

# ANÁLISE DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE HIDROGÊNIO EM MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA

Thiago Renato Barretiri<sup>1</sup>

Tiago Luis Haus<sup>2</sup>

## RESUMO

Uma das grandes preocupações atuais da humanidade são os problemas causados pelo efeito estufa, que, ao longo do tempo, afeta de maneira irreparável o Planeta. Um dos principais causadores deste fenômeno é a queima de combustíveis fósseis, mas estes não durarão para sempre, por se tratar de fontes de energias não renováveis. Estudiosos do mundo inteiro estão em uma busca constante por fontes de energia ecologicamente corretas que possam substituir estes combustíveis ou pelo menos diminuir ao máximo seu consumo, evitando, assim, grandes danos ao nosso planeta. Um dos elementos renováveis e com grande potencial energético encontrado em abundância em nosso planeta – e que está sendo considerado o combustível do futuro – é o hidrogênio. Pode-se obter hidrogênio pelo processo de eletrólise da água. Esta pesquisa tem como objetivo verificar a viabilidade da aplicação do hidrogênio produzido pela eletrólise diretamente ao sistema de carburação original de motores a combustão interna. O método utilizado para levantamento de dados foram testes práticos utilizando protótipos. Além da obtenção de resultados favoráveis sobre a viabilidade de aplicação, verificaram-se também aumentos de rotação e reduções de consumo de combustíveis fósseis.

**Palavras-chave:** Hidrogênio. Célula de Hidrogênio. Combustível Renovável. Motores a Combustão.

<sup>1</sup> Aluno do 5º ano de Engenharia Mecânica. Bolsista do Programa de Apoio à Iniciação Científica da Fundação Araucária. *E-mail:* thiagobarretiri@hotmail.com.

<sup>2</sup> Mestre em Engenharia Ambiental (UFPR). Professor da FAE Centro Universitário. *E-mail:* tiago.haus@fae.edu.

## INTRODUÇÃO

Um dos elementos mais abundantes e com grande potencial para substituir os combustíveis fósseis em nosso planeta é o hidrogênio. Ele é comumente encontrado no ar e na água. Seu poder calorífico é ainda maior que o de outros combustíveis utilizados atualmente, a exemplo da gasolina e do metanol (PADILHA, 2006).

É possível obter hidrogênio utilizando um equipamento conhecido como célula eletrolítica, que tem como princípio o processo de eletrólise da água, separando suas moléculas em seus elementos estruturais e formando uma mistura gasosa de hidrogênio e oxigênio, conhecida popularmente como gás HHO (YILMAZ, 2010).

Encontram-se frequentemente novas pesquisas e aplicações para o elemento hidrogênio. Uma das aplicações cada dia mais comum é em motores a combustão interna. Fábricas do setor automobilístico investem bastante em pesquisas para lançar no mercado, de forma competitiva, seus exemplares de veículos ecologicamente corretos.

Problemas ambientais decorrentes da queima de combustíveis fósseis são muito comuns em nosso planeta, e grande parte desta queima é causada por motores a combustão interna. Para que estes problemas não tendam a aumentar no decorrer dos anos, uma alternativa é diminuir, ou até mesmo extinguir, a utilização destes combustíveis. É possível fazer isto utilizando o hidrogênio produzido por uma célula de hidrogênio como combustível substituto no processo de combustão (SMUTZER, 2006).

Outro problema diretamente ligado ao consumo excessivo de combustível em motores a combustão interna ocorre em altas altitudes, onde a pressão atmosférica é menor, ou seja, com uma menor concentração de oxigênio, tornando a mistura entre combustível e comburente mais rica. Esta mistura rica, causada pela falta de material comburente (oxigênio), ou pelo excesso do material combustível, causa uma queda no rendimento dos motores e um aumento na emissão de gases tóxicos, caso o combustível utilizado na combustão seja de fontes fósseis (MARTINELLI JUNIOR, 2008). Sabendo que o processo de eletrólise gera, além do hidrogênio, uma quantidade de oxigênio, o uso de células de hidrogênio nesta situação pode colaborar tanto com o fornecimento de um elemento combustível quanto com o oxigênio como material comburente, tornando a mistura mais próxima das condições ideais.

Pretende-se, com este projeto, estudar a viabilidade da utilização de uma célula de hidrogênio em um motor de pequeno porte, empregando seu sistema original de carburação, e verificar possíveis melhoras para os dois problemas apresentados acima.

## 1 O HIDROGÊNIO

O hidrogênio, que vem das palavras gregas *hidro* e *genes* (“gerador de água”), é um gás inflamável, inodoro, insípido e incolor. É o elemento mais simples em relação à estruturação atômica, com apenas um próton e um elétron, e seu símbolo é “H”. Na tabela periódica de Mendeleiev, encontra-se na família 1A, pois possui apenas um elétron. É o nono elemento em abundância em nosso planeta, e no universo é o primeiro, estimando-se presente em 75% da massa de toda matéria (SANTOS; SANTOS, 2005).

