprovação da melhoria do desempenho do motor com a adição de hidrogênio o que abre caminho para o desenvolvimento de um eletrolisador para ser acoplado ao corpo da motocicleta e possibilitar a produção instantânea do gás de acordo com a demanda de consumo da câmara de combustão. Este produto, apesar de não ser inédito no mercado, ainda se encontra em fase de aperfeiçoamento e aceitação pelas fabricantes.

3.3 Variáveis e Indicadores

Segundo Gil (2008), variável é uma medida ou classificação, uma quantidade que varia, um conceito operacional que apresenta ou contém valores, propriedade, aspecto ou fator, identificado em um objeto de estudo e passível de verificação. As variáveis podem ser classificadas em qualitativa ou quantitativa. As variáveis qualitativas podem ser nominais, onde não existe ordenação nas possíveis respostas, ou então ordinais, que existe determinada ordem nas possíveis respostas. Já as variáveis quantitativas são divididas em discretas ou

contínuas, sendo a primeira onde os possíveis valores formam um conjunto finito ou enumerável de números, e a segunda onde estes estão dentro de um intervalo, aberto ou fechado, dos números reais.

Ainda conforme Gil (2008), o conceito variável provém da Matemática que naturalmente é de essência quantitativa, fazendo com que as variáveis usualmente sejam classificadas como contínuas e discretas. Neste trabalho a maior parte das variáveis é, logicamente, de natureza quantitativa.

Para o estudo e medição de cada variável, existem alguns indicadores que são selecionados de acordo com os objetivos da pesquisa. Referente às definições apresentadas e os objetivos do trabalho, são separadas as variáveis e indicadores, segundo mostrado na Tabela 7.

Tabela 7 - Variáveis e Indicadores

Variáveis	Indicadores
Potência do Motor	Eficiência térmica do motor Trabalho do Ciclo Otto Cilindrada do motor Taxa de compressão do motor Tempos do motor Poder calorífico do combustível Massa específica do combustível Massa específica do hidrogênio
Torque do Motor	Potência do motor Rotação por minuto do motor
Consumo do Motor	Vazão mássica de entrada do combustível Vazão mássica de entrada do hidrogênio Potência efetiva do motor

3.4 Instrumento de Coleta de Dados

A coleta de dados é a prática de reunir documentos e provas, pesquisar, procurar dados sobre certo assunto e organizá-los de forma a facilitar análises futuras. A coleta de dados ocorre sobre o tema abordado de forma a obter embasamento necessário para a pesquisa por meio de revisões bibliográficas, observações e experimentos.

A coleta de dados é feita através de manuais, normas, Tabelas, catálogos e de outros trabalhos já realizados, que auxiliam no entendimento e análise de desempenho de motores de combustão interna. Sendo que, é importante a pesquisa de trabalhos já publicados como forma de simplificar os cálculos e experimentos, além de garantir condições mínimas de funcionamento do motor com a mistura.

Como dito anteriormente neste capítulo, esta pesquisa é de natureza bibliográfica, quantitativa e descritiva, logo todos os dados necessários para o estudo serão adquiridos através de pesquisa bibliográfica, utilizando livros, teses, dissertações e catálogos. Haverá também uma parte experimental onde ocorrerá observações diretas, a fim de coletar dados experimentais que serão utilizados na determinação do desempenho de um motor de combustão interna com e sem o hidrogênio como aditivo.

3.5 Tabulação de Dados

A partir dos dados obtidos pela pesquisa bibliográfica e análise experimental, serão realizados cálculos no *software* EXCELTM que permite rápida interação e maior facilidade para determinar resultados a partir de diferentes valores de variáveis para uma mesma fórmula, o que implica em uma simplificação da formulação de uma Tabela de comparação de resultados para a análise de desempenho do motor e suas características de funcionamento.

Após o procedimento no *software* ExcelTM, foi utilizado o *software* Ricardo Wave® versão 2016, possibilitando a modelagem do sistema do motor, isto é, dutos de entrada e saída do fluido de trabalho e o cilindro da câmara de combustão para o estudo de fluido-dinâmica do processo de combustão. Além disso, é utilizado o *software* Microsoft WordTM para relatar e discutir os resultados obtidos.

3.6 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foram mostradas as classificações referentes ao tipo de pesquisa, apresentando as ferramentas e técnicas utilizadas para realizar a análise de desempenho de um motor de combustão interna utilizado em motocicletas funcionando com mistura combustível e hidrogênio. Apontou-se também todos os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento efetivo da pesquisa. Além da apresentação da área em que ocorre a presente pesquisa e da forma como foi realizada a coleta e tabulação dos dados obtidos.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados obtidos na análise de desempenho do motor de combustão interna com e sem a adição de hidrogênio na mistura ar-combustível, de acordo com a modelagem matemática realizada e o projeto no software SolidWorks de um possível eletrolisador para motocicletas, além de mostrar quais foram os procedimentos adotados para a realização dos cálculos necessários a fim de obter os dados de desempenho do motor e por fim será feita uma discussão dos resultados.

4 RESULTADOS

Este capítulo tem como finalidade demonstrar os resultados da pesquisa sobre a análise de desempenho de um motor de combustão interna de motocicleta com mistura combustível e hidrogênio. Além disso, são detalhados os dados de entrada para o problema proposto e em seguida exposto os detalhes da modelagem do sistema em *software* Ricardo Wave®, tendo por fim, os resultados obtidos através da simulação.

As equações apresentadas no capítulo 2 servem de base para os cálculos expostos no presente capítulo. Assim, são mostrados os resultados e também a discussão acerca de cada um deles.

4.1 Especificações do Motor

Para iniciar os estudos de desempenho, primeiramente, selecionou-se um modelo de motor e as suas condições de operação. Tendo em vista a aplicabilidade do problema e as condições de venda de motores de motocicleta, definiu-se a utilização de todo o conjunto. Sendo assim a motocicleta escolhida para análise no presente trabalho foi a Yamaha XT 225 de ano/modelo 98/98, Figura 15, que apresenta como especificações do motor a Tabela 8, de acordo com Manual de Serviço fornecido pela fabricante Yamaha Motor do Brasil (1997).



Figura 15 - Yamaha XT 225 98'
Fonte: Yamaha, 1997

Tabela 8 - Especificações do Motor

Tipo	Refrigerado a ar, SOHC, Carburada
Ciclo	Otto, 4 Tempos
Disposição do cilindro	Monocilíndrico, inclinado à frente
Cilindrada	223 cm ³
Diâmetro do pistão	70 mm
Curso do pistão	58 mm
Taxa de compressão	9,5:1
Torque Máximo	19 N.m (a 7000 rpm)
Potência Máxima	15 kW (a 8000 rpm)
Combustível	Gasolina

Fonte: Yamaha, 1997

Na Tabela 8 estão expostas as especificações técnicas do motor segundo a Yamaha Motor do Brasil (2017) pertinentes ao cálculo das características operacionais. Os demais dados e suas considerações foram utilizadas como parâmetros de entrada e de calibração de cálculo e simulação, juntamente com condições de contornos definidas para o problema.

É importante ainda destacar que, para a análise, foram consideradas como características de entrada do sistema a pressão atmosférica de 1 atm (101,325 kPa) e a temperatura ambiente de 25°C (298,15 K). Ainda fora considerado que o fluido de trabalho se comporta como gás perfeito. Os resultados dos cálculos das condições de operação são fornecidos na Tabela 9.

Tabela 9 - Cálculo das condições de operação do motor a partir das especificações técnicas.

Entrada	Deslocamento [m ³]	0,000223
	Pressão [kPa]	101,325
	Temperatura [K]	298,15
	Volume Específico [m ³ /kg]	0,84494
Compressão	Taxa de compressão	9,5
	Calor específico à pressão constante [kJ/kmol.K]	29,667
	Coeficiente Isentrópico	1,389
	Temperatura [K]	716,39
	Pressão [kPa]	2312,90
	Volume específico [m ³ /kg]	0,08894
	Massa do sistema [kg]	0,00030
	Vazão mássica [kg/s]	0,03445
Expansão	Calor de entrada [kW]	22,6
	Calor específico à volume constante [kJ/kmol.K]	27,02
	Temperatura [K]	1413,78
	Pressão [kPa]	4564,42
	Coeficiente dos gases [kJ/kg.K]	0,28943
	Volume específico [m ³ /kg]	0,08965
Escape	Calor específico à volume constante [kJ/kmol.K]	35,307
	Coeficiente isentrópico [kJ/kmol.K]	1,308
	Temperatura [K]	706,66
	Pressão [kPa]	240,16
	Volume específico [m ³ /kg]	0,845
	Calor contido na exaustão do motor [kJ/kg]	383,85
Desempenho	Trabalho específico do ciclo [kJ/kg]	272,13
	Trabalho do ciclo [J]	0,08
	Torque do motor [N.m]	19,08
	Pressão média efetiva [kPa]	359,96
	Potência do motor [kW]	4,687
	Calor rejeitado (gases de exaustão) [kW]	13,222
	Radiação e outras perdas [kW]	4,687

Fonte: Pesquisa Direta, 2017

Na Tabela 9 estão detalhadas as condições de operação do motor selecionado. A partir dos valores de entrada do sistema, as condições de contorno foram definidas para uma rotação de 7.000 rpm. Este valor, em especial, é importante para o cálculo da vazão mássica de ar-combustível que entra na câmara a cada ciclo do motor. Sendo assim, todos os valores da Tabela 9 foram então considerados como dados de entrada e parâmetro inicial para a análise do ciclo ideal.

A partir dos dados e das considerações iniciais do motor foram calculadas as condições de compressão, expansão e escape dos gases. Durante a etapa de combustão, foi realizado o balanço estequiométrico, levando em consideração o excesso de ar igual a 12%.

4.2 Modelagem do Problema

De acordo com os dados fornecidos pelo fabricante na Tabela 8 e condições de contorno especificadas no item 4.1 desenvolveu-se a modelagem do problema no *software* Ricardo Wave® em quatro etapas:

- Definição dos dados do ambiente de entrada e saída, dutos e orifícios;
- Definição dos dados do motor;
- Definição dos dados das válvulas de admissão e exaustão;
- Definição do injetor de combustível.

No *software*, definiu-se o sistema inicial do motor conforme a Figura 16, levando em consideração as observações do manual fornecido pelo fabricante.

