

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE DESEMPENHO DE UM MOTOR AP COMUM UTILIZANDO
ÁLCOOL ETÍLICO HIDRATADO COMBUSTÍVEL E GÁS HIDROGÊNIO ENRIQUECIDO COM
OXIGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL AUXILIAR

por

Frederico Scheinpflug Blanco

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Junho de 2016



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE DESEMPENHO DE UM MOTOR AP COMUM UTILIZANDO
ÁLCOOL ETÍLICO HIDRATADO COMBUSTÍVEL E GÁS HIDROGÊNIO ENRIQUECIDO COM
OXIGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL AUXILIAR

por

Frederico Scheinpflug Blanco

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Dr. Pedro Barbosa Mello

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Thamy Cristina Hayashi

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira

Prof. Dr. Alexandre Vagtinski de Paula

Porto Alegre, 01 de Dezembro de 2016.

Dedico este trabalho à minha família que sempre me apoiou, à sociedade brasileira que torna possível o estudo gratuito nesta Universidade, aos tantos colegas com quem tive o prazer de conviver ao longo dos anos e a todos os professores que, com empenho e dedicação, nos tornam, dia após dia, pessoas melhores.

Agradeço especialmente nesta reta final ao Professor Pedro Barbosa Mello pelas lições que tornaram este trabalho possível e aos colegas do Laboratório de Motores, Engenheiros Thiago Fernandes, Júlio Gaudioso e Graduando Leonel Mügge pelo companheirismo nos tantos dias juntos que tornaram possível a realização dos ensaios.

Blanco, F.B. **ANÁLISE EXPERIMENTAL DE DESEMPENHO DE UM MOTOR AP COMUM UTILIZANDO ÁLCOOL ETÍLICO HIDRATADO COMBUSTÍVEL E GÁS HIDROGÊNIO ENRIQUECIDO COM OXIGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL AUXILIAR.** 2016. 14 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental em um motor AP 1.6, sendo alimentado com álcool etílico hidratado combustível e análise comparativa das mudanças de desempenho com a adição de gás hidrogênio enriquecido com oxigênio na mistura, como combustível auxiliar, sem alterações na configuração do motor. É importante que sejam estudadas as interações entre as diversas alternativas frente à combustíveis fósseis presentes no mercado de mobilidade e um dos fatores atrativos é que para a utilização do gás HHO não é preciso realizar mudanças na configuração no motor. Os resultados obtidos estão em concordância com a literatura investigada, apresentando sutil melhora no desempenho geral do motor e consequente diminuição da emissão de poluentes. Houve um aumento médio de 2% na potência líquida efetiva e uma redução de 2,5% do consumo específico de combustível. A emissão de poluentes sofreu redução de 15% em termos de monóxido de carbono e 11,5% em termos de hidrocarbonetos.

PALAVRAS-CHAVE: Hidrogênio, Motores de Combustão Interna, Álcool Etílico Hidratado Combustível, Emissão de Poluentes.

BLANCO, F.B. EXPERIMENTAL PERFORMANCE ANALYSIS OF A COMMON AP ENGINE USING HYDROUS ETHANOL FUEL AND OXYGEN ENRICHED HYDROGEN GAS AS AUXILIARY FUEL. 2016. 14 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ABSTRACT

This work presents an experimental study in a AP engine 1.6, being fed with hydrous ethanol fuel and comparative analysis of the changes in performance with the addition of oxygen enriched hydrogen gas in the mixture, as auxiliary fuel, without changes in the Engine configuration. It is important to study the interactions between the several alternatives to fossil fuels present in the mobility Market, and one of the attractive factors is that for the use of HHO gas it is not necessary to make changes in the configuration in the engine. The results obtained are in agreement with the investigated literature, showing a subtle improvement in the overall performance of the engine and consequent decrease of pollutants emissions. There was an average increase of 2% in net effective power and a reduction of 2.5% in specific fuel consumption. The emission of pollutants was reduced by 15% in terms of carbon monoxide and 11.5% in terms of hydrocarbons.

KEYWORDS: Hydrogen, Internal Combustion Engines, Hydrous Ethanol Fuel, Pollutant Emission.

ÍNDICE	Página.
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	2
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
4.1 Motores de Combustão Interna.....	3
4.2 Combustão.....	4
4.2.1 Relação Estequiométrica.....	4
4.2.2 Combustão Anormal.....	4
4.3 Combustíveis Para Motores Endotérmicos.....	4
4.4 Características dos Gases de Escapamento.....	5
4.5 Torque e Potência.....	5
4.6 Consumo Específico de Combustível.....	5
4.7 Eletrólise - Geração de HHO.....	6
5 METODOLOGIA DE ENSAIOS.....	7
5.1 Equipamentos.....	8
6.RESULTADOS.....	10
7. COMPARAÇÕES.....	13
8. CONCLUSÃO.....	13
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	14
APÊNDICE A.....	16

1. INTRODUÇÃO

Atualmente a sociedade depara-se com o crescente aumento no consumo e no custo da energia. Os possíveis usos desta energia podem ser resumidos em industrial, transportes, residencial e comercial. De acordo com o Departamento de Informações Energéticas dos Estados Unidos, no artigo referente ao Uso de Energia para Transportes, em 2015, 28% de toda a energia consumida naquele país foi no setor de transportes. Este levantamento aponta que a energia utilizada para deslocamento é suprida em 92% por derivados de petróleo, como gasolina e diesel, 5% pelos chamados biocombustíveis, como etanol e biodiesel, e 3% por gás natural. Apesar dos recentes avanços tecnológicos que visam reduzir o consumo específico de combustível e a emissão de poluentes dos motores de combustão interna, a expansão da frota e o aumento de quilômetros rodados pelos meios de transporte contribuem para a tendência de aumento no consumo geral de combustíveis. A produção de petróleo aumenta a cada ano, porém a descoberta de novas reservas tem se tornado cada vez mais difícil e desafiadora, vide a recente descoberta do pré-sal, onde as reservas se encontram em altas profundidades, que, de acordo com Lima, 2015, geram um alto investimento em busca de novas tecnologias que possibilitem a extração do produto. Sendo assim, teses como a de Höök e Tang, 2013 afirmam que em um futuro próximo chegaremos ao limite de exploração das reservas mundiais, causando impactos socioeconômicos severos. Com base neste cenário, a comunidade científica tem avaliado alternativas para diminuir a forte dependência atual aos combustíveis fósseis.

Dentre as diversas alternativas estudadas atualmente, a utilização de hidrogênio como combustível tem se mostrado promissora. Elemento muito abundante e altamente reativo, é geralmente encontrado combinado a outros elementos. Para utilizá-lo como combustível é preciso que as ligações do hidrogênio com outros elementos sejam quebradas. Uma maneira de realizar esta quebra é a obtenção de hidrogênio e oxigênio a partir da separação eletroquímica da água, chamada de eletrólise. Segundo Sharma e Ghoshal, 2015, um dos problemas da utilização de hidrogênio puro como combustível é a dificuldade de armazenamento e distribuição do mesmo, devido às altas pressões utilizadas nos sistemas. Para contornar esta dificuldade uma possibilidade atrativa é a geração de hidrogênio a bordo. A mistura de hidrogênio e oxigênio, também chamado de gás hidrogênio enriquecido com oxigênio (HHO) ou gás de Brown, obtida a partir da eletrólise, tem sido considerado como uma promissora fonte de energia renovável a ser utilizada em motores endotérmicos. A utilização deste produto em conjunto com o combustível ao qual o motor foi projetado tem sido estudada a fim de reduzir o consumo de combustível fóssil e a poluição gerada. Segundo El-Kassaby *et al.*, 2015 um dos fatores atrativos é que para a utilização do gás HHO não é preciso realizar mudanças na configuração no motor, sendo somente necessário acoplar a saída do aparelho de eletrólise ao coletor de admissão. Atualmente a comercialização de conjuntos veiculares para geração e utilização de HHO têm se popularizado devido ao aumento da disponibilidade e redução de custos dos mesmos.