Em nosso planeta, não existe o hidrogênio em seu estado livre, apenas associado a outros elementos. Para obtê-lo em seu estado puro, é preciso gastar energia na dissociação de uma fonte primária. Estas fontes de energia primária podem ser, por exemplo, a energia elétrica gerada por usinas hidrelétricas. Para escolher o melhor método de obtenção do hidrogênio, é preciso analisar a quantidade que se pretende produzir e o grau de pureza em que ele é necessário (SANTOS JUNIOR, 2004).

A preparação do hidrogênio ocorreu pela primeira vez pela reação de ácidos e metais. O responsável por este experimento foi Paracelsus, um alquimista suíço do século XVI. No entanto, nesta época, ignorava-se que o “ar explosivo” produzido pela reação química fosse o hidrogênio. Somente no ano de 1766 um químico inglês chamado Henry Cavendish reconheceu este gás como uma substância química individualizada. Mais tarde, Antoine Lavoisier explicou os resultados de Cavendish e deu ao gás o nome de “hidrogênio” (SILVA, 2001).

O hidrogênio é o combustível ideal do ponto de vista ecológico. Ele pode ser retirado da água utilizando-se fontes de energia renováveis, por exemplo, nuclear, geotérmica, solar, eólica, elétrica, entre outras. Possui a mais alta energia por unidade de peso se comparado a outros combustíveis, pois não possui os pesados átomos de carbono contidos nos outros combustíveis de utilização comum, tornando-se assim o mais leve (BROWN, 2005). O processo de combustão do hidrogênio não gera nenhum tipo de gás prejudicial ao meio ambiente e também nenhum resíduo, após sua combustão, o único elemento gerado é a água pura (SIMON, 2007).

Uma das grandes preocupações em relação à utilização do hidrogênio é sobre o seu armazenamento e transporte. Por se tratar de um gás extremamente explosivo e por ser transportado em tanques de alta pressão, deve-se ter um grande cuidado com vazamentos e colisões. Por isso uma das formas mais seguras de utilização do hidrogênio é pelo seu consumo direto, sem armazenamentos (MEYER, 1996).

Atualmente, o hidrogênio é utilizado em diversas aplicações, a exemplo de: sistemas de aquecimento, equipamentos de solda, automóveis, naves espaciais, bombas etc. A tendência é que seu consumo seja cada vez maior com o passar dos anos e com o avanço da tecnologia.

## 2 ELETRÓLISE DA ÁGUA

A eletrólise da água é um dos métodos utilizados para obter o gás hidrogênio. É o processo pelo qual se aplica uma corrente elétrica em eletrodos metálicos, geralmente em aço inox ou platina, submersos em uma solução aquosa contendo substâncias eletrolíticas, que têm a função de aumentar a condutividade elétrica da água, causando a separação de suas moléculas em seus elementos estruturais. O nome dado aos equipamentos construídos para produção de hidrogênio pelo processo de eletrólise é “células eletrolíticas” (LONGO, 2008).

Células eletrolíticas, ou célula de hidrogênio, como chamada por alguns autores, são equipamentos com funcionamento baseado no processo de eletrólise da água, que têm como objetivo gerar uma mistura gasosa conhecida como gás HHO. Esta mistura gasosa nada mais é do que a mistura de hidrogênio e oxigênio produzida pela separação das moléculas de água (YILMAZ, 2010). O objetivo principal de uma célula de hidrogênio é produzir de modo mais eficiente a quantidade de gás HHO desejada utilizando a menor quantidade de eletricidade possível.

Um dos modelos de célula eletrolítica mais utilizado atualmente é conhecido como *Dry Cell*, ou célula seca. Este nome é dado, pois as placas em aço inox utilizadas para promover a reação eletroquímica não ficam totalmente submersas na solução aquosa. O fluxo da solução é limitado apenas por entre as placas, pelo uso de anéis de vedação. Neste tipo de modelo, é possível utilizar diferentes configurações e quantidades de placas, dependendo da produção de gás HHO que se pretende obter (ver mais em <http://www.hho4free.com/>). As placas são geralmente produzidas em aço inox para evitar ao máximo o desgaste causado pela corrosão gerada pela reação eletrolítica. As partes externas das células de modelo *Dry Cell* devem ser sempre constituídas de um material isolante, para que os parafusos pelos quais é fornecida a corrente elétrica não entrem em curto. Em alguns *sites* especializados é possível encontrar *softwares* que fornecem a produção de gás HHO que será obtida por uma célula de hidrogênio, baseando-se na voltagem e na quantidade e dimensões das placas que serão utilizadas (YILMAZ, 2010).

## 3 MOTORES

Motores são máquinas que têm como objetivo converter qualquer tipo de energia (elétrica, térmica, hidráulica etc.) em energia mecânica. Estes motores podem ser divididos em dois grupos: os motores a combustão interna e motores a combustão externa (RAHDE, 1997).