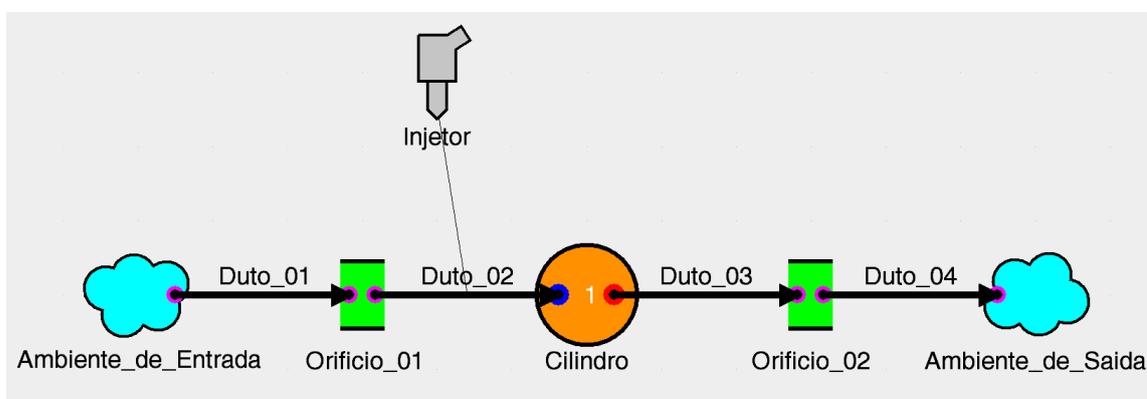


Figura 16 - Sistema proposto do motor em Ricardo Wave®
Fonte: Pesquisa Direta, 2017

A Figura 16 demonstra que o ambiente de entrada, isto é, as condições atmosféricas externas ao sistema é o ponto de partida da modelagem devido à retirada do ar para a combustão dentro do motor. Este ar passa por um primeiro duto, simbolizado pelo duto de entrada à esquerda, o filtro de ar e sua ligação (Duto_01) com o orifício de entrada no cabeçote do motor. Dentro do cabeçote, o ar é guiado por um duto idealizado (Duto_02) até a entrada da válvula de admissão do motor. O cilindro, por sua vez, contém duas entradas que simboliza, em azul, a válvula de admissão e, em vermelho, a válvula de exaustão dos gases. Os gases de exaustão são guiados por um duto (Duto_03), também idealizado, do cabeçote até o orifício de saída. Seguido do orifício de saída os gases ainda são guiados por um último duto (Duto_04), simbolizando o escapamento da moto, até despejar no ambiente de saída, isto é, na atmosfera.

4.2.1 Definição de parâmetros de entrada e saída

Os dados da Tabela 9 foram utilizados como de entrada e saída para a simulação no *software* Ricardo Wave®. Além disso, dados do tutorial do software foram também utilizados. Portanto, para a simulação computacional no *software* Ricardo Wave® foram considerados os seguintes parâmetros (Ricardo Wave®, 2016):

- Temperatura de entrada de 25°C (298,15 K);
- Pressão ambiente de entrada de 1 atm (101,325 kPa);
- Coeficiente de transferência de calor igual a 1,5 (Ricardo Wave®, 2016);
- Coeficiente de fricção na parede desprezível, para os dutos de entrada e saída do motor (Ricardo Wave®, 2016).

Como dimensões adotou-se os dados de fabricante da entrada e saída do cabeçote, bem como os diâmetros das válvulas de admissão e escape. Já as dimensões dos dutos 01 e 04, entre o filtro de ar da motocicleta e do escapamento, foram estimados afim de reduzir as perdas do sistema. Por fim, os dados de dimensão dos dutos estão expressos na Tabela 10.

Tabela 10 - Dimensões dos dutos para modelagem

Duto	Entrada [mm]	Saída [mm]	Comprimento total[mm]
Duto 01	34,1	34,1	100
Duto 02	34,1	34,1	30,5
Duto 03	28,6	28,6	30,5
Duto 04	28,6	28,6	100

Fonte: Adaptado Yamaha Motor do Brasil, 1997

Conforme explicitado na Tabela 10, os diâmetros de entrada e saída para os pares de dutos, duto 01 e duto 02, duto 03 e duto 04, se devem aos diâmetros das válvulas de admissão e exaustão da câmara de combustão. Os comprimentos dos dutos 02 e 03 então, correspondem à distância entre o orifício de entrada e a válvula da câmara de combustão, fornecido pela fabricante, já o comprimento de 100 mm para os dutos 01 e 04 são estimativas como condições de contorno para a modelagem. Cada um dos comprimentos foi então dividido em nós de 10 mm para análise.

Como dados complementares para a modelagem foi definida a temperatura da parede de cada duto igual à temperatura ambiente, a temperatura e pressão no interior conforme à temperatura e pressão dos gases que por eles passam, conforme Tabela 11.

Tabela 11 - Temperatura e pressão nos dutos do sistema

	Duto 01	Duto 02	Duto 03	Duto 04
Temperatura na parede do duto [K]	298,15	298,15	298,15	298,15
Temperatura no interior do duto [K]	298,15	298,15	706,66	706,66
Pressão no interior do duto [kPa]	101,325	101,325	240,16	240,16

Fonte: Pesquisa Direta, 2017

A Tabela 11, por sua vez, mostra a temperatura na parede e no interior, juntamente com a pressão em cada um dos dutos. Esses valores foram fixados conforme a Tabela 9 do item 4.1. É importante ressaltar que para os dutos 03 e 04 os valores considerados são os do ponto de escape do motor.

Responsáveis pelos diâmetros dos dutos de entrada e saída do sistema, as válvulas do motor apresentam como dimensões os valores demonstrados na Tabela 12.

Tabela 12 - Diâmetros das válvulas de admissão e exaustão

Válvula	Diâmetro [mm]
Válvula de admissão	30,1
Válvula de exaustão	28,6

Fonte: Yamaha Motor do Brasil, 1997

Na Tabela 12 expõe-se os valores de diâmetros das válvulas de admissão e exaustão conforme manual. Estes valores servem para contemplar a vazão dos gases de entrada e saída dos gases. Estes valores também são tomados como verdade para as dimensões dos orifícios do cabeçote, isto porque, durante a modelagem os valores foram colocados de forma automática pelo software afim de evitar incompatibilidades com o sistema, uma vez que cada extremidade dos dutos é especificada pelo usuário.

4.2.2 Definição dos dados do motor

Como último parâmetro de geometria do sistema, as definições dos dados do motor foram todas explicitadas pela fabricante no manual, conforme a Tabela 13. Assim como na etapa de definição dos parâmetros para ambientes, dutos e orifícios, foi também utilizada a Tabela 9 como apoio para dados de entrada do sistema.

Tabela 13 - Geometria do motor

Parâmetro	Valor
Curso do pistão [mm]	58
Diâmetro do pistão [mm]	70
Abertura da válvula [mm]	6,8
Área do cabeçote [mm ²]	1500
Área da superfície do pistão [mm ²]	3848.45
Biela [mm]	101
Taxa de compressão	9,5:1

Fonte: Yamaha Motor do Brasil, 1997

A Tabela 13 contém a geometria do motor, o que permite inferir que o motor possui uma câmara de combustão cilíndrica de diâmetro de aproximadamente 70 mm e altura de curso de pistão de 58 mm. Dados esses que auxiliam nos cálculos do ponto morto inferior e, juntamente com a taxa de compressão de 9,5:1, do ponto morto superior. Para complementar as especificações do motor ainda se acrescentou os dados iniciais dentro do cilindro de combustão, conforme mostra a Tabela 14.

Tabela 14 - Condições iniciais na câmara de combustão

Temperatura no topo do pistão [K]	1413,78
Temperatura linear do cilindro [K]	1413,78
Temperatura no topo do cilindro [K]	1413,78

Fonte: Pesquisa Direta, 2017

A Tabela 14 apresenta as condições iniciais na câmara de combustão. Estes valores foram definidos conforme a Tabela 9 como parâmetros de entrada. Uma vez que, a taxa de transferência de calor dentro do cilindro não foi especificada, decidiu-se por igualar ou aproximar as temperaturas dos componentes do motor de forma a não interferir na simulação.

Ainda como especificações do motor foi considerado o número de cilindros (igual a 1), e o ciclo de trabalho, isto é, Ciclo Otto de 4 tempos. A rotação escolhida para o processo, assim como para os cálculos da Tabela 9, foi a de 7000 rpm, a pressão constante de 1 atm e temperatura de referência igual a 298,15 K.

Como modelo de combustão para o processo, escolheu-se o modelo Wiebe onde o software relaciona a geometria do motor, temperaturas de entrada com a taxa de queima da mistura ar-combustível, o início da combustão e sua duração.

Já como modelo de transferência de calor para o cilindro, aplicou-se o modelo Woschni que relaciona, igualmente ao modelo Wiebe, os dados de entrada de geometria, pressão e temperatura do motor com a taxa de transferência de calor conforme a posição das válvulas do motor, isto é, aberta ou fechada.

4.2.3 Especificação dos parâmetros de injeção do combustível

A definição dos parâmetros de entrada do injetor de combustível utilizou-se dos dados da Tabela 9 do item 4.1 e ainda da relação estequiométrica com excesso de ar.

O injetor foi inserido na entrada do orifício que representa o local de entrada do fluido de trabalho no cabeçote do motor, com o intuito de simular que a mistura ar-combustível ocorreu no momento da entrada, isto porque, ainda no processo de definição do injetor é possível selecionar o tipo de misturador utilizado. Como no motor escolhido (motocicleta Yamaha XT 225 1998), o processo de mistura do ar com o combustível é realizado dentro do carburador, esta informação será usada como parâmetro de entrada.

Através dos dados da Tabela 9 e da estequiometria da reação de combustão, com excesso de ar igual a 12%, a relação de combustível-ar para dentro do motor é igual a 0,0147 quilogramas de combustível por quilogramas de ar. Este foi o fator mais importante para a obtenção dos resultados isto porque está relacionado diretamente com a quantidade de combustível injetado dentro da câmara.

Para a mistura do injetor, considerando a moto carburada, definiu-se como temperatura inicial a temperatura ambiente (298,15 K). A fração de líquido evaporado depois da injeção foi estipulada em 30%, conforme o tutorial do *software* Ricardo Wave® (2017).

Vale destacar que, com o acréscimo de hidrogênio, o valor da razão combustível-ar foi alterado para 0,0153 quilogramas de combustível por quilogramas de ar; e da fração volumétrica da mistura de combustíveis (gasolina – hidrogênio) foi de 30% para o hidrogênio e 70% para a gasolina.