Seguindo a mesma linha, a utilização de biocombustíveis tem sido incentivada via programas governamentais em diversos países do mundo. Após a crise do preço do petróleo no início da década de 70, foi iniciado no Brasil, em 1975, o Programa Pró-Álcool para diminuir a dependência das importações do petróleo. Ainda hoje, para incentivar o consumo de etanol, a gasolina disponível em postos de combustíveis tem 25% de etanol em sua composição. Segundo Kohlhepp, 2010, o Brasil é o líder em produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, sendo que este processo é mais barato em relação ao milho (E.U.A.) e beterraba (Europa). As condições naturais para produção do biocombustível no Brasil fortalecem a posição de potência regional e viabiliza a sua pretensão de líder político na América Latina e como influência global no mercado de energia.

Sendo assim, é importante que sejam estudadas as interações entre as diversas alternativas frente à combustíveis fósseis presentes no mercado de mobilidade. É proposta neste trabalho a análise comparativa de desempenho, seguindo a norma vigente, quando adicionado gás HHO na mistura de um motor comercial, sem modificações, movido à etanol. Para isso parâmetros como torque, potência líquida efetiva e emissões de poluentes foram medidos com

os equipamentos disponíveis no Laboratório de Motores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste estudo analisar a utilização de gás hidrogênio enriquecido com oxigênio como combustível auxiliar em um motor comum com álcool etílico hidratado combustível. No presente texto busca-se despertar o interesse dos leitores para o processo eletrólise para obtenção do gás HHO e para a metodologia de ensaios em motores a combustão interna, regidos pela norma NBR ISO 1585, 1996.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A incessante pesquisa acerca de motores de combustão interna, visando maior eficiência e menor emissão de poluentes é fonte de diversos trabalhos, como de TAYLOR, 2008. Um dos caminhos para alcançar os objetivos citados é estudando os combustíveis, sejam a forma de produção ou consumo dos mesmos. Devido à popularização da comercialização dos aparelhos de eletrólise para geração de gás hidrogênio enriquecido com oxigênio, diversos estudos recentes, como de Wollmann, 2013, têm enfoque na produção deste gás a bordo dos veículos, utilizando o mesmo como combustível auxiliar em motores comuns, numa tentativa de transpor as barreiras tecnológicas supracitadas.

De acordo com Singh, *et al.*, 2015, nos deparamos com três grandes barreiras tecnológicas que devem ser transpostas para uma transição de uma economia baseada em combustíveis fósseis para uma economia baseada em hidrogênio. Primeiro, uma produção economicamente viável e sustentável para equiparar com outras alternativas. Segundo, deve ser desenvolvida uma nova geração de tecnologia de armazenamento para prover uma autonomia adequada para os veículos. Por fim, o custo das células de combustível e outros sistemas baseados em hidrogênio devem ser reduzidos, juntamente com um aumento na vida útil dos mesmos.

No estudo de El-Kassaby *et al.*, 2016 foi construído um aparelho de eletrólise para geração de HHO. Além de diferentes configurações do aparelho foram avaliados dois tipos de catalisadores, hidróxido de potássio (KOH) e hidróxido de sódio (NaOH), como parte da solução eletrolítica utilizada no aparelho, onde a melhor condição encontrada para produção de HHO foi a concentração de 6g/l de hidróxido de potássio. Após esta análise, o produto obtido foi adicionado como combustível auxiliar em um motor comum, 1.3, à gasolina, e medições de potência, consumo e emissão de poluentes foram realizadas. Os dados obtidos neste trabalho mostram que a adição gerou um aumento de 10% de eficiência térmica do motor, consequentemente ocasionando reduções de 34% de consumo específico de combustível e 18% em emissões de monóxido de carbono e 14% de hidrocarbonetos, respectivamente.

O trabalho de Wollmann, 2013, teve como aspecto interessante a utilização de produtos disponíveis no mercado. O kit utilizado para geração de gás HHO era comercializado nos E.U.A., marca HydroCell, com custo total de aquisição, na época, de R\$841,56. Este kit fornecia todos os componentes necessários para a instalação e funcionamento em um veículo comum, como ligações elétricas, hidráulicas, reservatórios e relés. Para os ensaios foi utilizado um Corsa Wind 1.0 à gasolina, modelo popular do mercado brasileiro. Como conclusão, o autor cita que o alternador do veículo produz carga em excesso quando o mesmo está em funcionamento, possibilitando a produção de gás HHO. Foi observado pelo autor um aumento na potência de até 8%, uma redução no consumo de combustível e consequente redução nas emissões de poluentes, em especial o Monóxido de Carbono, onde houve uma redução de até 48% na concentração do mesmo, fato este atribuído à presença de HHO favorecer a queima da mistura na câmara de combustão.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Motores de Combustão Interna:

De acordo com Heywood, 1988, os motores de combustão interna, ou motores endotérmicos, são máquinas capazes de transformar parcialmente a energia química do combustível em trabalho através de ciclos termodinâmicos, também chamados de tempos, que são realizados dentro do cilindro. Os tempos são definidos pela movimentação do cilindro entre o Ponto Morto Superior (PMS) e o Ponto Morto Inferior (PMI), onde cada tempo representa o deslocamento entre estes dois pontos. A Figura 4.1.1 representa simplificada a geometria do cilindro.

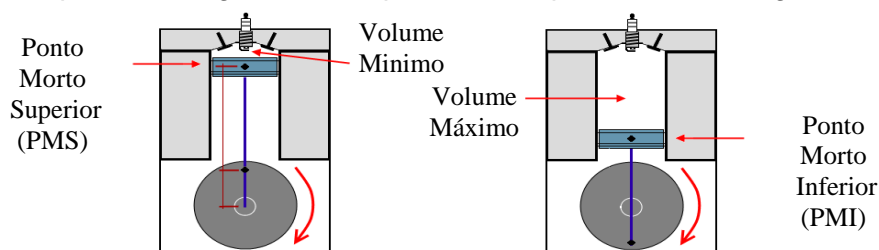


Figura 4.1.1 – Geometria simplificada de um Cilindro de Motor Endotérmico.

Os ciclos de funcionamento do motor com ignição por centelha são apresentados a seguir:

Admissão: Na primeira fase do ciclo, com a válvula de admissão aberta, o êmbolo se desloca do ponto morto superior em direção ao ponto morto inferior, criando uma pressão negativa que succiona a mistura ar/combustível dos dutos de admissão para dentro do cilindro. Quando o êmbolo chega no ponto morto inferior, a fase de admissão encerra-se e a válvula de admissão é fechada. A partir deste momento, a segunda fase do ciclo – a compressão – inicia.

Compressão: A fase de compressão se dá durante o intervalo que o êmbolo se move do PMI e, com as válvulas devidamente fechadas, movimenta-se em direção ao PMS. Este movimento comprime a mistura aspirada.

Expansão: Iniciada por uma centelha produzida pela vela de ignição, a liberação de energia térmica devido à combustão da mistura eleva rapidamente a pressão no cilindro. Como as válvulas de admissão e exaustão estão fechadas, o êmbolo é deslocado para o ponto morto inferior, aumentando o volume e reduzindo gradualmente a pressão no interior do cilindro. O movimento do êmbolo sendo empurrado pelos gases provenientes da queima da mistura é o que realiza trabalho útil no motor. Quando o êmbolo chega novamente ao PMI inicia a exaustão.

Exaustão: Com a válvula de escape aberta, o êmbolo inicia o último movimento do ciclo, indo do PMI ao PMS eliminando, pelo orifício de escape, os gases provenientes da queima. No momento que o cilindro atinge o PMS ocorre o fechamento da válvula de escape e a abertura da válvula de admissão, iniciando novamente a fase de admissão.

Os ciclos descritos são representados na Figura 4.1.2.

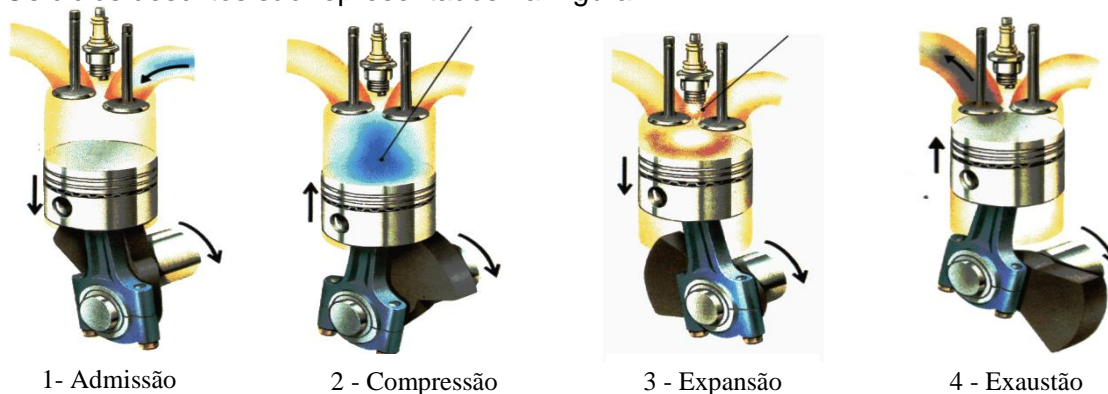


Figura 4.1.2 – As quatro fases de um motor de ignição por centelha.