Nos motores, a combustão interna ocorre a transformação da energia térmica, proveniente da queima de combustíveis, em energia mecânica diretamente utilizável, ou seja, o próprio combustível é o responsável pela movimentação das peças (MARTINELLI JUNIOR, 2008). Depois que a mistura entre combustível e ar é comprimida na câmara de combustão do cilindro, inicia-se uma queima que força a parte superior do pistão (cabeça do pistão). Esta força faz com que o pistão se desloque em direção ao eixo de manivela (virabrequim). O componente responsável pela transmissão da força gerada na cabeça do pistão para o colo do virabrequim é a biela, que serve como ligação entre as duas peças. Este tipo de motor é o mais utilizado e pode ser empregado em diferentes situações (OLIVEIRA JUNIOR, 1997). A mais comum é nos veículos de transporte baseados no ciclo Otto de funcionamento.

Motores ciclo Otto são a combustão interna e a mistura entre comburente e combustível se inflama por uma centelha elétrica, causando a queima da mistura dentro da câmara de combustão e conseqüentemente a expansão dos gases. Os motores ciclo Otto possuem seu processo de combustão dividido em quatro tempos (WICKERT, 2011):

**1º Admissão:** à medida que o pistão se move do PMS (ponto morto superior) para o PMI (ponto morto inferior), a válvula de admissão se abre, e a mistura de ar e combustível vaporizada é aspirada para o interior do cilindro, fazendo com que o virabrequim efetue meia-volta.

**2º Compressão:** após o término do primeiro tempo, a válvula de admissão fecha-se. À medida que o pistão se desloca para o PMS, comprime a mistura de combustível e ar, fazendo com que o virabrequim gire outra meia-volta, efetuando, assim, a primeira volta completa.

**3º Combustão:** momentos antes de o pistão chegar ao PMS, o sistema de ignição transmite uma corrente elétrica para a vela, fazendo percorrer uma centelha entre os eletrodos desta, que inflama a mistura comprimida. Os gases de expansão, resultantes da combustão, empurram o pistão do ponto máximo superior para o ponto mínimo inferior, fazendo com que o virabrequim efetue outra meia-volta.

**4º Exaustão:** processo pelo qual os gases produzidos pela combustão são eliminados da câmara de combustão. A válvula de exaustão se abre e o movimento do pistão do PMI para o PMS expelle os gases.

Motores baseados no ciclo Otto podem apresentar diferentes resultados de potência torque e rendimento, dependendo da sua estruturação, como, por exemplo, o diâmetro dos pistões, o combustível utilizado o tamanho da biela, entre outros fatores.

Potência é a medida do trabalho realizado em um período de tempo. A potência de um motor pode ser expressa por diferentes unidades. Uma delas é o “cv” ou “cavalo-vapor”.

Trata-se de uma medição da norma DIN (*Deutsche Industrie Normen*), ou normas industriais alemãs. Por definição, um cv é a potência desenvolvida ao realizar contínua e uniformemente um trabalho decorrente da aplicação de uma força necessária para elevar um peso de 75 kg a um metro de altura em um intervalo de tempo de um segundo (RAHDE, 1997). Uma das fórmulas que podem ser utilizada para cálculo da potência é:

$$P = \frac{\text{força} \times \text{deslocamento}}{\text{tempo}}$$

Ao se tratar de motores a combustão interna, o torque pode ser entendido como o momento criado pela biela, devido à força de expansão dos gases atuando na cabeça do pistão, atuando sobre o virabrequim. Por isso o tamanho do pistão e o poder de combustão do combustível utilizado influenciam no torque de um motor. A unidade de torque definida pelo sistema internacional de medidas é o Newton metro (N m). O torque do motor pode ser calculado pela seguinte fórmula (MAHLE, 2012):

$$T = \frac{P \times K}{RPM}$$

Geralmente, fabricantes de motores fornecem tanto a tabela com descrições técnicas do motor quanto sua curva de desempenho em diferentes rotações, relacionadas com o torque gerado, facilitando dimensionamentos e cálculos.

## 4 PROBLEMAS NA COMBUSTÃO EM ALTAS ALTITUDES

Em grandes altitudes existe um problema muito comum em motores a combustão interna, que é a diminuição no rendimento causada pela falta de material comburente (oxigênio) devido à pressão atmosférica. Essa falta de oxigênio causa a “queima rica”, na qual a combustão não é adequada, gerando uma grande quantidade de gases poluentes e diminuindo de forma drástica a eficiência dos motores.

Combustão é a reação exotérmica de oxidação de um combustível com um elemento comburente. Essa reação é chamada de estequiométrica quando a quantidade de oxigênio é suficiente para oxidar totalmente o combustível (VLASSOV, 2008).

Para detectar o desvio da mistura ar e combustível em relação ao valor estequiométrico, utiliza-se o coeficiente de ar lambda ( $\lambda$ ), como sendo uma relação da mistura aplicada no sistema, e a mistura estequiométrica.

A mistura estequiométrica para haver combustão completa em um motor a gasolina é de 14,9:1, ou seja, 14,9 quilos de ar para cada 1 quilos de gasolina. Se o resultado da divisão for um valor menor do que 1, significa que a mistura está rica, ou seja, existe uma falta de material comburente (ar). Por outro lado, se o valor de lambda for maior do que 1, significa que a mistura está pobre devido ao excesso de ar. Um dos componentes responsáveis pelo controle estequiométrico de um motor é o carburador, que permite regular a entrada de combustível e comburente na câmara de combustão buscando a mistura ideal (MILHOR, 2002).