4.3 Resultados da simulação

A partir do modelo elaborado como descrito no item 4.2, duas simulações numéricas foram conduzidas pelo software Ricardo Wave®, a primeira simulação que representa a utilização da gasolina como único combustível e a segunda com um acréscimo de 30% em relação ao consumo específico de gasolina, o que alterou, de forma considerável a razão ar-combustível e, conseqüentemente, o seu inverso.

A partir das simulações, foram levantados gráficos do fluxo de calor, vazão mássica, pressão, temperatura nos dutos, além dos gráficos de pressão por volume e temperatura por entropia dentro da câmara de combustão, utilizados como principal parâmetro de comparação para a presente análise de desempenho. Os demais dados, como potência do motor, trabalho do ciclo, pressão média efetiva e torque do motor emergiram na forma de documento, também gerado pelo *software*.

4.3.1 Resultado da Simulação com Gasolina

Como primeira parte da simulação, realizou-se o processo utilizando apenas gasolina como combustível obtendo-se primeiramente a Figura 17 onde está apresentada a vazão mássica *versus* o ângulo do virabrequim durante o processo, tendo em vista que, a primeira etapa do ciclo considerada pelo software é a compressão, isto é, momento onde o fluido de trabalho já está dentro da câmara de combustão do motor e o pistão inicia o movimento de subida para comprimir até o ponto morto superior (TDC) do cilindro.

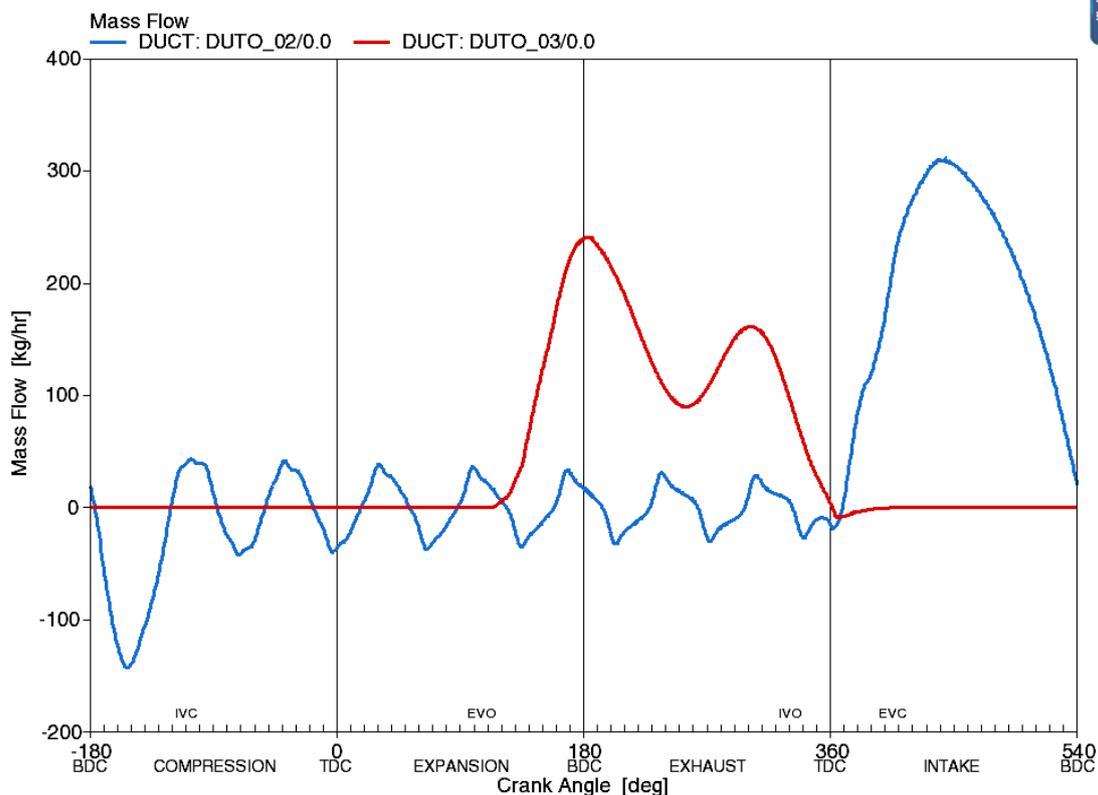


Figura 17 - Vazão mássica dentro dos dutos 02 e 03
 Fonte: Pesquisa Direta, 2017

Na Figura 17 apresenta-se a vazão mássica dentro dos tubos que descarregam e retiram o fluido de trabalho do cilindro do motor, isto é, aqueles que representam a passagem no cabeçote do motor até a passagem pela abertura das válvulas de admissão. Ao comparar a linha do duto de entrada (duto 02) com a do duto de saída (duto 03) nota-se que para o primeiro a variação de vazão mássica ocorre principalmente no momento de abertura da válvula de admissão (*intake*), enquanto no segundo, a variação ocorre no intervalo que compreende o processo de expansão e exaustão dos gases, atingindo o seu valor máximo.

A variação de vazão mássica no duto 02 (linha azul), que ocorre durante todo o ciclo se deve primeiramente à abertura da válvula de admissão, que possibilita a entrada do fluido de trabalho proveniente do duto 02. Como é possível observar no Figura 17, a variação possui simetria entre os valores positivos e negativos tal como uma senóide. Isto pode indicar que, logo após a abertura da válvula de admissão, devido a sucção do cilindro, ocorre o aparecimento de uma pressão negativa no duto 2. Após o fechamento da válvula de admissão, com a pressão negativa no duto 2 e a pressão atmosférica no duto 1, a ação da pressão

atmosférica será de compressão do fluido de trabalho confinado entre o duto 2 e a válvula de admissão. Assim, o fluido de trabalho confinado reage ao movimento de compressão, empurrando o fluido de trabalho em pressão atmosférica, buscando o equilíbrio de forças (terceira lei de Newton). Este processo configura o comportamento da curva de vazão mássica do duto 2.

Já o comportamento da curva do duto 3, responsável por conduzir os gases de combustão até o escapamento apresenta uma constante em zero até o momento onde a válvula de exaustão se abre, isto é, na transição entre o processo de expansão e exaustão no cilindro. Durante o processo de exaustão a curva apresenta dois picos. Uma hipótese para este comportamento é que no momento em que a válvula de exaustão se abre, os gases formados durante o processo de combustão saem de forma espontânea devido à diferença de pressão com o duto 3, comportamento este justificado também através das Figuras 18 e 19. Em contrapartida, no segundo pico, a exaustão passa a ser forçada pelo movimento de subida do pistão até o ponto morto superior, onde a câmara de combustão apresentará quantidade mínima de gases para iniciar uma nova admissão do fluido de trabalho.

Como sequência e complemento dos resultados apresentados na Figura 17, para o ciclo com apenas gasolina como combustível, tem-se na Figura 18 a pressão do sistema.

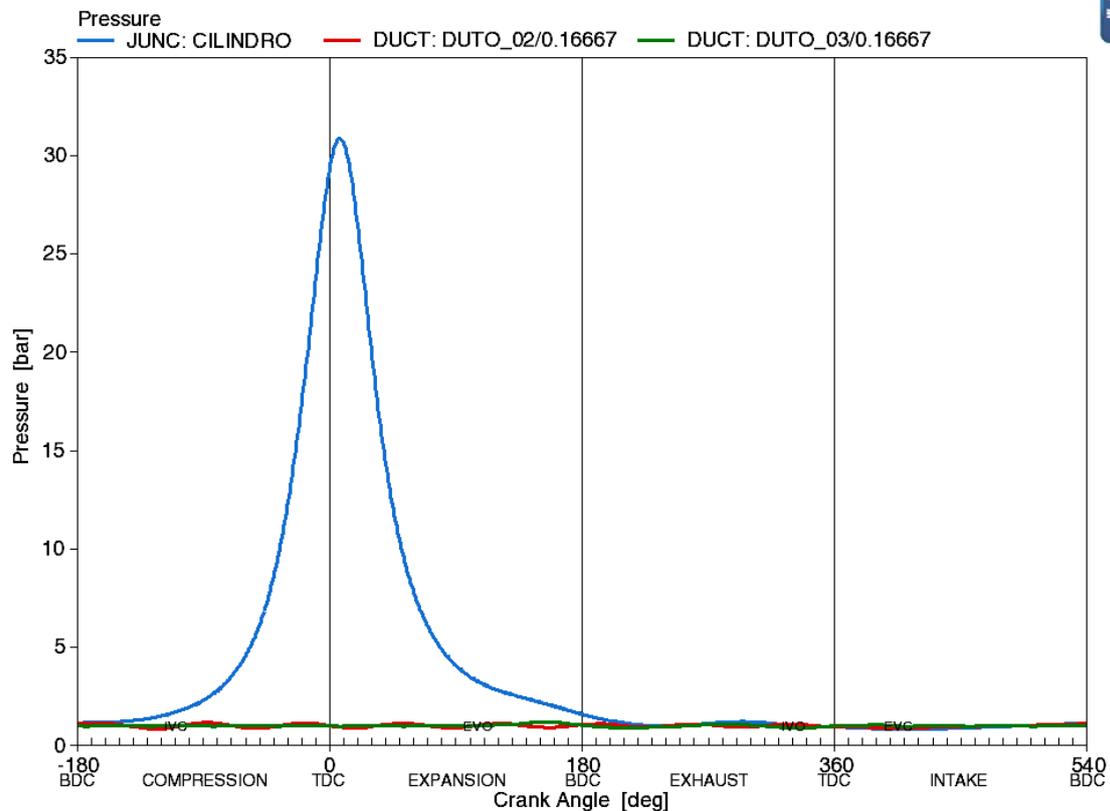


Figura 18 - Variação da pressão dentro dos dutos 02 e 03 e do cilindro
 Fonte: Pesquisa Direta, 2017

Na Figura 18 apresenta-se a variação de pressão de acordo com os processos. Ao comparar as linhas de cada uma das geometrias é perceptível que a pressão no interior de cada duto é muito menor do que a pressão no cilindro. A pressão do cilindro apresenta uma grande variação que ocorre entre os processos de compressão, combustão e expansão do pistão. Para percepção da variação de pressão nos dutos 02 e 03, foi retirado um extrato da Figura 18, conforme mostra a Figura 19, onde a pressão do cilindro foi desconsiderada.