[Adaptado de Moin, 2016.]

4.2 Combustão

A mistura de ar e combustível, antes da combustão, e os produtos da queima, após a combustão, são os fluidos de trabalho de um motor endotérmico, segundo Heywood, 1998. A combustão é uma reação química onde o oxigênio do ar reage com elementos constituintes do combustível, produzindo grande quantidade de calor. Esta liberação de energia térmica aumenta o volume do fluido de trabalho, aumentando a pressão e gerando trabalho através do movimento do pistão.

4.2.1 Relação Estequiométrica

Para que a combustão ocorra de forma adequada dentro do cilindro, a relação de ar e combustível da mistura admitida deve seguir o balanceamento químico dos componentes da reação, proporção esta chamada de relação estequiométrica, Heywood, 1988. Para explicitar o quanto a mistura ar/combustível afasta-se da relação estequiométrica, foi criado o fator Lambda (λ). Simplificadamente este fator é calculado pelo quociente entre a relação de ar e combustível presente no cilindro e a relação ar e combustível ideal. Os valores de lambda podem ser iguais 1, que indica mistura estequiométrica; maiores que 1 também chamada de mistura pobre, que indica mais oxidante que combustível; e menores que 1, também chamada mistura rica, onde indica presença de mais combustível que oxidante. Quando a mistura presente no cilindro é pobre, há pouco combustível, a energia disponível por volume é menor, conseqüentemente diminui o desempenho do motor. Já quando a mistura é rica a queima completa do combustível disponível não ocorre devido à ausência de oxidante disponível, gerando gasto excessivo de combustível e lançamento de Hidrocarbonetos não queimados no meio ambiente.

4.2.2 Combustão Anormal

Existem diversas possibilidades de ocorrer uma combustão anormal na câmara de combustão, onde podemos ressaltar a pré-ignição e a detonação.

A pré-ignição corre quando a mistura ar/combustível incendeia antes da ocorrência da centelha da vela de ignição, Giacosa, 1986. Este fenômeno acontece quando há um ponto com temperatura excessivamente alta na câmara de combustão.

A detonação ocorre devido ao aumento de pressão e temperatura dentro do cilindro conforme a combustão avança. Isto provoca o surgimento de uma chama não controlada que pode apresentar uma propagação de supersônica, ocasionando algo similar a uma explosão no cilindro, danosa ao motor. A resistência do combustível ao aumento de pressão é avaliada em testes que comparam o combustível analisado com combustíveis padrão. Segundo Heywood, 1988, os dois principais métodos para definir o número de octanas é o Método de Pesquisa (RON) e o Método Motor (MON). O primeiro determina a resistência à detonação com plena carga, em baixas rotações enquanto o segundo, também em plena carga, em altas rotações. A média entre estes dois valores fornece o Índice Anti-Detonante (IAD).

4.3 Combustíveis para Motores Endotérmicos

A grande maioria dos combustíveis utilizados em veículos automotores hoje é derivada de petróleo, matéria prima composta por diversos hidrocarbonetos. O refino desta matéria prima origina diversos produtos combustíveis, gasosos, líquidos e sólidos, como exemplos a Gasolina e o Diesel. Já por outro lado temos os chamados biocombustíveis como o Etanol e o Biodiesel. Estes produtos são gerados a partir de biomassa, uma das primeiras maneiras de obtenção de combustíveis descoberta pela humanidade. Esta classe de combustíveis é tida como mais sustentável e menos poluente que os derivados de petróleo de acordo com Hill et al, 2006. Prossequindo a busca por combustíveis mais sustentáveis, estudos como de El-Kassaby *et al.*, 2015 e Wollmann, 2013, mostram que adicionando gás hidrogênio enriquecido com oxigênio podem ser uma das alternativas viáveis em um futuro próximo.

O álcool etílico hidratado combustível (AEHC) é utilizado nos veículos brasileiros há mais de trinta anos, sendo parte importante da economia do país. Têm poder calorífico de 24,8 MJ/kg,

cerca de 65% do poder calorífico dos derivados de petróleo. Porém, devido à alta octanagem do álcool, este pode operar com maiores taxas de compressão favorecendo a eficiência e a potência do Motor. A relação estequiométrica deste combustível é geralmente de 9 partes de ar por 1 parte de combustível.

O gás hidrogênio enriquecido com Oxigênio (HHO), ou gás de Brown, é formado por H₂ O₂, separados em moléculas distintas, gerado comumente pelo processo de eletrólise da água facilitado por eletrólitos como hidróxido de sódio e hidróxido de potássio. Devido a sua obtenção ser a partir da água, é tomado como uma fonte de energia renovável. O poder calorífico do Hidrogênio é de 118 MJ/kg, e a relação estequiométrica do mesmo é de 34 partes de ar para 1 parte de hidrogênio.

4.4 Características dos Gases de Escapamento

De acordo com Heywood, 1988, os gases emitidos no escapamento de um motor de combustão interna são compostos por monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarbonetos não queimados (HC), óxidos de nitrogênio (NO_x), compostos orgânicos voláteis e particulados. Com exceção do CO₂, os produtos são resultado de reações incompletas nas câmaras de combustão e nocivos para o meio ambiente. Avaliação da eficiência do motor passa pela medição dos níveis destes produtos, sendo indicadores da qualidade da combustão.

4.5 Torque e Potência

O torque, ou momento torçor do motor, é a capacidade do motor de realizar trabalho. Este momento na saída da árvore de manivelas do motor é o potencial que a mesma tem de fazer girar uma massa em torno de seu eixo. Este momento é calculado conforme Equação 4.5.1.

$$\tau = F \cdot b \quad (4.5.1)$$

sendo τ_b o torque líquido efetivo medido, F a força medida de reação, em Newtons e b a distância do ponto de medição ao centro da árvore de manivelas.

A potência é a quantidade de trabalho que o motor realiza em certo período de tempo. Para calcular esta medida, utiliza-se o torque e a rotação medidas conforme Equação 4.5.2.

$$P = \tau \cdot \omega \quad (4.5.2)$$

onde P é a potência gerada no freio, em W, τ é o torque medido, em Nm, e ω é a velocidade angular da árvore de manivelas, em rad/s.

4.6 Consumo Específico de Combustível

A taxa em que o motor converte a energia presente no combustível em trabalho mecânico útil é definida como taxa de consumo específico de combustível. O consumo específico de combustível é avaliado dividindo a taxa de combustível utilizada pela potência medida pelo dinamômetro, conforme Equação 4.6.1.

$$C_e = \frac{\dot{m}}{P} \quad (4.6.1)$$

Sendo C_e o consumo específico de combustível, em kg/Wh, \dot{m} a vazão mássica de consumo de combustível, em g/s e P é a potência medida em W.

O consumo específico é inversamente proporcional à carga aplicada no motor e a abertura da borboleta altera a quantidade da mistura de ar e combustível admitida no motor, consequentemente a pressão média efetiva, que é a pressão média na câmara de combustão durante a admissão, sofre alterações conforme mostrado na Figura 4.6.1.