Em uma combustão incompleta, fora da proporção estequiométrica, não existe uma mistura correta entre material comburente e combustível. Uma das causas pode ser a falta de oxigênio fornecida na mistura. Nestas condições, o reagente irá queimar juntamente com o oxigênio, mas de uma forma incompleta, produzindo inúmeros produtos tóxicos.

Quando um hidrocarboneto queima em oxigênio, a reação gera dióxido de carbono, monóxido de carbono, água e vários outros compostos, como óxidos de nitrogênio, dependendo da composição do combustível. Também há liberação de átomos de carbono, sob a forma de fuligem. A combustão incompleta é muito mais comum que a completa e produz um grande número de subprodutos (RAHDE, 1997). No caso de queima de combustível em motores a combustão interna, esses subprodutos podem ser muito prejudiciais à saúde, ao meio ambiente e ao próprio motor. A combustão do hidrogênio puro não produz nenhum tipo de gás poluente, por isso seu uso pode ser tão vantajoso.

## 5 CARBURADOR

Carburador é um dispositivo que, a partir de um combustível e do ar atmosférico, prepara e fornece para todos os regimes de trabalho do motor uma mistura de fácil queima.

A carburação é um processo na mistura ar e combustível, que tem início no carburador e termina no interior da câmara de combustão do motor. Este processo pode sofrer influências de diversos fatores, entre eles a pressão atmosférica, o combustível, o comando de válvulas, a regulação do carburador (MARTINELY JUNIOR, 2008).

A função principal de um carburador é fornecer ao motor a mistura de ar com combustível finamente pulverizada em proporção exata, de modo que se possa obter a mais perfeita combustão possível. Essa função principal pode ser dividida em quatro subfunções distintas: dosar a quantidade de combustível; dosar a quantidade de ar aspirado; misturar o combustível com o ar em proporção exata; e pulverizar a mistura ar e combustível.

Dosar a quantidade exata de combustível e ar é de suma importância para o sistema, pois, sem isso, a combustão se torna imperfeita, conforme citado anteriormente. Esta combustão imperfeita acaba gerando baixo rendimento, alto consumo e níveis descontrolados de poluentes, como HC (hidrocarbonetos), CO (monóxido de carbono) e NOX (óxidos de nitrogênio) (LIMA, 2009). A maioria dos carburadores utilizados em motores a combustão interna possui sistemas de regulagem e controle de mistura fornecida para o processo de combustão.

## 6 HHO EM MOTORES A COMBUSTÃO

Apesar de ainda pouco comentada no Brasil, a utilização de gás HHO já é uma prática muito utilizada em vários países, não só em motores a combustão interna como também em equipamentos para soldas, sistemas de aquecimento e fusão de materiais. Nos países europeus, é comum encontrar carros utilizando células de hidrogênio acopladas em seus veículos de forma simples, com pouquíssimas modificações na estrutura original (SIMON, 2007).

Tal simplicidade de instalação ocorre com a utilização deste sistema de produção. Não é necessário um tanque de armazenamento para o gás, pois toda a mistura produzida pela célula é injetada diretamente no carburador dos motores, fazendo com que a queima ocorrida nas câmaras de combustão seja uma mistura entre o ar, o combustível de consumo original do veículo e o gás HHO produzido pela célula de hidrogênio, que é alimentada pela própria bateria do carro, gerando, assim, a eletrólise. Outra vantagem na utilização deste método de produção contínua é a baixa taxa de acidentes graves devido ao não armazenamento do hidrogênio em reservatórios de gás comprimido (SEQUEIRA, 2009).

A primeira patente apresentada referente à utilização de uma célula geradora de hidro-oxigênio com aplicação em motores a combustão interna foi em 1918, apresentada por Charles Frazer. O gerador de hidro-oxigênio, criado por Charles Frazer, tinha como objetivo particular o aumento da eficiência de motores a combustão interna, em que uma quantidade adicional de oxigênio é fornecida, causando, assim, uma queima completa dos hidrocarbonetos. E, ainda, com a utilização da sua célula geradora, o carbono pesado depositado sobre o cilindro e as suas partes cooperantes também era eliminado, pois o carbono proveniente da combustão interna poderia ser completamente queimado pelo uso de um fornecimento adicional de oxigênio (FRAZER, 1918).

Outro fato importante na história da aplicação das células de hidrogênio em motores a combustão foi o estudo realizado pela Nasa em 1977, comandado pelo

cientista John Cassidy, baseado no estudo de emissões e energia total produzida por um motor de multipistões cilíndricos, movido a gasolina e uma mistura de hidrogênio/gasolina, que também demonstrou resultados satisfatórios a respeito da utilização de hidrogênio na combustão (CASSIDY, 1977).