Como justificativa do aumento da pressão no cilindro (Figura 18) tem-se que, de acordo com o ciclo Otto e em conformidade com os dados da Tabela 9, a pressão máxima do ciclo ocorre durante o processo de compressão e combustão. Após a compressão-combustão, entretanto, o pistão executa o movimento de descida (processo de expansão) o que alivia a pressão por ele exercida. Verifica-se também que a pressão atinge um pico de aproximadamente 30 bar (3 MPa). Este resultado está um pouco abaixo do calculado e informado na Tabela 9.

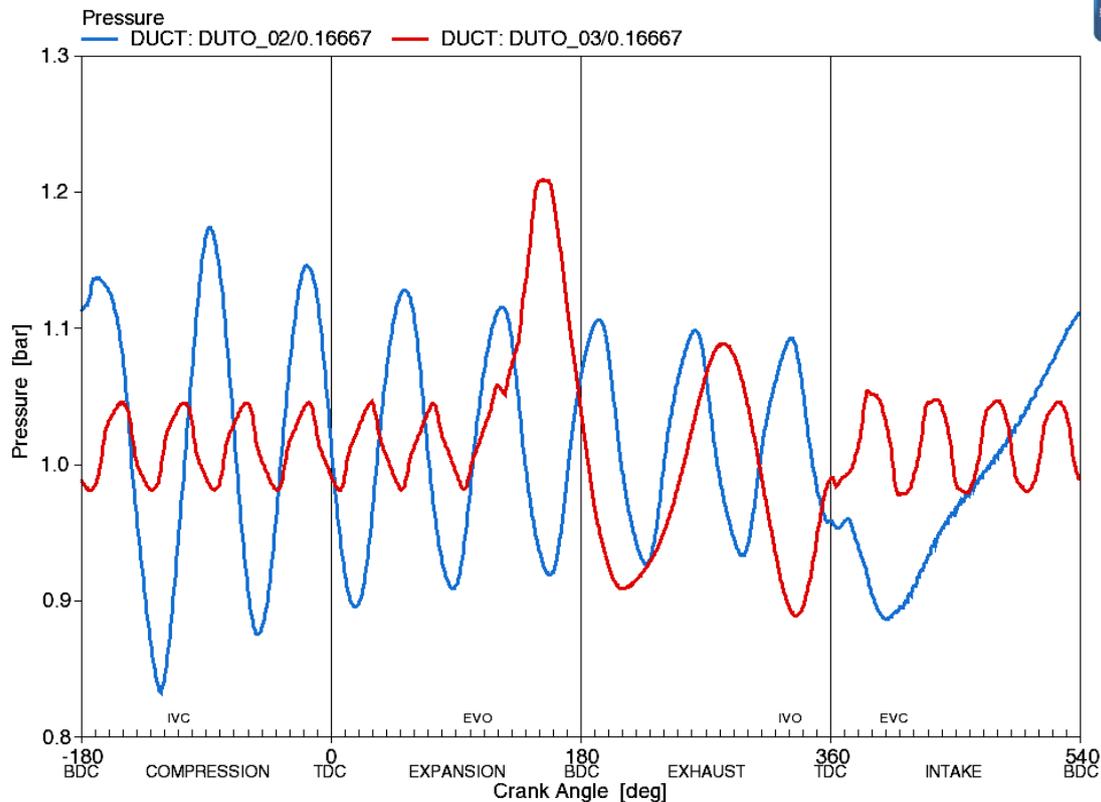


Figura 19 - Variação da pressão dentro dos dutos 02 e 03
 Fonte: Pesquisa Direta, 2017

Na Figura 19, são apresentadas as curvas de pressão apenas dos dutos 02 e 03. A curva azul (duto 02) apresenta comportamento semelhante de uma senóide até o ponto morto superior (TDC) no final da exaustão onde sofre até o final do processo de admissão. Já a curva vermelha (duto 03) o comportamento também similar ao de uma senóide durante o processo de compressão e admissão, apresenta grandes perturbações, principalmente na transição entre o processo de expansão e exaustão.

Com a análise das Figuras 17 e 19 é demonstrada que a hipótese de que os gases de combustão sofrem uma exaustão espontânea durante o processo com a abertura da válvula de exaustão devido à diferença de pressão é válida e que, durante este processo, o cilindro expulsa os gases restantes ocasionando o segundo pico de vazão mássica e de pressão dentro do duto 03.

Na Figura 20 está apresentada a variação da temperatura conforme cada processo do ciclo de acordo com cada parte do sistema, isto é, duto 02, cilindro e duto 03.

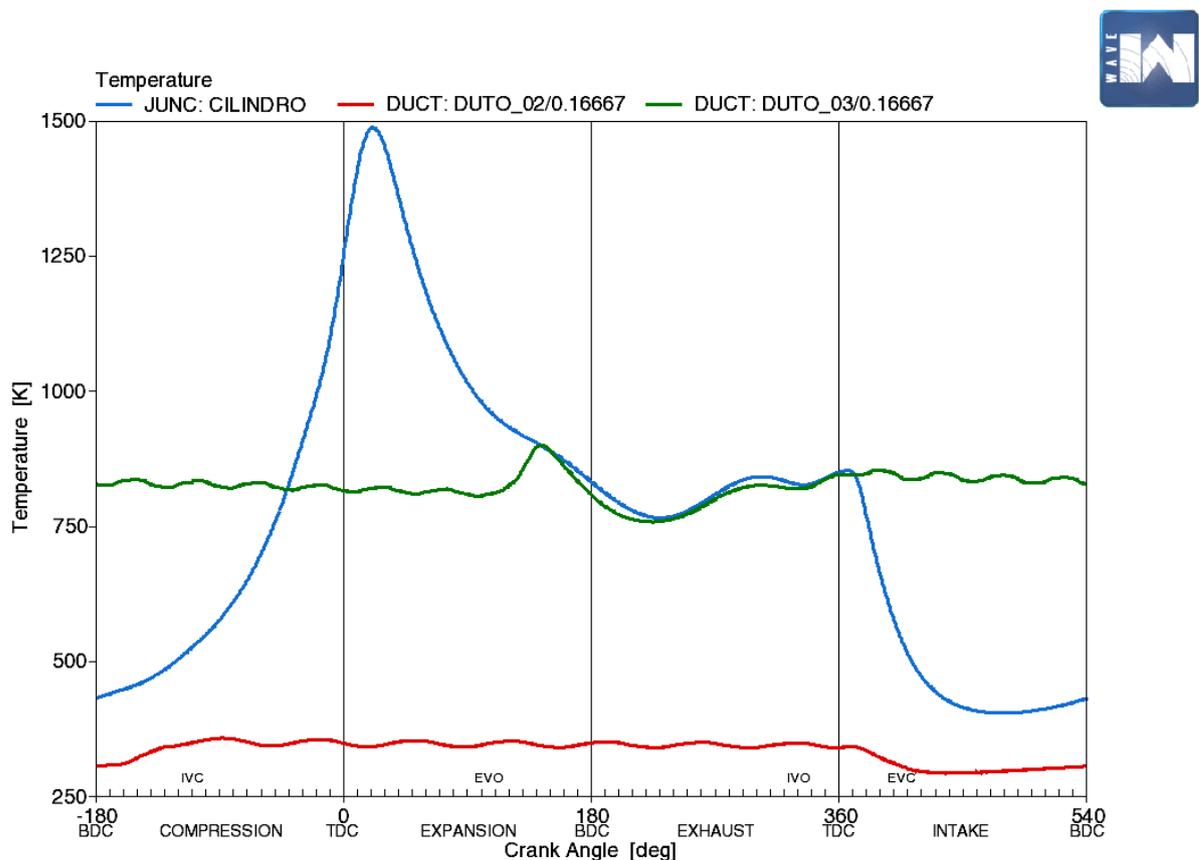


Figura 20 - Variação da temperatura dentro dos dutos 02 e 03 e dentro do cilindro
 Fonte: Pesquisa Direta, 2017

Na Figura 20 observa-se a variação da temperatura de acordo com cada processo do ciclo. Em um primeiro momento, no duto 02 a temperatura é mantida aproximadamente constante durante todo o processo. No cilindro a temperatura apresenta variações conforme a etapa do ciclo e, no duto 03 a temperatura se mantém, de certa forma, estável, com uma perturbação entre os processos de expansão e exaustão.

A baixa variação de temperatura no duto 02 pode ser explicada devido a ele ser o duto de entrada do ar e do combustível proveniente do injetor. Devido ao seu baixo comprimento e ao coeficiente de troca térmica, esse duto sofre grande influência do calor proveniente do motor, o que proporciona uma variação de temperatura, mesmo que pequena, durante o ciclo, perceptível principalmente a partir do momento onde a temperatura dentro do cilindro começa a aumentar durante o processo de compressão e reduzir durante o processo de admissão de nova mistura ar-combustível.

O cilindro por ser a câmara de combustão, apresenta, em conformidade com a Tabela 9 e o Ciclo Otto que rege o sistema, um aumento da temperatura durante o processo de

compressão da mistura, atingindo o seu ponto máximo após a centelha do motor (processo de combustão), momento que aumenta ainda mais a temperatura. O processo de expansão, que se inicia após a combustão, reduz a temperatura e pressão do ciclo.

É importante destacar que, após o processo de expansão, a temperatura cai, mas não se iguala com a do fluido de trabalho na entrada, isto porque os gases resultantes do processo de combustão se mantêm a uma temperatura bem superior e saem desta forma pelo duto 03.

O duto 03, responsável pela exaustão dos gases de combustão apresenta uma perturbação da sua temperatura devido à presença dos gases de saída do cilindro, o que ocasiona um aumento significativo, que transfere, para o duto, parte do calor, uma vez que a sua temperatura de parede tende a se igualar com a temperatura ambiente. A variação, entretanto, é, de certa forma, pequena, por causa da alta temperatura dos gases de exaustão, que regulam internamente a temperatura do duto e o deixa homogênea durante todo o processo em que não há passagem de gases.

Na Figura 21 está apresentado o diagrama P-v para o ciclo Otto real do motor monocilíndrico estudado no presente trabalho. Neste diagrama é apresentado o ponto de pressão máxima do sistema, em conformidade com a Figura 18, onde no final do processo de compressão se atinge o valor de 30,88 bar (3088 kPa) e ponto de pressão entre o processo de exaustão dos gases de combustão e admissão de nova mistura, igual a 1,66 bar (166 kPa).