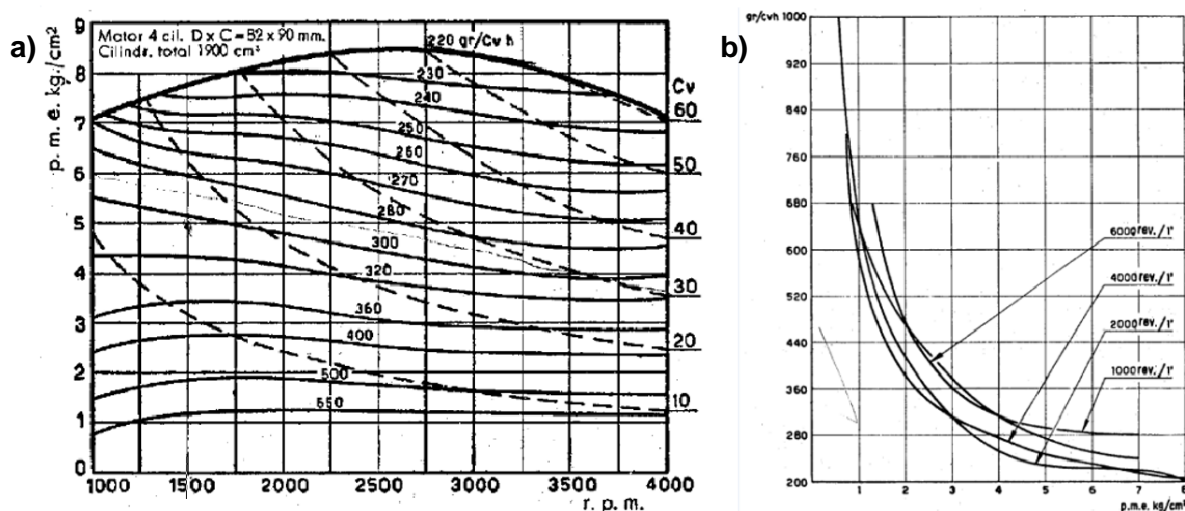


Figura 4.6.1: a) Plano cotado relacionando o consumo de combustível à rotação e à pressão média efetiva. b) Variação do Consumo Específico de Combustível em relação à pressão média efetiva [Giacosa, 1986]

4.7 Eletrólise - Geração de HHO

De acordo com Sardella, 1999 a dissociação eletroquímica da água por meio de reações de oxirredução não espontâneas desencadeadas a partir da passagem de corrente elétrica em uma solução condutora, é denominada eletrólise. O processo de eletrólise aquosa ocorre em uma solução aquosa condutora, onde primeiramente ocorre a decomposição de um composto em íons e posteriormente estes íons são carregados através desta solução devido à diferença de potencial. Os constituintes básicos do equipamento de eletrólise aquosa consistem em um cátodo, um ânodo, uma fonte de eletricidade e uma solução eletrolítica, conforme a Figura 4.7.1.

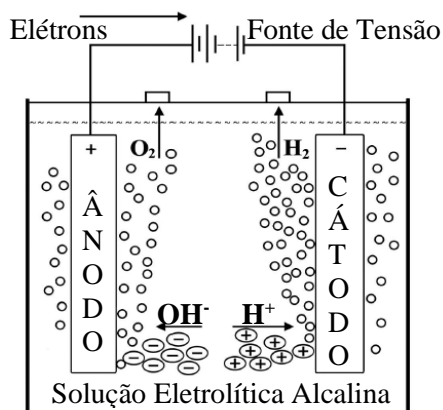


Figura 4.7.1 – Constituintes básicos de um aparelho de eletrólise.

Neste caso o eletrólito adicionado à água destilada foi o hidróxido de potássio, uma base forte comumente utilizada para diversos fins. O caráter básico deste eletrólito evita a corrosão severa dos componentes gerada por soluções ácidas. Devido à diferença de potencial nos eletrodos imersos, os íons disponíveis no líquido começam a se orientar de modo que os íons carregados negativamente (chamados ânions) ficam próximos ao eletrodo de carga positiva (ânodo), enquanto os íons carregados positivamente (cátions) movem-se em direção ao eletrodo de carga negativa (cátodo). Na interface eletrodo/eletrólito, os elétrons são absorvidos ou liberados pelos íons, para formar novas moléculas e/ou compostos químicos e a energia necessária para que estas reações ocorram é fornecida por uma fonte externa. As reações que ocorrem no processo são compiladas na Tabela 4.7.1.

Tabela 4.7.1 – Reações do processo de eletrólise da água, Sardella, 1999.

	Cátodo	Ânodo
<i>Migração de íons</i>	K^+ e H^+	OH^- da água e OH^- da base
<i>Reação</i>	$2H_2O_{(l)} + 2e^- = H_{2(g)} + 2OH_{(aq)}$	$2OH_{(aq)} = H_2O_{(l)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} + 2e^-$
<i>Produto Final</i>	Hidrogênio Gasoso	Oxigênio Gasoso

Durante o processo os cátions H^+ e K^+ são atraídos pelo cátodo, e os ânions OH^- são atraídos pelo ânodo. O gás hidrogênio e oxigênio são então gerados nos eletrodos de acordo com as reações descritas acima, podendo ser observada a geração de bolhas nos respectivos eletrodos, enquanto os íons K^+ e o OH^- permanecem na solução para manter a condutividade necessária.

5. METODOLOGIA DE ENSAIOS

Os testes foram realizados no Laboratório de Motores, pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS. A norma NBR ISO 1585, 1996, regeu os procedimentos realizados em laboratório. Para a correção dos valores de potência líquida efetiva foram utilizados os valores referenciados na norma, consolidados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Dados e valores de referência de acordo com a norma NBR ISO 1585, 1996.

Temperatura de bulbo seco:	298 K
Pressão atmosférica total:	100 kPa
Pressão de ar seco:	99 kPa
Pressão de vapor:	1 kPa

O fator de ajuste da potência líquida efetiva prossegue de acordo com a Equação 5.1:

$$\alpha_a = \left(\frac{99}{p_a}\right)^{1,2} \left(\frac{TBS}{298}\right)^{0,6} \quad (5.1)$$

em que α_a é o fator utilizado para corrigir a potência obtida nos ensaios, p_a é a pressão atmosférica seca, obtida subtraindo a pressão de vapor de água da pressão barométrica total e TBS é a temperatura de bulbo seco.

Obtém-se a potência líquida efetiva através da Equação 5.2:

$$P = P_m \alpha_a \quad (5.2)$$

em que P é a potência líquida efetiva, P_m é a potência medida e α_a é o fator de correção obtido por meio da Equação 5.1.

Além do Torque e da Potência, foram obtidos também o consumo específico de combustível e valores de Monóxido de Carbono, Dióxido de Carbono e Hidrocarbonetos necessários para a comparação de desempenho. A propagação de incertezas das medições foi realizada de acordo com o método de Kline e McClintock, 1953, condesadas no apêndice A.

Foram realizados dois tipos de ensaio, um ensaio com abertura total da borboleta (100%) e um ensaio com abertura parcial da borboleta (40%). Nos dois ensaios, a abertura da borboleta foi mantida constante, e somente a carga no dinamômetro foi alterada de modo que fossem obtidas leituras a 1500, 2500 e 3500 rotações por minuto. A escolha destas rotações foi feita com base na faixa de rotações mais utilizadas pelos condutores de veículos em tráfego urbano. Os ensaios foram realizados primeiramente somente com Álcool Etilico Hidratado Combustível, onde foram obtidos os dados em todas as rotações. Posteriormente o aparelho de eletrólise foi acionado para geração de gás hidrogênio enriquecido com oxigênio, onde a saída do mesmo foi posicionada na admissão de ar do carburador. Nesta configuração, foram realizados novamente os ensaios, seguindo os mesmos procedimentos.

5.1 Equipamentos

Os testes foram realizados em um motor Volkswagen AP 1.6, refrigerado à água, disponibilizado pelo Laboratório de Motores. Este motor foi projetado para utilização com Álcool Etilico Hidratado Combustível e regulação de mistura ar/combustível através de carburador Weber 450 Mini Progressivo. Não foram realizadas alterações no motor, pois a premissa do trabalho é a de utilizar motores comuns já em funcionamento. A Figura 5.1.a apresenta a bancada de controle do ensaio, onde foram realizadas as leituras de torque e rotação, e a figura 5.1.b o motor montado na bancada de testes. As características do motor estão apresentadas na Tabela 5.1.