Stanley Meyer, um inventor da cidade de Ohio, apresentou ao mundo nos anos 1990 um carro que se dizia mover somente com a água como combustível. Utilizando-se dos conceitos da eletrólise da água, Meyer projetou um sistema no qual a mistura de gases gerados por uma célula eletrolítica, ou *Water Fuel Cell*, como chamada pelo próprio inventor, era injetada e consumida diretamente pelo sistema de carburação do motor (MEYER, 1992). Seu projeto não utilizava tanques de armazenamento de combustível, apenas o reservatório para a água. Os excessos de gás HHO produzidos pela célula eletrolítica eram lançados diretamente para a atmosfera. Para dosar corretamente a quantidade da mistura a ser lançada da câmara de combustão, o inventor utilizou dispositivos eletrônicos e válvulas de controle. Meyer apresentou várias patentes sobre o assunto e sua aplicação.

Estudos realizados em diversas partes do Planeta demonstram resultados favoráveis em relação à aplicação do gás HHO em motores a combustão interna. Utilizando-se do método de produção e fornecimento direto do gás HHO no sistema de carburação original de motores, juntamente com o combustível de consumo original do motor, ocorre uma queda no consumo de combustível fóssil, desde que se mantenha a mesma rotação em ambos os casos de funcionamento (BARI, 2009).

Ao aplicar o gás HHO juntamente com o combustível de consumo original de um motor, ocorre um aumento na rotação causada pela combustão do hidrogênio oferecido ao sistema e pela maior concentração de oxigênio, que proporciona uma melhor queima dos combustíveis (SILVEIRA, 2012).

Devido à essa redução do consumo, conseqüentemente, obtém-se também uma redução na produção de gases poluentes provenientes da queima na câmara de combustão. Essa diminuição ocorre tanto pela aplicação do hidrogênio, que após sua queima produz apenas água como resultado, como pelo aumento na concentração de oxigênio fornecido pela célula, que tem como consequência deixar a mistura mais rica e mais próxima das condições estequiométrica (YILMAZ, 2010).

Outro fato apresentado como consequência da aplicação deste gás em motores a combustão interna, é o aumento no torque produzido pelo motor (ANDERSON, 1998). Esse aumento ocorre porque o poder de propagação de chama do hidrogênio é maior que o da gasolina, portanto, ao injetar o hidrogênio na câmara de combustão e este for incendiada pela ação de centelha temos uma queima mais rápida, com uma perda menor de calor para o sistema e com isso um maior torque fornecido ao virabrequim (CASSIDY, 1977).

## 7 METODOLOGIA

A partir do momento em que a célula de hidrogênio confeccionado na primeira parte do projeto foi finalizada, deu-se início ao projeto e à montagem da estrutura para realização dos testes. Iniciam-se os estudos pela elaboração de um desenho em CAD para verificação dos materiais que seriam utilizados e os seus melhores posicionamentos na estrutura. O *software* utilizado foi o *Solid Works*.

Em seguida, iniciou-se o processo de montagem do protótipo. Este sofreu algumas modificações do projeto original em CAD, pois se optou pela reutilização de materiais já existentes no mercado para facilitar o processo de montagem, diminuindo os custos.

Foram realizados testes básicos para verificação do posicionamento escolhido para os componentes. Estes testes básicos tiveram como foco verificar se as peças estavam bem fixas, se o fluxo de água por entre as placas da célula estava ocorrendo normalmente e se as partes elétricas estavam bem isoladas.

O método utilizado para controlar a rotação do motor, tanto em condições normais de funcionamento quanto após aplicação do HHO, foi pela utilização de um tacômetro e do parafuso de controle de fornecimento de combustível para funcionamento em lenta, situado no carburador. Ao apertar este parafuso, pode-se diminuir novamente a rotação causada pela aplicação do gás HHO na mistura.

Manter a mesma rotação nas duas configurações de funcionamento é extremamente importante para poder identificar a economia de combustível alcançada com a utilização da célula eletrolítica no motor.

Já para as simulações de queima pobre foi utilizado tanto o parafuso demonstrado acima quanto o parafuso regulador de entrada de ar. Desta forma, foi possível tornar a mistura fornecida à câmara de combustão mais pobre, da mesma forma que ocorrido em alta altitude.

Pelo fato de não empregar equipamentos de grande precisão nos testes realizados, o modo utilizado para chegar a resultados notáveis foi manter o motor funcionando por longos períodos para cada teste, só assim se tornou possível identificar diferenças significantes de consumo.

O fornecimento de carga para a célula foi realizado por uma bateria de 12 volts utilizada normalmente em automóveis. Sua carga foi mantida constante por um carregador. A ligação da célula foi feita de modo simples, cabos diretos à bateria, que podiam ser ligados e desligados manualmente quando desejado.

A injeção do gás HHO no carburador foi feita por uma entrada de ar utilizada para conexão da mangueira proveniente do respiro do motor. Essa entrada foi escolhida

por estar mais próxima do carburador e não passar pelo sistema de filtro, evitando ao máximo o desperdício do gás para o meio ambiente.