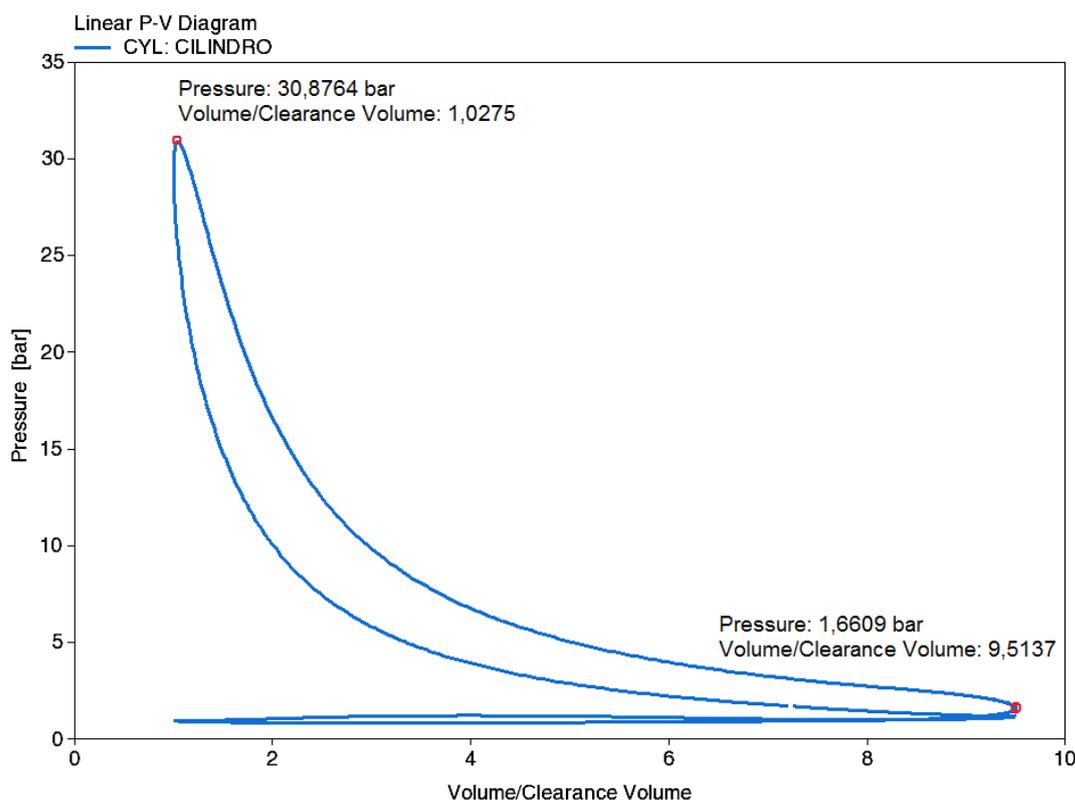


Figura 21 - Diagrama de pressão versus volume
Fonte: Pesquisa Direta, 2017

O diagrama P-v, da Figura 21, demonstra que, no momento em que a válvula de admissão é aberta, o pistão executa um curso de admissão, aspirando a nova mistura de ar-combustível para dentro do cilindro até o momento em que a válvula se fecha e se dá início ao processo de compressão.

Com ambas as válvulas fechadas o pistão então avança pelo seu curso de compressão, elevando a pressão até o momento em que a centelha proporciona a ignição do sistema e o pistão alcança o seu curso máximo (ponto morto superior). Devido ao processo de combustão e formação dos gases a pressão aumenta, mesmo com o curso máximo do pistão já atingido e alcança o seu ponto máximo da pressão, de 30,88 bar.

Com o término do processo de compressão e o início da expansão dos gases resultantes da combustão, o pistão sofre uma força que o obriga a descer, aumentando o volume do ciclo. Conseqüentemente, a pressão do sistema é reduzida até o momento em que o pistão atinge o seu ponto morto inferior. A válvula de exaustão se abre, permitindo a saída dos

gases seguido da abertura da válvula de admissão onde ocorre a entrada do fluido de trabalho, finalizando o ciclo.

Outro diagrama importante é o temperatura-entropia. A Figura 22 apresenta esse diagrama.

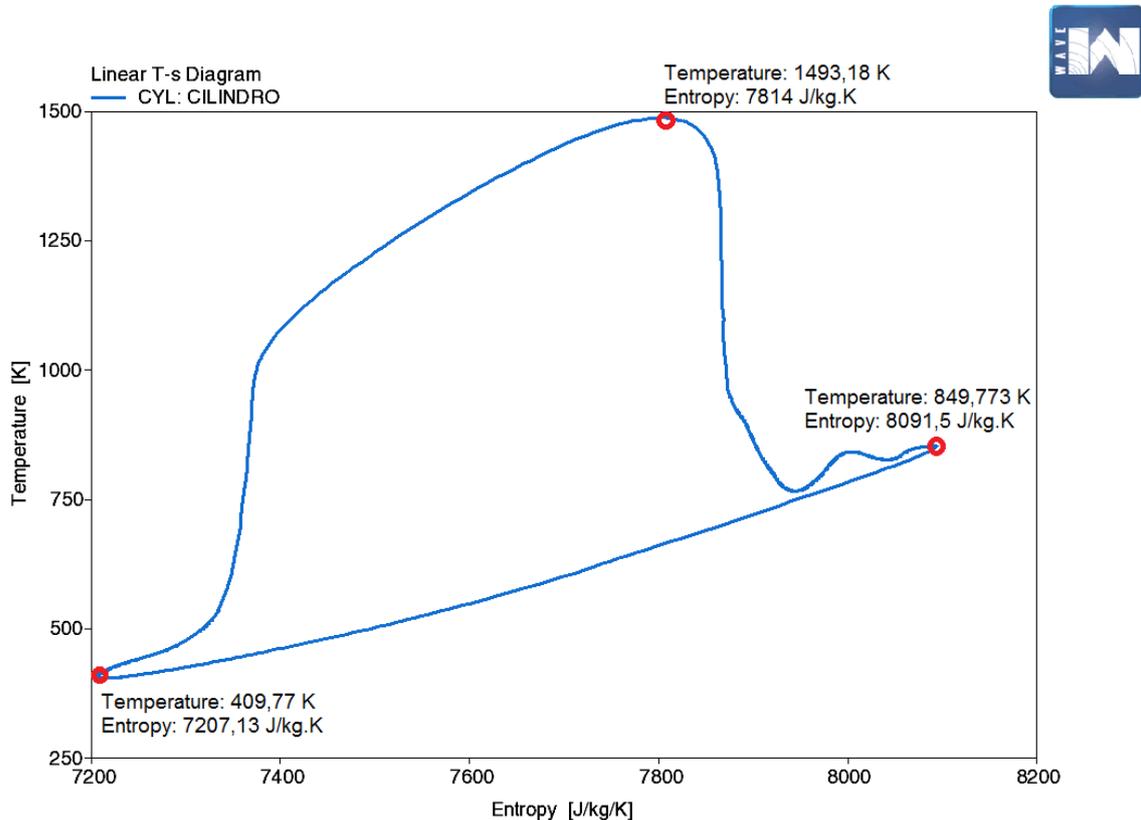


Figura 22 - Diagrama de temperatura *versus* entropia
Fonte: Pesquisa Direta, 2017

Na Figura 22 está apresentada a relação entre temperatura e entropia do sistema proposto. Como ponto inicial do ciclo tem-se a temperatura igual a 409,77 K que aumenta até atingir o ponto de compressão, onde a centelha inicia a combustão e a temperatura do fluido de trabalho aumenta até atingir 1493,18 K. Logo após a temperatura se reduz a 849,77 K e retorna para a temperatura inicial do ciclo.

É importante destacar que a temperatura inicial do ciclo (409,77 K) é diferente da temperatura do fluido de trabalho admitido e da temperatura teórica proposta na Tabela 9 no ponto, ambas de 298,15 K. Esse comportamento ocorre devido à mistura dos gases de combustão que não são completamente exauridos do cilindro e apresentam como temperatura

o valor de 849,77 K. Sendo assim, ocorre uma troca térmica entre os gases dentro do cilindro atingindo o equilíbrio.

Em conformidade com a Tabela 9 e com o Ciclo Otto, tem-se então que, a mistura ar-combustível entra no cilindro a uma temperatura de 409,77 K, conforme esperada, maior do que a temperatura de entrada dos gases no cilindro 02. Isso ocorre devido à hipótese de que o motor se encontra em funcionamento e apresenta já uma temperatura elevada, transferindo parte do seu calor para a nova vazão mássica de mistura ar-combustível admitida.

Após admitido, o fluido de trabalho é comprimido e apresenta um aumento de temperatura suave, até o ponto de centelha, onde se tem o aumento repentino da temperatura, atingindo o valor máximo de 1493,18 K. Nesse momento, já no início da exaustão, marca o início da queda de temperatura até o processo de exaustão.

4.3.2 Resultado da Simulação com Gasolina e Hidrogênio como Aditivo

Como segunda parte da simulação, junto ao combustível foi injetado cerca de 30% de hidrogênio, calculado a partir da vazão mássica de gasolina usada no motor. Obteve-se assim, como resultado para análise e comparação o diagrama de pressão versus volume da Figura 23.