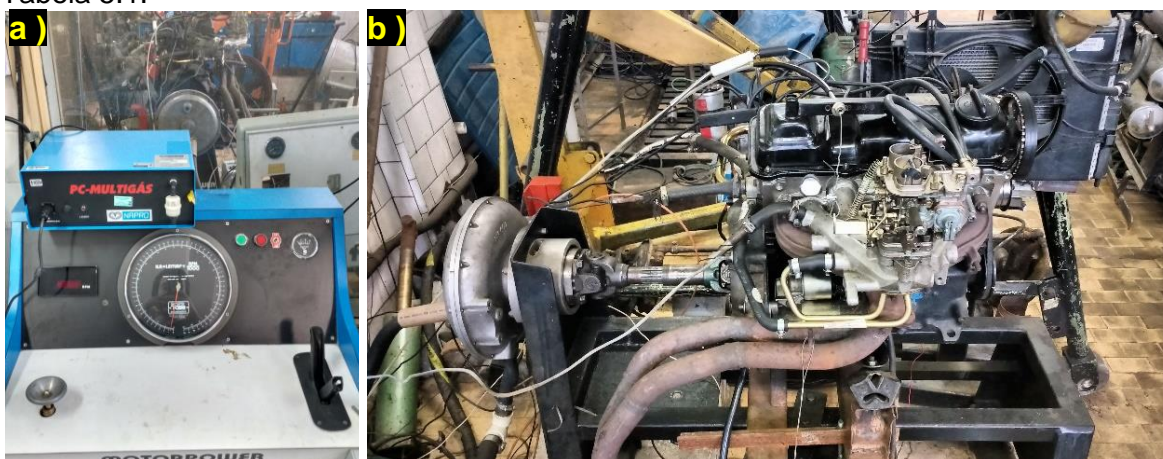


Figura 5.1. – a) Bancada de controle dos ensaios. b) Motor instalado na bancada de testes e acoplado ao dinamômetro.

Tabela 5.1 – Características do Motor Utilizado.

<i>Número e disposição de cilindros</i>	4, em linha.
<i>Número de válvulas</i>	8
<i>Diâmetro do cilindro</i>	81 mm
<i>Curso do Pistão</i>	77,4 mm
<i>Volume deslocado/ Cilindrada total</i>	399/1596 cm ³
<i>Relação de Compressão</i>	12,3:1
<i>Potência Máxima (NBR 1585)</i>	90kW à 5600 rpm
<i>Torque Máximo (NBR 1585)</i>	128 Nm à 2600 rpm
<i>Alimentação de Combustível</i>	Carburador Weber 450 Mini Progressivo
<i>Ordem de Ignição</i>	1-3-4-2

O aparelho de eletrólise utilizado para geração de gás HHO constitui-se de 2 placas externas de Poliamida com 28 mm de diâmetro e 13 mm de espessura, 7 placas internas de aço inox 316L de 22 mm de diâmetro e 2 mm de espessura. A energia utilizada para a eletrólise foi fornecida pela bateria do motor, ligado em paralelo com um carregador de bateria de corrente contínua e com isso obteve-se uma vazão de 4ml/s de gás HHO. A energia necessária para produção do gás foi de 204,45 W*. No trabalho de Wollman, 2013, concluiu-se que mesmo um alternador de um carro de pequeno porte tem capacidade suficiente de suprir a energia necessária para o processo de eletrólise ocorrer. Análises sobre possíveis reduções que o alternador geraria na potência líquida efetiva não foram realizadas, seguindo a metodologia aplicada nos trabalhos revisados.

* Trabalho “Análise Exergética do Processo de Eletrólise”, do Engenheiro Thiago Fernandes, recebida por correio eletrônico em 04 de Novembro de 2016.

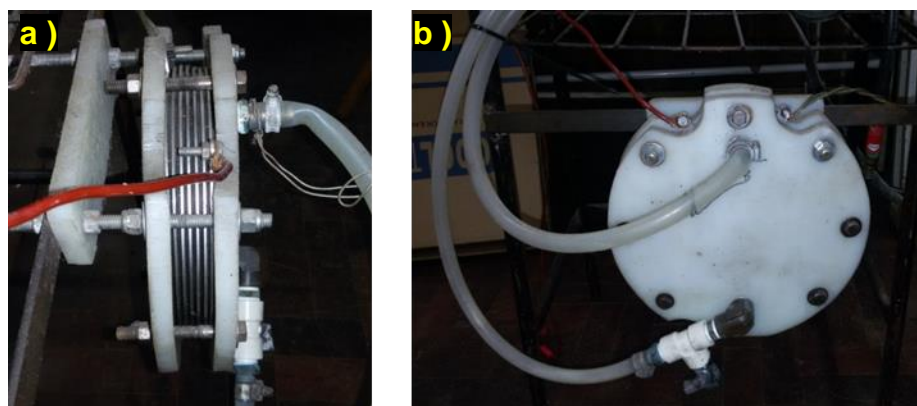


Figura 5.2– a) Vista Lateral e b) Frontal do Aparelho de Eletrólise.

A solução eletrolítica utilizada foi de 6g/l de Hidróxido de Potássio em água deionizada, seguindo parâmetro estudado por El-Kassaby *et al.*, 2016. A solução foi obtida no Laboratório de Controle e Integração de Processos (LACIP) do Departamento de Química da UFRGS. A saída do gás foi acoplada ao carburador de modo que não alterasse o fluxo e a vazão de ar, e que o mesmo aspirasse juntamente com o ar ambiente o produto da eletrólise. Este acoplamento foi mantido ao longo de todos os ensaios, inclusive com AEHC, para que não houvesse quaisquer discrepâncias nos resultados devido à possíveis alterações no fluxo e na vazão.

O dinamômetro utilizado foi do tipo hidráulico, marca MotorPower, modelo MP600. Este dinamômetro é composto por um rotor acoplado ao eixo do motor que dissipa a potência através da fricção do fluido nas paredes do estator gerando, além do movimento do estator, calor. Este calor é dissipado através de uma constante vazão de fluido, propiciado por uma bomba hidráulica. O torque é medido através de um transdutor hidráulico acoplado ao estator do dinamômetro por um braço de comprimento conhecido. A faixa de medição e incertezas são apresentadas na Tabela 5.2:

Tabela 5.2 – Dados do Dinamômetro Motor Power MP600

Variável	Faixa de medição	Incerteza
Rotação	0 a 9000 rpm	±0,5%
Torque	0 a 413,84 N.m	±0,7%

O analisador de gases utilizado foi da marca NAPRO, modelo PC-MultiGás. Este equipamento fornece os valores instantâneos de Hidrocarbonetos (HC), Monóxido de Carbono (CO) e Dióxido Carbono (CO₂). A faixa de medição e incertezas são apresentadas na Tabela 5.3:

Tabela 5.3 – Dados do Analisador de Gases PC-Multigás NAPRO

Variável	Faixa de medição	Incerteza
HC	0 a 12000 ppm	±3,5 ppm
CO	0 a 15%	±0,06% absoluto
CO ₂	0 a 20%	±0,6% absoluto

A relação de mistura ar/combustível foi obtida através de um sensor de oxigênio de banda larga da marca Bosch, modelo LSU 4.0 conectada a um condicionador de sinais da marca FuelTech, modelo Wideband O₂ Datalogger. A faixa de medição e incertezas são apresentadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Dados do Sensor de Oxigênio Bosch, Modelo LSU 4.0

Variável	Faixa de medição	Incerteza
Leitura do fator Lambda	0,70 a 1,60	±0,01 abs.

Uma célula de carga, marca Reaccion, modelo BCDL-10, acoplada a um conversor analógico digital de 24bits, que, ligado a um controlador digital da marca ATMEL modelo ATMEGA328, foi usado para aferição de peso no reservatório de combustível. A partir desta medição pôde-se efetuar o cálculo do consumo específico em cada ensaio. A incerteza de medição do consumo de combustível obtida foi de $\pm 1,5\%$.

Para melhor ilustrar a disposição dos equipamentos utilizados no ensaio realizado, um esquema geral do ensaio é apresentado na Figura 5.3.