Como o motor utilizado não possui controladores de consumo de combustível e de rotação do motor, como os de automóveis, alguns equipamentos foram necessários para obter esses resultados. Para controlar o consumo de combustível, havia um copo dosador. Efetuou-se um furo na parte inferior do dosador para que o combustível fóssil pudesse escoar para o carburador. O controle de rotação foi feito por um tacômetro (modelo PET-2000DXR, do mesmo fabricante do motor). Este tacômetro pode ser utilizado de forma bem simples, pois sua medição é feita por impulsos elétricos enviados para vela geradora de centelha. Desta forma, pode-se obter a rotação do motor aproximando o tacômetro ao cabo alimentador da vela ou utilizando o prendedor na ponta do cabo do tacômetro envolvendo o cabo da vela.

## 7.1 TESTE 1: VERIFICAÇÃO DO MÉTODO DE REGULAGEM DO CARBURADOR

Primeiramente, para certificar-se de que os métodos de regulagem do carburador por meio do parafuso de regulagem de lenta e do parafuso de entrada de ar no carburador realmente trariam resultados, foi preciso realizar testes com diferentes regulagens. Essas regulagens foram feitas utilizando o motor em condições ambientes, mantendo sempre a mesma rotação (1.600 rpm) e apenas gasolina como combustível. Um fator importante sobre a realização destes testes é o combustível utilizado. Optou-se pela gasolina aditivada em todas as condições para evitar mudanças de consumo devido à octanagem do combustível.

A primeira medição foi feita com a regulagem do motor conforme especificado pelo fabricante, o qual informa que, para o motor chegar ao mais próximo da queima ideal, deve-se manter uma média de uma volta e meia a duas voltas na agulha de regulagem de lenta, a qual controla a entrada de ar e combustível, e fazer a regulagem da rotação por outro parafuso, que controla a borboleta de entrada de ar principal. A quantidade de combustível para estes testes foi de 60 mililitros de gasolina aditivada (conforme explicado anteriormente, a quantia é elevada para facilitar a visualização de resultados).

Na segunda medição, optou-se por efetuar mais duas voltas no parafuso regulador de lenta, totalizando quatro voltas, permitindo, assim, maior entrada de combustível na mistura. Consequentemente, notou-se que houve um aumento na rotação do motor; com isso, afrouxando o parafuso de entrada de ar, voltou-se a rotação novamente para os 1.600 rpm.

E, por último, realizou-se uma medição com sete voltas no parafuso de regulagem de lenta, sendo a pior situação possível antes de o parafuso soltar-se completamente, para ver qual seria o resultado, da mesma forma que nas outras medições, fizemos as regulagens cabíveis para manter sempre o motor em uma rotação média de 1.600 rpm.

A rotação indicada nos testes deve ser considerada uma média, pois, por se tratar de um motor de pequeno porte e com um método simples de funcionamento, possui uma grande variação de rotação, podendo chegar de 1.540 a 1.660 rpm. Para diminuir ao máximo as oscilações na rotação do motor, todos os testes foram efetuados com o motor aquecido, após um período de funcionamento de, pelo menos, cinco minutos. Se o motor apresentasse variações muito grandes no período de testes, regulagens rápidas eram efetuadas para voltar à rotação média especificada. Só após a finalização desta etapa de teste foi possível saber se realmente esta técnica podia ser usada para simular um local de alta altitude onde a queima é incompleta, igualmente como ocorrida em carburadores mal regulados, conforme utilizado em nossos testes.

## 7.2 TESTE 2: APLICAÇÃO DE GÁS HHO NA COMBUSTÃO

Considerando que todos os testes foram realizados na cidade de Curitiba, situada a uma altura de 945 metros em relação ao nível do mar (PERFIL DE CURITIBA, 2013), pode-se considerar que o motor já está exposto a uma condição de ar rarefeito, pois a quantidade de oxigênio na cidade difere da quantidade ao nível do mar, devido à ação da pressão atmosférica. Portanto, a segunda parte dos testes foi realizada considerando apenas a melhor condição encontrada na primeira fase do experimento (menor consumo de combustível). Assim, foi mantido o parafuso de regulagem do combustível em duas voltas e controlado o parafuso de entrada de ar até manter uma rotação média de 1.600 rpm. Após o motor se estabilizar nestas condições, foi injetada a mistura o gás HHO; com isso, notou-se o aumento na rotação do motor. Visando obter a queda de consumo de combustível fóssil, apertou-se mais o parafuso de regulagem de entrada de combustível, impossibilitando ainda mais a entrada de gasolina na câmara de combustão, até chegar novamente à rotação de 1.600 rpm do motor. Estes testes foram feitos em duas diferentes etapas. Na primeira etapa, foi utilizada a célula em produção média, diminuindo a corrente fornecida ao sistema. Na segunda parte, foi utilizada a produção máxima obtida pela célula de hidrogênio nos testes práticos da primeira fase do projeto utilizando a bateria de 12 volts. Com isso, tornou-se possível identificar a queda de consumo com diferentes quantidades de HHO aplicado no sistema.

Nesta fase do teste, identificou-se o aumento ocorrido na rotação do motor tanto com a célula a uma produção média quanto na sua produção máxima atingida nos testes. É importante afirmar que em nenhuma das situações foi possível confirmar se todo o gás injetado no sistema estava sendo consumido pela combustão, pois, por se tratar de um sistema aberto, pode ser que uma parte do HHO estivesse sendo perdida para o ambiente, ou até mesmo a quantidade de HHO fornecida poderia ser maior, diminuindo ainda mais o consumo de combustível fóssil.