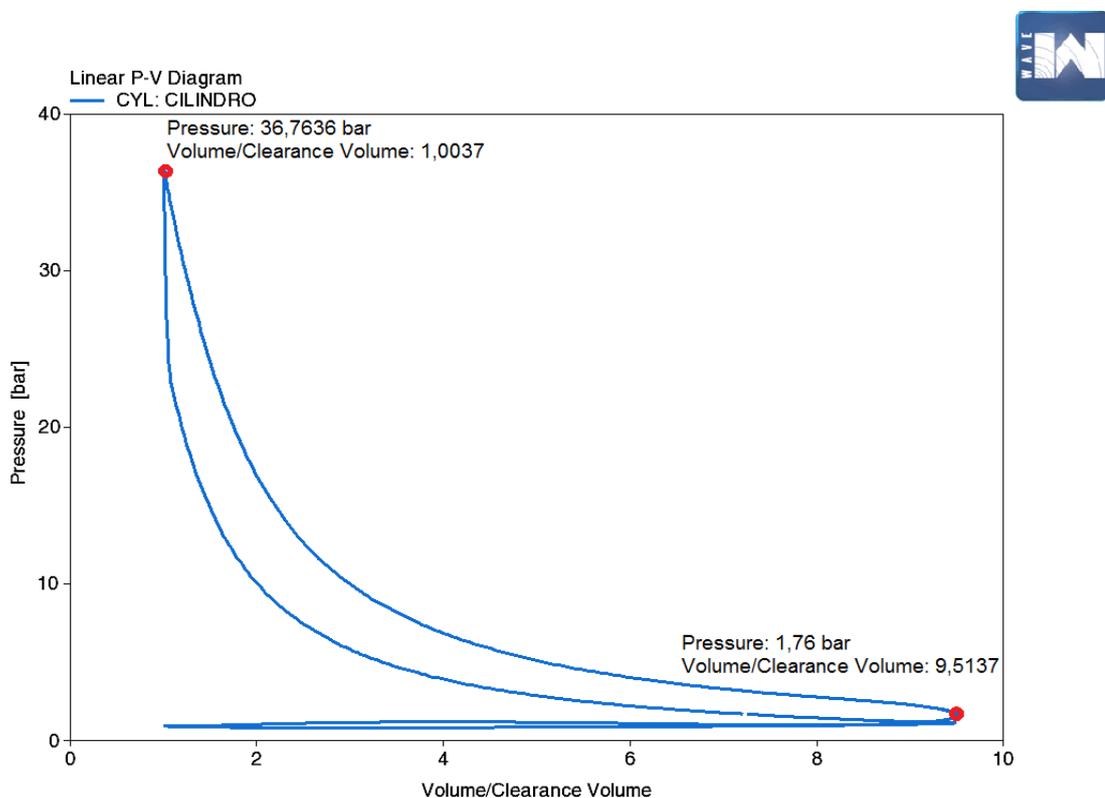


Figura 23 - Diagrama pressão versus volume com hidrogênio como aditivo
 Fonte: Pesquisa Direta, 2017

Na Figura 23 percebe-se a mudança, já esperada, no diagrama, com o aumento da pressão. Conforme o Ciclo Otto, tem-se que a mistura é admitida no ponto de menor pressão e maior volume do ciclo, em seguida sofre a compressão, até o ponto de centelha que, quando atingido, aumenta ainda mais a pressão até atingir 36,76 bar (3676 kPa). Após o ponto de pressão máxima, ocorre o processo de expansão, caminhando para a abertura da válvula de exaustão, atingindo a pressão de 1,76 bar (176 kPa), iniciando o processo de admissão novamente.

Para melhor analisar a variação de pressão do ciclo sem e com o hidrogênio como aditivo é apresentada a Figura 24, onde se tem a variação da pressão no duto e no cilindro.

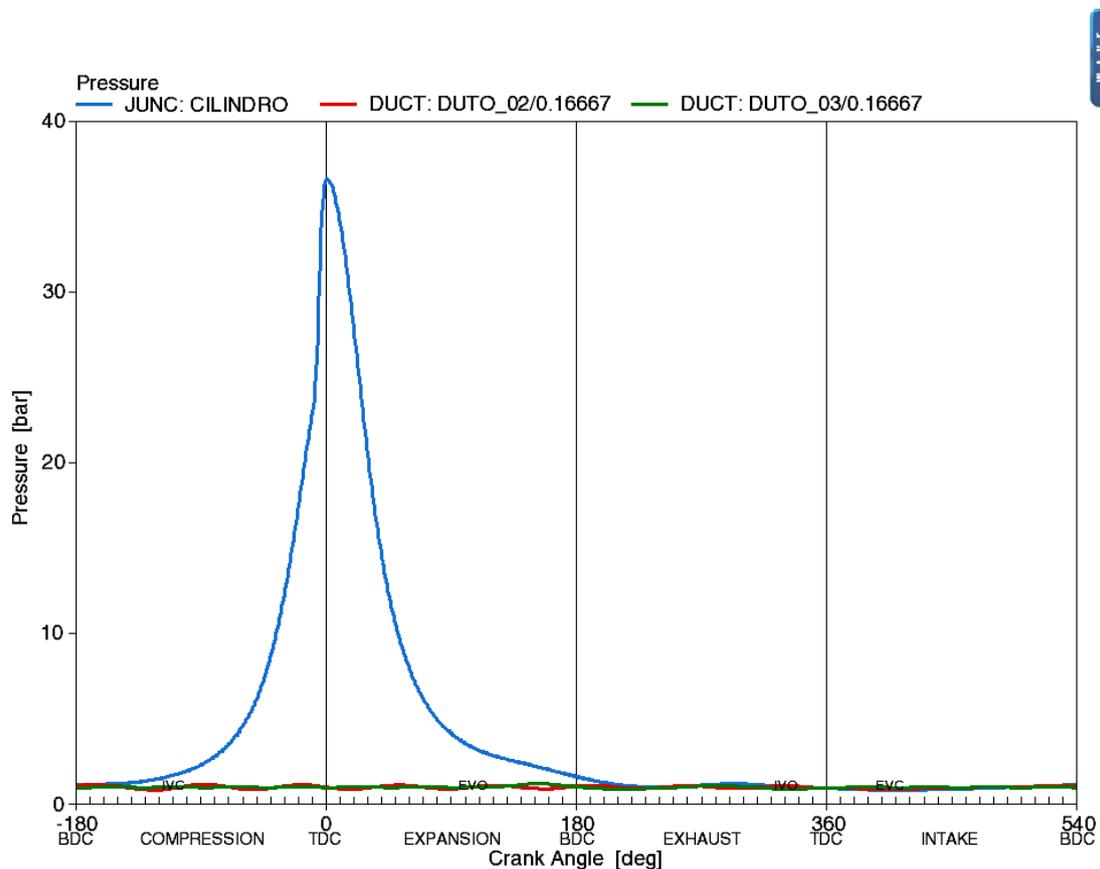


Figura 24 - Variação da pressão nos dutos 02 e 03 e cilindro com hidrogênio como aditivo
Fonte: Pesquisa Direta, 2017

Na Figura 24 é apresentada a variação de pressão por processo do ciclo. Onde a pressão, já explicitada na Figura 23, alcança seu ponto máximo de 36,76 bar na linha tênue entre a compressão, combustão e expansão igualando, ao início da exaustão ao valor da pressão atmosférica.

A diferença entre pressões foi considerável, isto porque a presença do hidrogênio aumenta o consumo específico de mistura, aumentando a massa do sistema e, conseqüentemente, possibilita a formação de mais gases de combustão, o que aumenta, principalmente após a compressão e a ignição da combustão, a pressão do sistema.

Prosseguindo com os resultados para a mistura gasolina e hidrogênio tem-se a Figura 25, onde é apresentada a variação da temperatura no ciclo pela entropia.

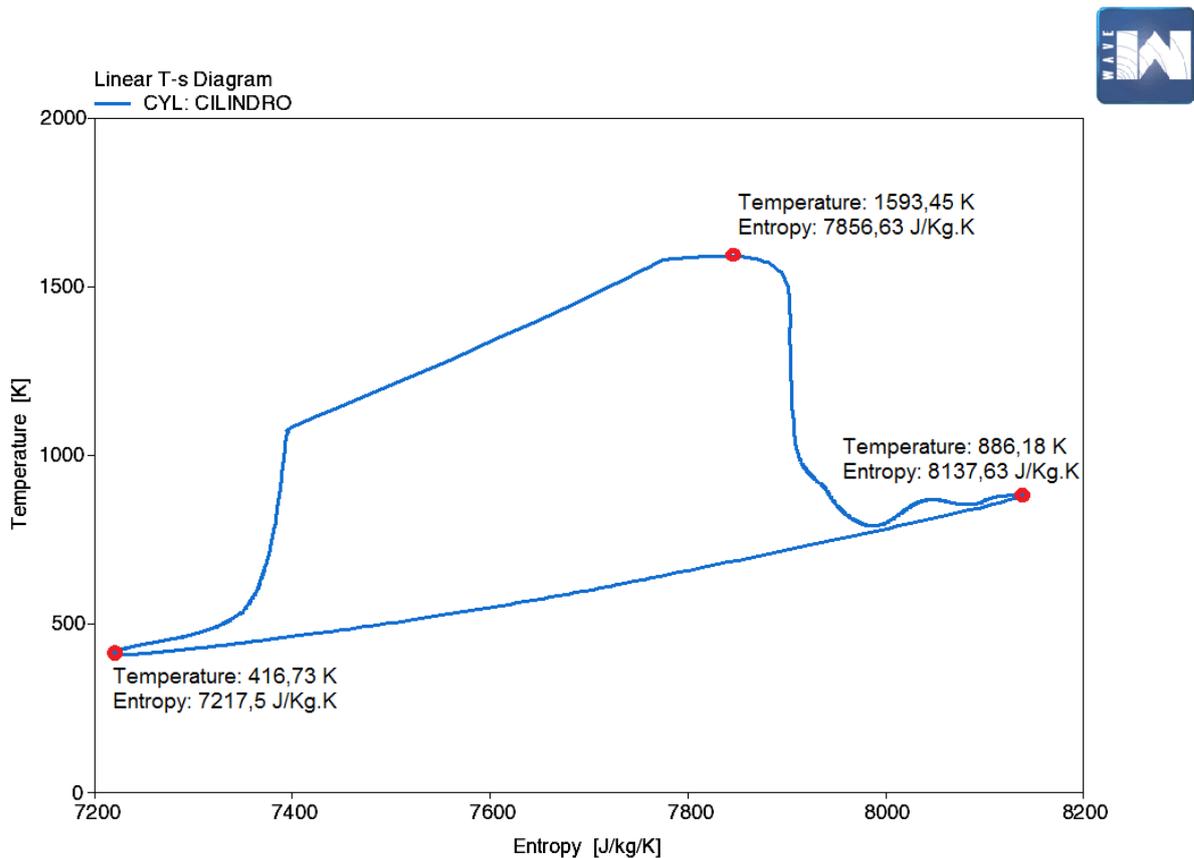


Figura 25 - Diagrama temperatura versus entropia para o ciclo com hidrogênio

Fonte: Pesquisa Direta, 2017

Na Figura 25 é apresentado o diagrama de temperatura *versus* entropia, onde a temperatura mais baixa (416,73 K) representa a temperatura de entrada na admissão da mistura ar-combustível-aditivo e a temperatura mais alta (1593,45 K) representa o ponto de queima total da mistura e a transformação da mesma em gases de combustão.

Para fins de análise de desempenho do ciclo com e sem hidrogênio como aditivo é apresentada a Figura 26, onde tem-se a variação da temperatura conforme as etapas do ciclo.