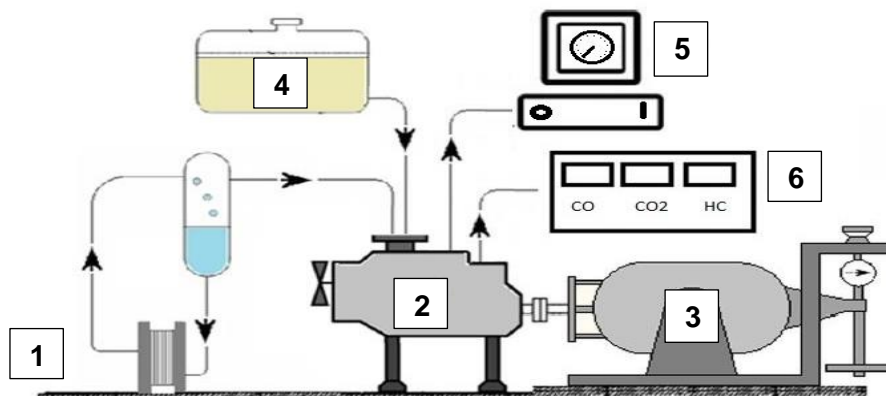


Figura 5.3. Esquema geral do ensaio, onde: Aparelho de eletrólise (1), motor (2), dinamômetro (3), reservatório de combustível (4), central de controle (5) e analisador de gases (6).

[Adaptado de El-Kassaby *et al.*, 2015]

6. RESULTADOS

Os resultados obtidos nos diferentes ensaios são apresentados a seguir, onde os gráficos à esquerda apresentam os ensaios feitos com abertura total da borboleta e os gráficos à direita apresentam os ensaios feitos com abertura parcial da borboleta. Todos os resultados foram adequados à norma seguindo as correções necessárias. Atribui-se os resultados pouco expressivos devido ao sistema de alimentação do motor ser carburado e à vazão de gás hidrogênio enriquecido com oxigênio ser baixa.

Potência Efetiva: A potência líquida efetiva calculada, em kW, é apresentada na Figura 6.1 abaixo, com incerteza de $\pm 0,9\%$.

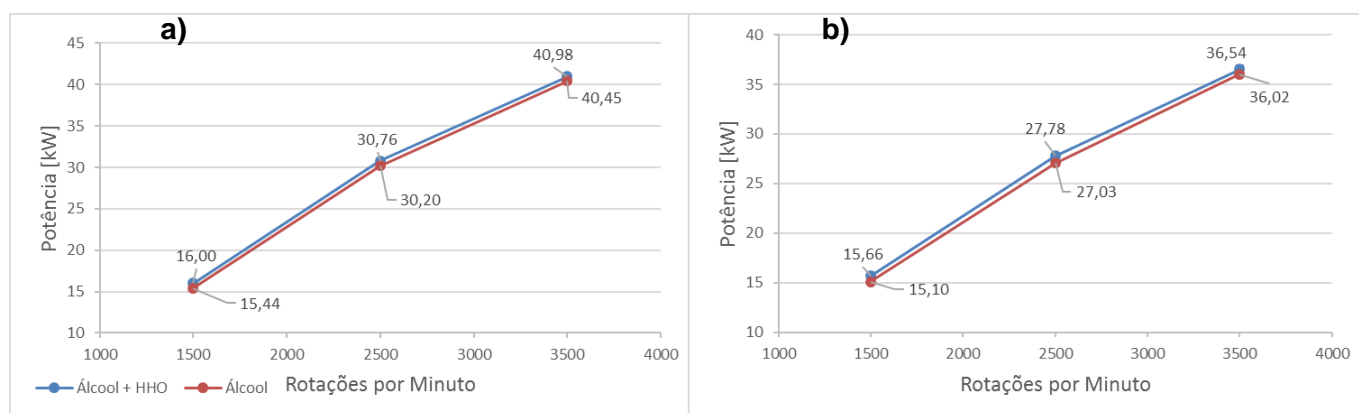


Figura 6.1 –Valores de potência líquida efetiva [kW] em relação à rotação em a) máxima aceleração e b) média aceleração

Torque: Os valores de torque medidos no dinamômetro, já convertidos para N.m, são apresentados na Figura 6.2, com incerteza de $\pm 0,7$ N.m.

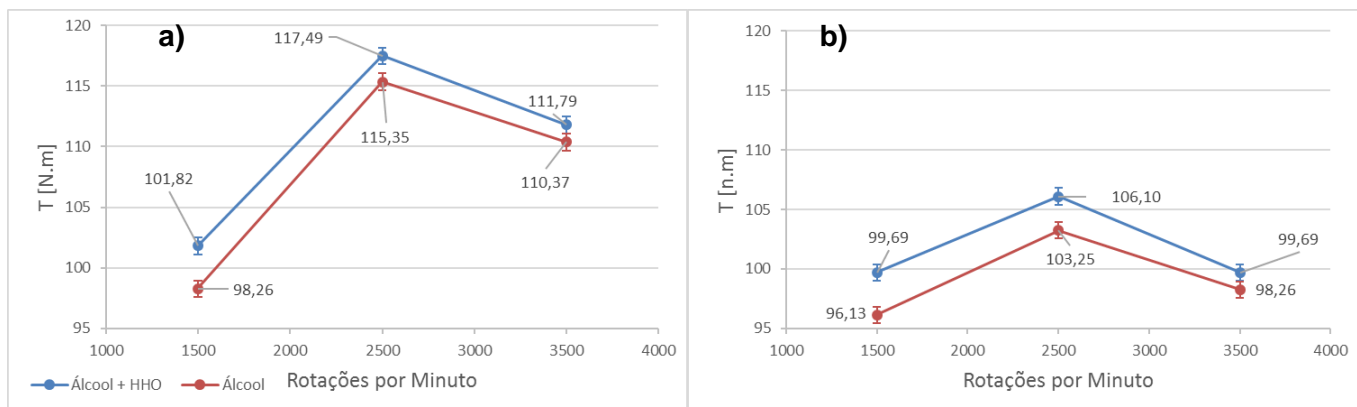


Figura 6.2 –Valores obtidos de torque [N.m] em relação à rotação em a) máxima aceleração e b) média aceleração

Consumo Específico: Os valores de consumo específico calculados, em kg/kW.h, são apresentados na Figura 6.3, com incerteza de $\pm 1,5\%$.

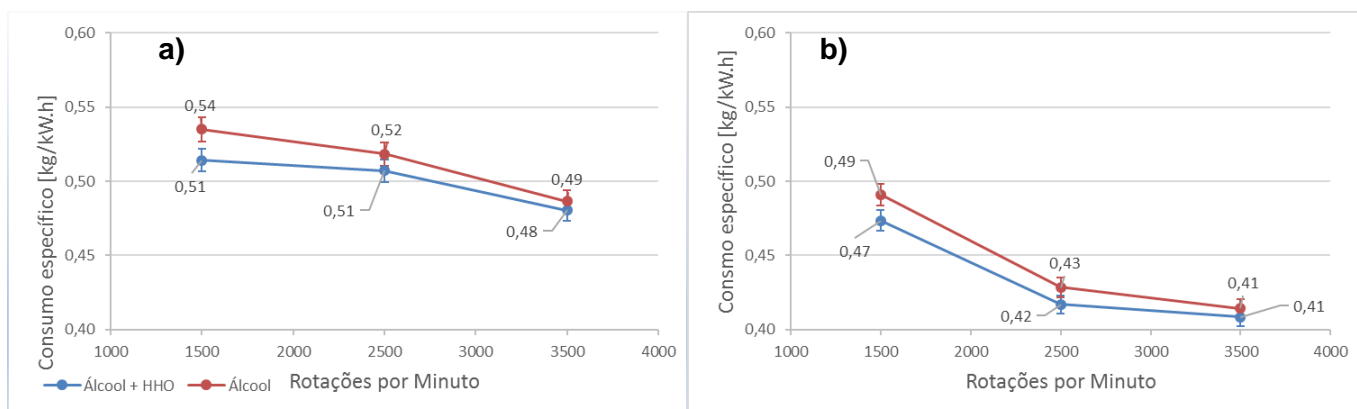


Figura 6.3 –Valores obtidos de consumo específico [kg/kW.h] em relação à rotação em a) máxima aceleração e b) média aceleração

Relação Ar/Combustível: A relação ar/combustível são expressos de acordo com o valor do fator lambda [λ] lido e são apresentados na Figura 6.4, com incerteza de $\pm 0,01$.