## 8 RESULTADOS

### 8.1 TESTE 1: VERIFICAÇÃO DE MÉTODO PARA SIMULAÇÃO DE MISTURA POBRE

Nas TAB. 1, 2 e 3 apresentadas a seguir, é possível perceber a diferença no consumo do motor em diferentes condições de regulagem de carburador, tornando a mistura mais rica da mesma forma que ocorre em altas altitudes devido à baixa quantidade de oxigênio. Seguem os dados obtidos:

TABELA 1 – Média de consumo simulando falta de oxigênio (mistura muito pobre)

RESULTADO	LITROS	RPM	TEMPO
TESTE 1	0,6	1600	00:11:40
TESTE 2	0,6	1600	00:11:20
TESTE 3	0,6	1600	00:11:01
TESTE 4	0,6	1600	00:11:56
TESTE 5	0,6	1600	00:11:45
MÉDIA		MÉDIA=	00:11:40

  

Para:	0,5	Tempo:	00:11:40
Para:	3,0857143	Tempo:	01:00:00

Portanto o motor consome em média:

6,09	L/H
------	-----

\*7 voltas no parafuso de regulagem da lenta

FONTE: Os autores (2013)

O parafuso de regulagem de entrada de combustível ao carburador foi afrouxado até atingir sete voltas, conforme informado na TAB. 1, possibilitando assim a entrada de uma maior quantidade de combustível na mistura consumida pela câmara de combustão.

Conforme demonstrado na metodologia, esta regulagem representa a pior condição, mais voltas no parafuso causariam vazamento do combustível para fora do carburador.

Na TAB. 2 vemos os resultados para condições mais favoráveis, quando a injeção de gasolina e a quantidade de ar atmosférico entrando na câmara de combustão estão mais próximas da condição ideal (estequiométrica). É possível notar uma queda significativa no consumo de combustível comparado com a situação anterior.

TABELA 2 – Média de consumo simulando falta de oxigênio (mistura pobre)

RESULTADO	LITROS	RPM	TEMPO
TESTE 1	0,6	1600	00:14:24
TESTE 2	0,6	1600	00:14:50
TESTE 3	0,6	1600	00:14:38
TESTE 4	0,6	1600	00:14:03
TESTE 5	0,6	1600	00:14:08
MÉDIA		MÉDIA=	00:14:25

Para:	0,6	Tempo:	00:14:25
Para:	2,4982651	Tempo:	01:00:00

Portanto o motor consome em média:

2,50	L/H
------	-----

\*4 voltas no parafuso de regulagem da lenta

FONTE: Os autores (2013)

A TAB. 3 demonstra os resultados em condições ambientes, com o carburador regulado conforme especificações do fabricante, mantendo em duas voltas o parafuso de regulagem de entrada de combustível. Os resultados demonstrados indicam o consumo do motor em condições mais próximas à ideal (estequiométrica).

TABELA 3 – Média de consumo a condições ambientes (próxima da estequiométrica)

RESULTADO	LITROS	RPM	TEMPO
TESTE 1	0,6	1600	00:16:45
TESTE 2	0,6	1600	00:16:48
TESTE 3	0,6	1600	00:16:46
TESTE 4	0,6	1600	00:16:44
TESTE 5	0,6	1600	00:16:45
MÉDIA			00:16:45

Para:	0,6	Tempo:	00:16:45
Para:	2,1492537	Tempo:	01:00:00

Portanto o motor consome em média:

2,15	L/H
------	-----

\*2 voltas no parafuso de regulagem da lenta, conforme especificado pelo fabricante.

FONTE: Os autores (2013)

Portanto, confirmou-se que, pela regulagem do carburador, é possível alterar o consumo de combustível de um motor a combustão interna. Vale resaltar que os resultados de consumo obtidos nestes testes podem variar dependendo da rotação, da temperatura, do combustível utilizado, entre outros fatores. Eles são válidos apenas para essa aplicação.

## 8.2 TESTE 2: APLICAÇÃO DE GÁS HHO NA COMBUSTÃO

Após a realização dos testes no motor em condições normais de funcionamento, utilizando apenas a gasolina aditivada como combustível, foi possível conhecer o consumo médio do motor utilizado na pesquisa. Tendo esta informação, na segunda fase dos testes, tornou-se possível identificar a queda no consumo após a aplicação do gás HHO na mistura. Os resultados obtidos poderão ser verificados nas TAB. 4 e 5 apresentadas abaixo.

A TAB. 4 tem como objetivo demonstrar a queda no consumo de gasolina após a aplicação do gás HHO ao sistema, mantendo a célula eletrolítica a uma produção média.