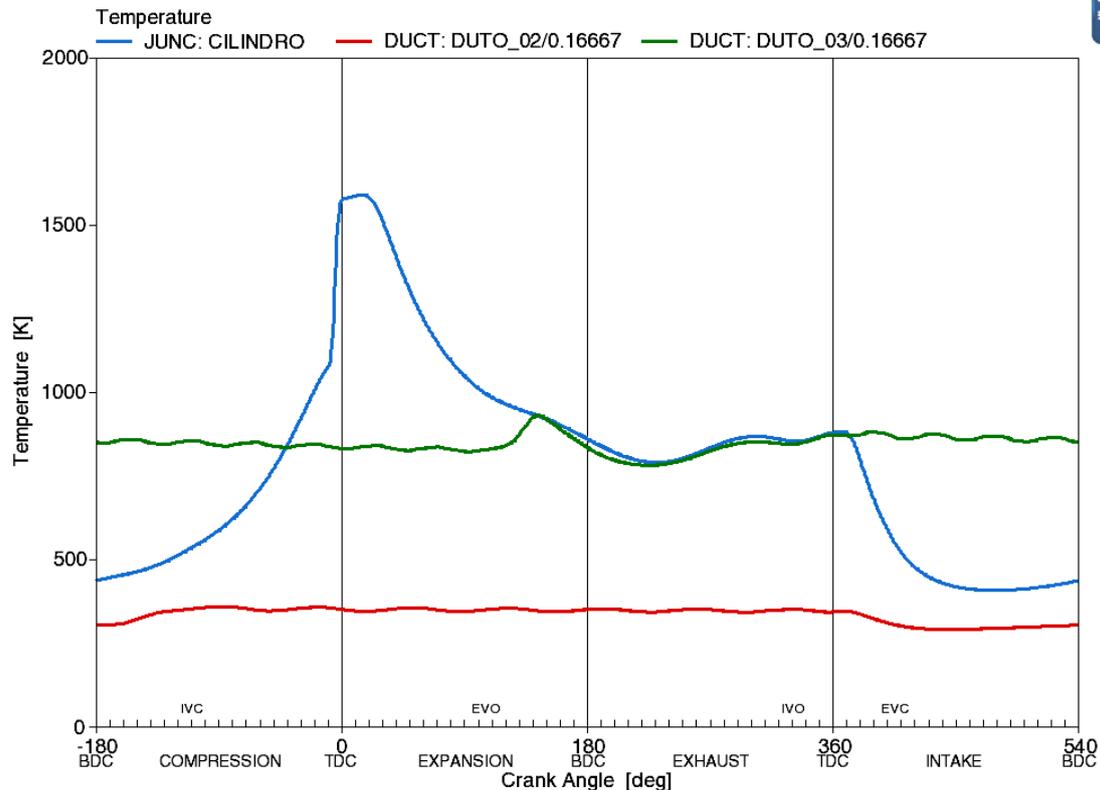


Figura 26 - Variação da temperatura dentro dos dutos 02 e 03 e cilindro com hidrogênio como aditivo
 Fonte: Pesquisa Direta, 2017

Na Figura 26 é então apresentada a variação de temperatura conforme o Ciclo Otto que rege o motor. Sendo então a temperatura dentro do cilindro a que apresenta maior variação, atingindo seu ponto máximo de 1593,45 K, já demonstrada na Figura 25 e caindo de forma gradativa até o processo de exaustão se iniciar. Com o fim do processo de exaustão e o início da admissão, a temperatura cai novamente dentro do cilindro. Já as temperaturas nos dutos 02 e 03 se mantêm, de certa forma, constante.

Como esperado então a temperatura do ciclo apresenta um aumento em relação ao ciclo utilizando apenas a gasolina o que proporciona um aumento de energia no sistema, beneficiando todo o processo. Um segundo ponto perceptível com a presença do hidrogênio é a queima do combustível de forma mais rápida e eficiente, esperado com a inclusão do gás.

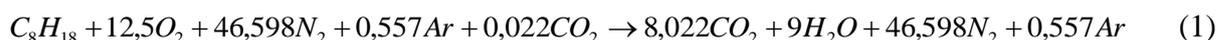
A presença do hidrogênio então proporciona além do aumento de temperatura na câmara, um adiantamento da queima, de forma a tornar o ciclo mais eficiente e, conseqüentemente, melhor o processo de combustão, queimando com maior eficiência toda a mistura.

4.4 Cálculo da Combustão

Para fins de comparação e análise de resultados, realizou-se também o desenvolvimento de novos parâmetros, tendo em vista que a presença do hidrogênio altera os dados de entrada do software. Essas considerações partem do princípio da mudança acarretada pelo hidrogênio na equação da reação de combustão, demonstrada nos subitens 4.4.1 e 4.4.2.

4.4.1 Reação de Combustão com o combustível principal

A reação estequiométrica se caracteriza pela hipótese de que a queima do combustível ocorre instantaneamente, sendo o ar admitido totalmente empregado no processo de combustão, sem excesso de oxigênio. Supondo que a gasolina seja modelada como 100% octano, ou seja, C_8H_{18} . A equação química estequiométrica da reação de combustão será:



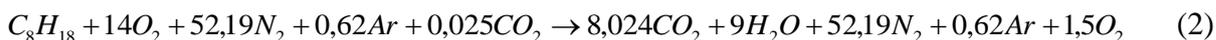
Através da equação estequiométrica é possível determinar que 1 mol de gasolina reage com uma proporção de 12,5 mols de oxigênio. As proporções de nitrogênio, argônio e dióxido de carbono foram encontradas de acordo com a proporção do gás em relação ao oxigênio, de acordo com a Tabela 15.

Tabela 15 - Composição do ar atmosférico seco ao nível do mar

Componente	Símbolo	% por volume
Nitrogênio	N_2	78,084
Oxigênio	O_2	20,946
Argônio	Ar	0,934
Dióxido de Carbono	CO_2	0,037
Neônio	Ne	0,001818
Hélio	He	0,000524
Metano	CH_4	0,0002
Criptônio	Kr	0,000114
Hidrogênio	H_2	0,00005
Monóxido de Nitrogênio	N_2O	0,00005
Xenônio	Xe	0,000009

Fonte: UFSC, 2017.

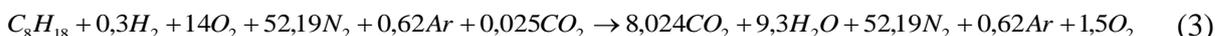
Conforme dados de combustão da gasolina, em geral, o excesso de ar na combustão pode atingir valores de até 12%, resultando na seguinte equação de combustão com excesso de ar.



A equação demonstra que com excesso de ar de 12% para 1 mol de gasolina, a proporção para uma parte de ar aumenta e salta para 14, modificando a equação e obrigando o aparecimento de 1,5 mol de oxigênio.

4.4.2 Reação de Combustão com Hidrogênio

O acréscimo do hidrogênio à mistura do combustível ocasiona mudança significativa da equação de combustão, visto que o gás reage com moléculas do ar e proporciona, acima de tudo, o aumento do volume e da concentração dos gases de combustão. A equação então, com o hidrogênio como aditivo será:



A equação, já considerando um excesso de ar de 12% representa que, para 1 mol de gasolina e 0,3 mol de hidrogênio (acrécimo de 30% do aditivo no combustível), resulta em um ganho molar da molécula de água, que passa a ter a proporção de 1 mol de octano para produzir 9,3 mols de H₂O.

Através da comparação entre as equações explicitadas é possível perceber que, a influência do hidrogênio como aditivo é de aumento da produção de vapor de água, considerando como resultado não poluente da combustão.

Sendo assim, os ganhos provenientes da utilização do gás hidrogênio como aditivo ultrapassam o aumento de temperatura, pressão e consequentes desempenho do motor, influenciando ainda na redução da emissão de gases poluentes e no aumento da produção de vapor de água.

4.5 Cálculo da Potência do Motor com Hidrogênio como Aditivo

O cálculo da potência do motor com hidrogênio é um fator importante para a análise de desempenho do motor, uma vez que demonstra os benefícios da utilização do gás como aditivo. Para tal cálculo foi necessário rever a Tabela 9 para gerar novos dados, visto que a presença do hidrogênio varia condições importantes para o cálculo. Os novos valores estão explicitados na Tabela 16.

Tabela 16 - Cálculo das condições de operação do motor a partir das especificações técnicas com hidrogênio

Entrada	Deslocamento [m ³]	0,000223
	Pressão [kPa]	101,325
	Temperatura [K]	298,15
	Volume Específico [m ³ /kg]	0,84494
Compressão	Taxa de compressão	9,5
	Calor específico à pressão constante [kJ/kmol.K]	29,667
	Coefficiente Isentrópico	1,389
	Temperatura [K]	716,39
	Pressão [kPa]	2312,90
	Volume específico [m ³ /kg]	0,08894
	Massa do sistema [kg]	0,00030
	Vazão mássica [kg/s]	0,03445
Expansão	Calor de entrada [kW]	24,9
	Calor específico à volume constante [kJ/kmol.K]	27,24
	Temperatura [K]	1478,26
	Pressão [kPa]	4772,62
	Coefficiente dos gases [kJ/kg.K]	0,28989
	Volume específico [m ³ /kg]	0,08979
Escape	Calor específico à volume constante [kJ/kmol.K]	35,638
	Coefficiente isentrópico [kJ/kmol.K]	1,304
	Temperatura [K]	745,13
	Pressão [kPa]	253,23
	Volume específico [m ³ /kg]	0,845
	Calor contido na exaustão do motor [kJ/kg]	425,82
Desempenho	Trabalho específico do ciclo [kJ/kg]	297,71
	Trabalho do ciclo [J]	0,09
	Torque do motor [N.m]	20,46
	Pressão média efetiva [kPa]	393,80
	Potência do motor [kW]	5,127
	Calor rejeitado (gases de exaustão) [kW]	14,668
	Radiação e outras perdas [kW]	5,127

Fonte: Pesquisa Direta, 2017

A Tabela 15 apresenta por fim, as variações e influências dos valores do ciclo ideal com a utilização do hidrogênio como aditivo na mistura de ar-combustível. Em especial, as mudanças mais significativas se encontram no calor de entrada do sistema e no desempenho final do motor.

É importante ressaltar que a Tabela 15 foi elaborada anteriormente a produção da modelagem numérica do problema, isto porque, seus dados de temperatura e pressão, bem como razão combustível-ar serviram de parâmetro de entrada para o software Ricardo Wave®.