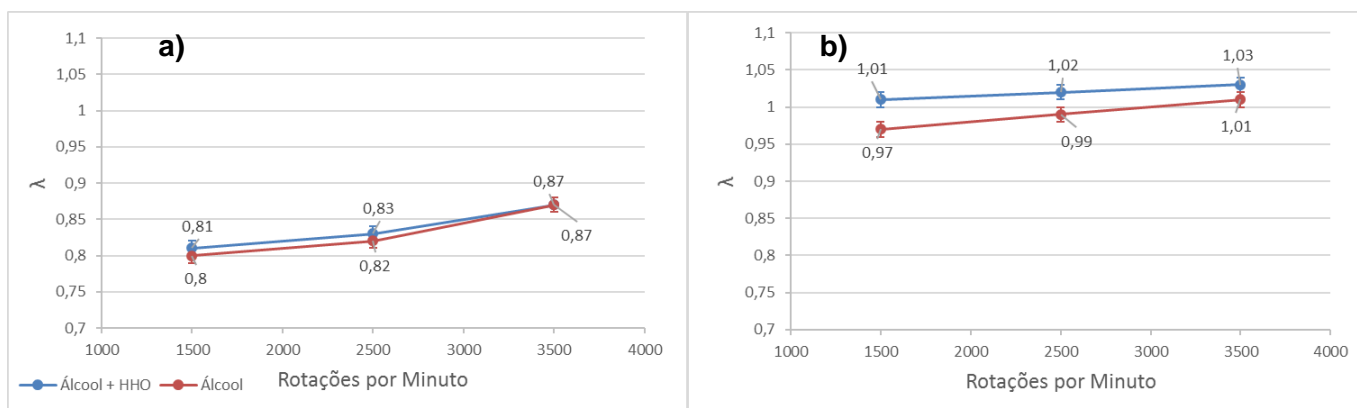


Figura 6.4 –Valores obtidos de fator lambda [λ] em relação à rotação em a) máxima aceleração e b) média aceleração

Monóxido de Carbono: A concentração de monóxido de carbono, CO, na exaustão, expressos em porcentagem são apresentados na Figura 6.5 com incerteza de $\pm 0,06$.

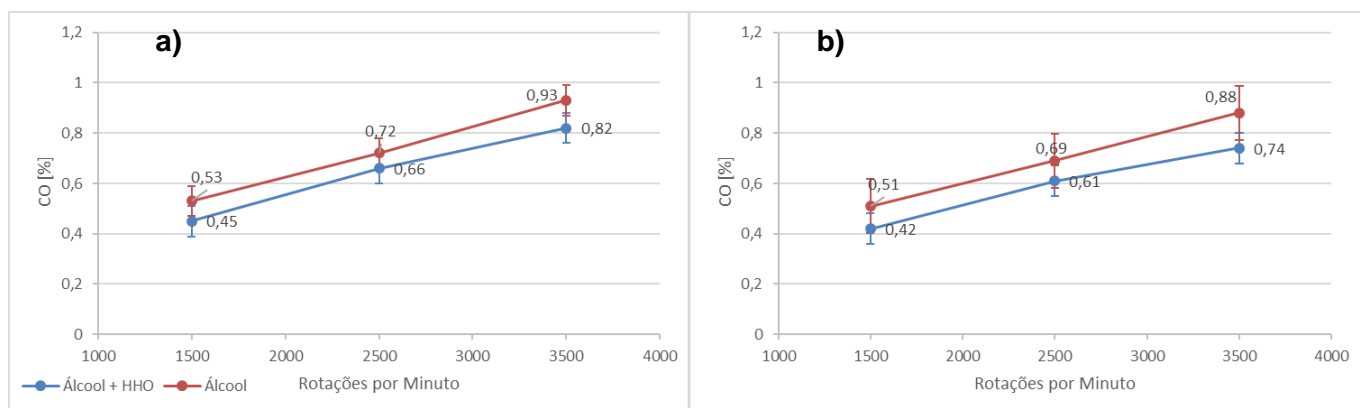


Figura 6.5 –Valores obtidos do percentual de Monóxido de Carbono em relação à rotação em a) Máxima Aceleração e b) Média Aceleração

Dióxido de Carbono: A concentração de dióxido de carbono, CO₂, na exaustão, expressos em porcentagem são apresentados na Figura 6.6 com incerteza de $\pm 0,6$.

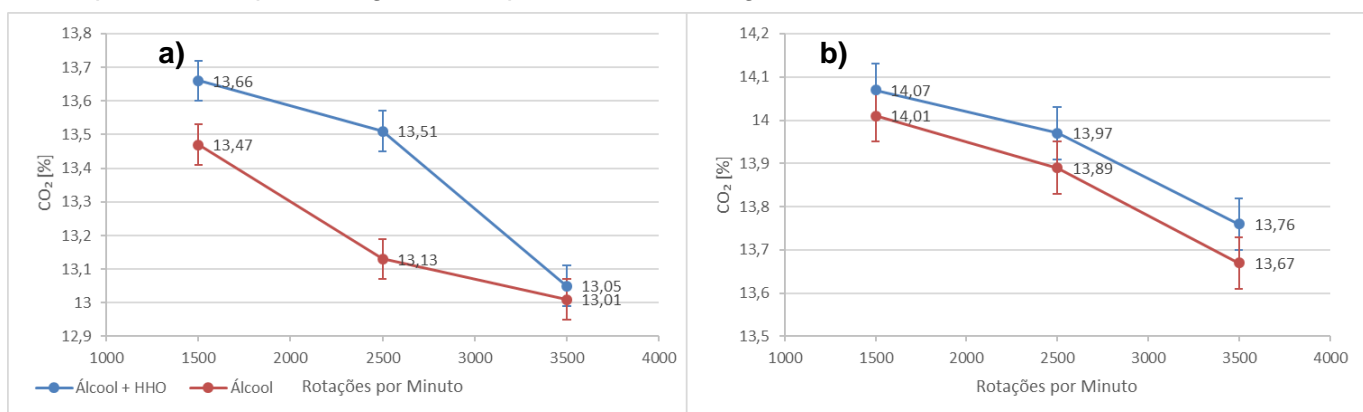


Figura 6.6 –Valores obtidos do percentual de dióxido de carbono em relação à rotação em a) máxima aceleração e b) média aceleração

Hidrocarbonetos: Os valores de hidrocarbonetos não queimados, HC, na exaustão, expressos em partes por milhão são apresentados na Figura 6.7 com incerteza de $\pm 3,5$ ppm.

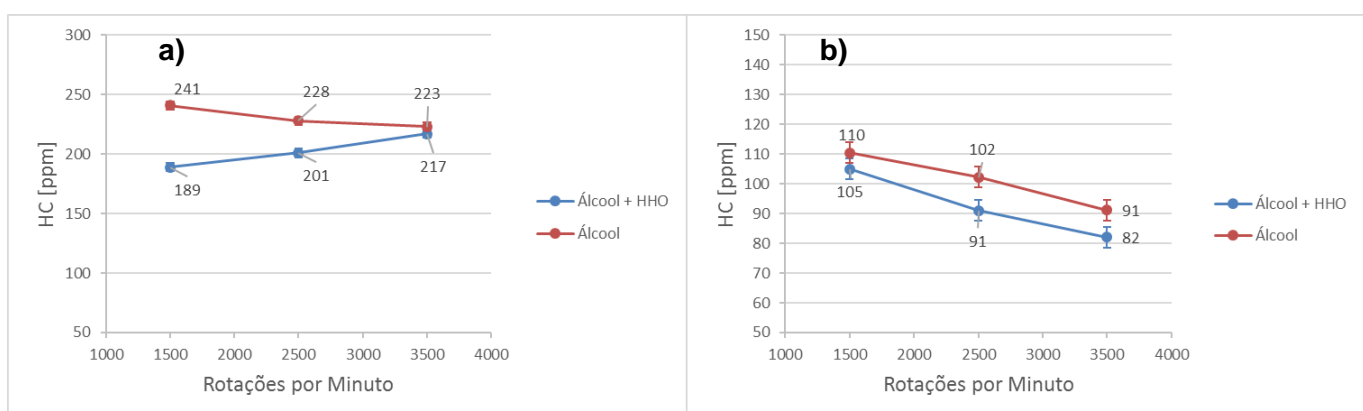


Figura 6.7 –Valores obtidos de HC, em partes por milhão, em relação à rotação em a) máxima aceleração e b) média aceleração

7. COMPARAÇÕES

Potência e consumo específico de combustível: A presença do gás hidrogênio enriquecido com oxigênio na mistura admitida causou uma melhora na eficiência do motor, atribuída a alterações na forma como a combustão se dá no cilindro. A alta velocidade de queima do hidrogênio propicia a turbulência e uma melhor queima do combustível disponível. Analisando os resultados obtidos pôde-se observar que houveram:

- Um aumento de, em média, 2% na potência líquida efetiva.
- Uma redução, em média, de 2,5% de consumo específico de combustível.

Emissão de Poluentes: Apesar dos resultados pouco expressivos em termos de potência com a inclusão do gás na mistura, analisando a emissão de poluentes pôde-se observar resultados indicando que a inserção do gás hidrogênio realmente propicia uma melhor queima da mistura devido à alteração da cinética da combustão dentro do cilindro, pois observa-se os seguintes resultados dos produtos originados da combustão:

- Uma redução de, em média, 15% de emissão de monóxido de carbono
- Uma redução de, em média, 11,5% de emissão de hidrocarbonetos, HC.

O aumento do fator lambda era esperado e se deve à inserção de mais oxigênio dentro do cilindro, fator este que também propicia uma queima mais completa do combustível disponível na câmara de combustão.

Em termos de aumento real de eficiência convém ressaltar que a energia utilizada para produção do gás não foi incluída na análise de potência e consumo. Apesar disto, devido aos resultados encontrados terem sido pouco expressivos, torna-se crítica esta análise pois utilizar o alternador para produzir a energia utilizada reduziria ainda mais o aumento real de potência líquida efetiva disponível, possivelmente inviabilizando a utilização deste aparelho no motor em estudo.

Resultados mais significativos neste trabalho poderiam ser obtidos caso fosse utilizado um sistema de injeção de combustível eletrônico que alterasse a relação de mistura de ar e combustível ativamente, ao contrário do que ocorre em um motor com carburador.

8. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta um estudo experimental em um motor Volkswagen AP 1.6, sendo alimentado com álcool etílico hidratado combustível e analisando comparativamente as mudanças de desempenho com a adição de gás hidrogênio enriquecido com oxigênio na mistura, sem alterações no motor.

Os resultados obtidos estão em concordância com a literatura investigada, porém foram pouco expressivos. Foi observada uma sutil melhora no desempenho geral do Motor e consequente diminuição da emissão de poluentes, o que indica o fato de que mesmo em poucas quantidades, a presença do gás hidrogênio enriquecido com oxigênio contribui para uma melhora na eficiência dos motores.

A partir do presente trabalho, pôde-se dizer que:

- Houve um aumento médio de 2% na potência líquida efetiva e uma redução de 2,5% do consumo específico de combustível.
- A emissão de poluentes sofreu redução de 15% em termos de monóxido de carbono, 11,5% em termos de hidrocarbonetos.
- O desempenho do motor é melhorado em todos os aspectos avaliados, sem contrapartida.

Além disto, corrobora-se a afirmação que aparelhos geradores de HHO podem ser facilmente incorporados à veículos em funcionamento, sem modificações na configuração do mesmo.

De acordo com as premissas propostas no trabalho, pode-se dizer que os objetivos foram atingidos. As dificuldades relacionadas à atividade de ensaios experimentais em laboratório foram de extrema importância para a consolidação dos conhecimentos obtidos ao longo do curso.

Devido a melhora pouco expressiva no desempenho do motor, não é possível sugerir que o aparelho trará benefícios práticos, portanto não se recomenda a instalação deste aparelho em um veículo que utiliza este motor.

Para trabalhos futuros, sugere-se que seja feito a avaliação em um motor mais moderno, com injeção eletrônica. Análises mais amplas relacionadas ao Aparelho de Eletrólise de modo a aumentar a eficiência destes aparelhos são necessárias, inclusive analisando a redução de potência efetiva líquida ao utilizar o alternador de um veículo comum para fornecimento da energia necessária para produção do gás.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 1585: “**Veículos Rodoviários – Código de Ensaio de Motores – Potência Líquida Efetiva**”, Rio de Janeiro, 1996.

EL-KASSABY, M. M., ELDRAINY, Y. A., KHIDR, M. E., & KHIDR, K. I.. “**Effect of hydroxy (HHO) gas addition on gasoline engine performance and emissions.**” Alexandria Engineering Journal, v. 55, n. 1, p. 243-251, 2016.

GIACOSA, Dante “**Motores endotérmicos**”, Barcelona, Científica Médica, 3ª Edición. 1986.

HEYWOOD, John B. **Internal combustion engine fundamentals**. New York: Mcgraw-hill, 1988.

HILL, J., NELSON, E., TILMAN, D., POLASKY, S., & TIFFANY, D. “**Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels**”. Proceedings of the National Academy of sciences, v. 103, n. 30, p. 11206-11210, 2006.

HÖÖK, Mikael; TANG, Xu. “**Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change—A review**”, Energy Policy, v. 52, p. 797-809, 2013.

KLINE, Stephen J.; MCCLINTOCK, F. A. “**Describing uncertainties in single-sample experiments.**” Mechanical engineering, v. 75, n. 1, p. 3-8, 1953.

KOHLHEPP, Gerd. “**Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil.**” Estudos avançados, v. 24, n. 68, p. 223-253, 2010.

LIMA, Thaís Damasceno de. **Desafios tecnológicos na exploração de petróleo em águas profundas: o sistema PETROBRAS de inovação**. 2015. 89 f. Dissertação de mestrado em Economia - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2015.

SARDELLA, Antônio. Curso completo de química. **Vol. único. São Paulo: Ática**, 1999.

SHARMA, Sunita; GHOSHAL, Sib Krishna. “**Hydrogen the future transportation fuel: from production to applications.**” Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 43, p. 1151-1158, 2015.

SINGH, S., JAIN, S., Venkateswaran, P. S., TIWARI, A. K., NOUNI, M. R., PANDEY, J. K., & GOEL, S., “**Hydrogen: A sustainable fuel for future of the transport sector.**” Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 51, p. 623-633, 2015.

MOIN, Shaik. “Petrol Engine”, www.shaikmoin.wordpress.com/page/6/, acessado em 05/09/2016.

TAYLOR, Alex MKP. "**Science review of internal combustion engines.**" Energy Policy, v. 36, n. 12, p. 4657-4667, 2008.

U.S. Energy Information Administration, "**Energy use for Transportation**", www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=us_energy_transportation, acessado em 05/05/2016.

WOLLMANN, Fábio Leandro. "**Estudo da utilização de gás hidrogênio em veículos automotores.**" Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica na Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí, RS, 2013.

APÊNDICE A - Análise de Incertezas

Devido à natureza experimental do trabalho realizado, toma-se como necessária a análise de incertezas de medição de cada medição. Para este estudo a análise da propagação destas incertezas, quando realizados cálculos referentes aos valores obtidos, foi feita de acordo com os dados fornecidos de cada equipamento e aplicadas de acordo com o amplamente utilizado método de Kline e McClintock, 1953, que utiliza a equação A.1 como base de cálculo para encontrar as faixas de valores de incerteza quando são realizados cálculos com medidas experimentais.

$$iR = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} i_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} i_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} i_n\right)^2} \quad (\text{A.1})$$

em que iR é a incerteza de medição da variável de interesse R , i é a incerteza de medição para as variáveis independentes x .

A partir das incertezas obtidas nos manuais de cada aparelho, ou em literaturas revistas, pôde-se realizar os cálculos que asseguram a assertividade dos resultados.

A medição da potência líquida efetiva tem a incerteza dada pelas derivadas parciais da equação 4.4.2 em função das variáveis τ e ω , conforme equação A2.

$$iP = \sqrt{(\tau i\omega)^2 + (\omega i\tau)^2} \quad (\text{A.2})$$

em que iP é a incerteza de medição da potência líquida efetiva em kW, $i\omega$ é a incerteza de medição da rotação em rad/s, $i\tau$ é a incerteza de medição do torque em N.m.

A incerteza de medição do consumo específico de combustível é dada pelas derivadas parciais da equação 4.5.1 em função das variáveis P e \dot{m} , conforme equação A.3.

$$iCe = \sqrt{\left(\frac{3,6}{P} \times i\dot{m}\right)^2 + \left(\frac{3,6 \times \dot{m}}{P^2} \times iP\right)^2} \quad (\text{A.3})$$

sendo iCe a incerteza de medição do consumo específico de combustível em kg/kW.h, P a potência medida em kW, iP a incerteza de medição da potência em kW, \dot{m} o fluxo mássico em g/s e $i\dot{m}$ a incerteza de medição do fluxo mássico em g/s.