4.6 Análise de torque e potência

Como parte final da análise de desempenho do motor de combustão interna utilizando mistura de gasolina e hidrogênio tem-se os resultados de trabalho, torque e potência do motor expressos na Tabela 17 para o ciclo ideal calculado pelo *software* Excel™.

Tabela 17 - Desempenho do ciclo teórico sem e com hidrogênio como aditivo

	Gasolina	Gasolina e Hidrogênio	Aumento Percentual
Potência do motor [kW]	4,687	5,127	9,39%
Trabalho do ciclo [J]	0,08	0,09	11,25%
Torque do motor [N.m]	19,08	20,46	7,23%
Pressão média efetiva [kPa]	359,96	393,80	9,40%

Fonte: Pesquisa Direta, 2017

Na Tabela 17 são apresentados os resultados da comparação dos cálculos via *software* Excel™ obtidos nas Tabelas 9 e 16. Os resultados foram uma potência e torque do motor 9,39% e 7,23%, respectivamente, maior com a utilização da mistura gasolina-hidrogênio. Também houve aumento no trabalho do ciclo e na pressão média efetiva de 11,25% e 9,40%, respectivamente.

Sendo assim, para o ciclo teórico é possível perceber que o hidrogênio acrescido, igual a 30% do valor de consumo específico do motor, trouxe benefícios para o desempenho do motor. O que se deve, principalmente às propriedades do hidrogênio que proporcionam uma melhor queima, maior pressão e temperatura dentro da câmara de combustão e, conseqüentemente, melhorias no desempenho.

Ainda como parte final da análise de desempenho do motor de combustão interna utilizando mistura gasolina-hidrogênio tem-se os resultados da modelagem para o ciclo real sem e com o hidrogênio como aditivo explicitados na Tabela 18.

Tabela 18 - Resultado do desempenho do ciclo real sem e com hidrogênio em Ricardo Wave®

	Gasolina	Gasolina e Hidrogênio	Aumento Percentual
Potência do motor [kW]	3,65	3,90	6,71%
Trabalho do ciclo [J]	0,062	0,068	9,68%
Torque do motor [N.m]	5,65	6,03	6,71%
Pressão média efetiva [kPa]	318,06	339,39	6,71%

Fonte: Pesquisa Direta, 2017

Na Tabela 18 são apresentados os resultados da comparação dos cálculos via *software* Ricardo Wave®. Os resultados foram uma potência e torque do motor 6,71% e 6,71%, respectivamente, maior com a utilização da mistura gasolina-hidrogênio. Também houve aumento no trabalho do ciclo e na pressão média efetiva de 9,68% e 6,71%, respectivamente.

Sendo assim, para o ciclo ideal é possível perceber que o hidrogênio acrescido, igual a 30% do valor de consumo específico do motor, trouxe benefícios para o seu desempenho. O que permite afirmar que é totalmente viável a utilização do hidrogênio como aditivo devido aos seus benefícios para a potência, trabalho e torque do motor.

4.7 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos na análise de desempenho do motor de combustão interna para o Ciclo Otto Ideal e Real com e sem a adição de hidrogênio na mistura ar-combustível. De acordo com a modelagem matemática no *software* Ricardo Wave® é possível a utilização do hidrogênio como aditivo em um motor de motocicletas, além de mostrar quais foram os procedimentos adotados para a realização dos cálculos necessários a fim de obter os dados de desempenho do motor e por fim será feita uma discussão dos resultados.

No próximo capítulo serão apresentadas as conclusões do trabalho, respondendo a pergunta problema, com a apresentação dos objetivos alcançados, além de uma síntese dos resultados mais relevantes obtidos via cálculo no *software* Excel™ e modelagem no *software* Ricardo Wave®. Além disso, serão realizadas recomendações para trabalhos futuros e continuidade da análise de desempenho do motor de combustão interna para motocicletas.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

O presente capítulo apresenta as conclusões tomadas a partir dos resultados obtidos, seguida pelas sugestões para trabalhos futuros.

5.1 Conclusão

Nos dias atuais, vivencia-se uma grande preocupação em relação às fontes energéticas, principalmente o petróleo. Isto porque, além de ser a fonte energética mais importante do mundo os seus principais derivados a gasolina e o diesel. Outra preocupação atual se dá no aumento da eficiência energética e na melhoria do desempenho dos ciclos e processos para o melhor aproveitamento das fontes.

Para o presente estudo, as condições de operação de um motor de combustão interna, foram calculadas considerando seu ciclo, isto é, o Ciclo Otto 4 tempos. A partir das condições de saída do motor calculado, as condições de operação ideais e reais foram determinadas, obtendo parâmetros para análise do desempenho com e sem o hidrogênio como aditivo.

Os resultados apresentados pelo cálculo via *software* Excel™ e modelagem no *software* Ricardo Wave® serviram como base para comprovar numericamente a influência positiva do uso do hidrogênio como aditivo no desempenho de um motor de combustão interna usado em motocicletas. Possibilitando atingir o objetivo geral do trabalho.

Para o alcance do objetivo geral foi necessário realizar o estudo teórico do motor de combustão interna e de seu desempenho com apenas gasolina e com mistura gasolina-hidrogênio, através dos cálculos com as equações para o Ciclo Otto Ideal. Foi realizado também a modelagem numérica do sistema para comparação entre os ciclos real e ideal.

Neste trabalho também foi descrita a metodologia adotada, onde foram apontados as variáveis e os indicadores do estudo para a execução dos cálculos e da modelagem numérica. Foram apresentados os instrumentos de coleta e tabulação.

Após análise dos dados do Ciclo Otto Ideal foi possível concluir que a utilização do hidrogênio como aditivo proporcionou um ganho de 9,39% na potência do motor. Além disso, obteve-se 7,23% mais torque com a mistura combustível-hidrogênio do que com a gasolina. Ainda sobre o desempenho houve aumento no trabalho do ciclo e na pressão média efetiva de 11,25% e 9,40%, respectivamente.

Com a análise, através de modelagem numérica, o Ciclo Otto Real comprovou-se também mais eficiente com a utilização da mistura gasolina-hidrogênio, apresentando como principais resultados um aumento no torque do motor de 6,71%, igualmente ao aumento de sua potência. Além disso, o ciclo apresentou aumento significativo do trabalho de 9,68%.

É importante ressaltar também que o hidrogênio como aditivo colaborou, de acordo com o presente estudo, com o adiantamento do ponto de máxima pressão e temperatura do ciclo, aproximando os dados de um ciclo ideal, o que por sua vez, melhora os resultados esperados e a eficiência do ciclo.

5.2 Recomendações

A partir da finalidade deste trabalho e das conclusões obtidas sugere-se como trabalhos futuros a análise experimental laboratorial e em condições diversas do desempenho do motor de combustão interna afim de verificar a eficiência da utilização do hidrogênio no torque, trabalho e potência do motor. Além disso, sugere-se ainda a comparação com as análises realizadas na modelagem numérica.

Por fim, a título de entendimento da influência do hidrogênio dentro da câmara de combustão, sugere-se o estudo detalhado do ciclo do motor com e sem a utilização do hidrogênio como aditivo, estudo esse que poderá ser realizado através de simulações em *software* de elementos finitos e experimentos laboratoriais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDO, E. **Modern Motorcycle Technology**. 3. ed. Nova Iorque: Delmar, Cengage Learning, 2013. 1-20 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **Atlas de energia elétrica no Brasil**. 3. ed. Brasília: Aneel, 2008. 236 p.

ANGHEBEN, A. A. **Estudo sobre a combustão de blendas de hidrogênio e diesel em motores ciclo diesel**. Pelotina: Universidade Federal do Paraná, 2013. 40 p.

BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna**. 1 ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 2013. 1 v.

ÇENGEL, Y. A. **Termodinâmica**. 5. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Balanco Energético Nacional 2015: Ano base 2014**. Rio de Janeiro: EPE, 2015. 292 p.

ESTEVIÃO, T. E. R. **O Hidrogênio como combustível**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.

FEDERAÇÃO NACIONAL DA DISTRIBUIÇÃO DE VEÍCULOS AUTOMOTORES (Brasil). **Anuário 2015: O desempenho da distribuição automotiva no Brasil**. São Paulo, 2016. 168 p.

FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002. Apostila.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1999.

LEAR, G. **Motorcycle Mechanics**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall Inc., 1977. 270 p.

MARTINS, J. **Motores de Combustão Interna**. 2. ed. Porto: PUBLINDÚSTRIA EDIÇÕES TÉCNICAS, 2006. 437 P.

MERRIAM-WEBSTER'S. **Merriam -Webster's Collegiate Dictionary**. 11. ed. Nova Iorque: Merriam-Webster Inc, 2011

MINAYO, M. C. S. **Pesquisa social: teoria, método e criatividade**. 22 ed. Rio de Janeiro: Vozes, 2003.

RIFKIN, J. **A economia do hidrogênio**. São Paulo: M. Books, 2003. 301 p.

SANTOS, F. A.; SANTOS, F. M.; **O Combustível Hidrogênio**. Revista do ISPV, no35, Maio de 2005.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL DO RIO DE JANEIRO. **Mecânica de Motocicletas**. Rio de Janeiro, 2002. 176 p.

SILVA, C. R. O. **Metodologia do trabalho científico**. Fortaleza: Centro Federal e Educação Tecnológica do Ceará, 2004.

SILVEIRA, J. L. **Hydrogen production by biogas steam reforming: A technical, economic and ecological analysis**. Elsevier: ScienceDirect, 2013.

SOUZA, M. M. V. M. **Tecnologia do hidrogênio**. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Editora Synergia, 2009.

TAYLOR, C. F. **Análise dos motores de combustão interna**. São Paulo: Edgard Blucher, 1988.

TOLMASQUIM, M. T. **Fontes Alternativas de Energia e Universalização dos Serviços de Energia Elétrica**. Em edição. Rio de Janeiro: 2003.

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina. **O estado gasoso**. Disponível em http://www.qmc.ufsc.br/quimica/pages/aulas/gas_page3.html. Acesso em fevereiro de 2014.

VAN WYLEN, G. J. **Fundamentos da Termodinâmica**. 6. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 2003. 577 p.

WOLLMANN, F. L. **Estudo da utilização de gás hidrogênio em veículos automotores**. Panambi: Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2013. 74 p.

YAMAHA MOTOR DA AMAZÔNIA LTDA, **Manual de Serviço**: XT 225. Amazônia: Departamento de Serviços e Pós Venda. 1997.

YIN, R. K. **Estudo de Caso: Planejamento e Métodos**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