TABELA 4 – Média de consumo aplicando HHO na mistura (produção média)

RESULTADO	LITROS	RPM	TEMPO
TESTE 1	0,6	1600	00:19:32
TESTE 2	0,6	1600	00:19:02
TESTE 3	0,6	1600	00:19:54
TESTE 4	0,6	1600	00:19:30
TESTE 5	0,6	1600	00:19:40
MÉDIA			00:19:32

  

Para:	0,6	Tempo:	00:19:32
Para:	1,8436326	Tempo:	01:00:00

Portanto o motor consome em média:

1,84	L/H	MELHORA 11%
------	-----	----------------

\*2 voltas no parafuso de regulagem da lenta

FONTE: Os autores (2013)

Nota-se que, mesmo a célula de hidrogênio não estando em sua máxima produção, houve uma queda significativa no consumo do motor, isto pode ser notado devido ao aumento no tempo de funcionamento para o consumo de uma mesma quantidade de combustível fóssil.

Ao efetuar os testes utilizando a produção máxima obtida pela célula de hidrogênio, houve uma queda ainda maior no consumo de combustível do motor. Os resultados podem ser verificados na TAB. 5:

TABELA 5 – Média de consumo aplicando HHO na mistura (produção máxima)

RESULTADO	LITROS	RPM	TEMPO
TESTE 1	0,6	1600	00:21:48
TESTE 2	0,6	1600	00:22:43
TESTE 3	0,6	1600	00:22:00
TESTE 4	0,6	1600	00:22:18
TESTE 5	0,6	1600	00:21:58
MÉDIA			00:22:09

  

Para:	0,6	Tempo:	00:22:09
Para:	1,6247931	Tempo:	01:00:00

Portanto o motor consome em média:

1,62	L/H	MELHORA 26%
------	-----	----------------

\*2 voltas no parafuso de regulagem da lenta

FONTE: Os autores (2013)

Nestas condições, o motor se manteve funcionando por um tempo ainda maior utilizando ainda a mesma quantidade de combustível fóssil para consumo.

A TAB. 6 tem como objetivo demonstrar o aumento na rotação do motor após a aplicação do gás HHO na mistura. Utilizou-se o fornecimento de gás à produção média da célula e à produção máxima.

TABELA 6 – Variação na rotação após aplicação de HHO

COMBUSTÍVEL UTILIZADO	TEMPO MÉDIO	CONSUMO DE GASOLINA	ROATAÇÃO MÉDIA
Gasolina	16:45:00 min.	0,6 L	1600 RPM
Gasolina +HHO (Produção Média)	16:45:00 min	0,6 L	1790 RPM
Gasolina +HHO (Produção Média)	16:45:00 min	0,6 L	1960 RPM

FONTE: Os autores (2013)

Os dados apresentados na TAB. 6 são resultados médios obtidos por meio da análise de um total de cinco testes, realizados para cada situação mencionada. Portanto, os resultados podem variar dependendo das condições climáticas do local onde foram realizados os testes.

Os resultados indicam que, mesmo após um aumento na rotação do motor, causado pela aplicação do gás HHO na mistura, o consumo médio de combustível fóssil se manteve o mesmo para todas as situações, demonstrando um aumento na eficiência do motor.

## CONCLUSÃO

Após o longo processo de levantamento bibliográfico, a construção dos protótipos, a realização de testes práticos e o levantamento de dados, foi possível verificar que realmente o hidrogênio pode ser utilizado como combustível em motores a combustão interna, causando a queda no consumo de combustíveis fósseis e melhorando sua eficiência.

Ao analisar os dados, é possível concluir que, após a aplicação do gás HHO a uma produção média de 3,46 litros por minuto, que é a produção obtida pela utilização do carregador de bateria regulado para isso, houve um aumento médio de 190 rpm em relação à rotação inicial de 1.600 rpm, considerada uma rotação de lenta pelo fabricante. Empregando a bateria de 12 volts e 40 ampères como fonte de energia para célula de combustível, chegando a uma produção média de 6,92 litros por hora, tornou-se possível notar um aumento médio de 260 rpm na rotação do motor de lenta. Por isso ficou demonstrado que a utilização do gás HHO em motores a combustão interna realmente causou um aumento da rotação.

Com relação ao consumo de combustível fóssil, foi possível notar que, utilizando a célula de hidrogênio a uma produção média, alcançou-se uma queda no consumo de cerca de 10%. Já a uma produção máxima foi possível chegar a 26% de economia. Estes resultados demonstraram que realmente o hidrogênio pode ser usado como um combustível ecologicamente correto na substituição dos combustíveis fósseis, ou pelo menos na diminuição de seu consumo.

Conclui-se também que, devido à queda no consumo de combustíveis fósseis após a utilização do HHO como combustível substituto, obtém-se também uma queda na eliminação de gases tóxicos provenientes da combustão, porém, neste relatório, não serão apresentados resultados numéricos sobre esta queda, pois não houve testes utilizando o equipamento medidor de monóxido de carbono liberado pelo escape.

## REFERÊNCIAS

- ANDERSON, H. P. **Fuel system for internal combustion system and adapter for use in same USP# 5,852993**. 1998. Disponível em: <<http://www.rexresearch.com/andersnh/andersnh.htm>>. Acesso em: 20 fev. 2012.
- BARI, S.; ESMAEIL, M. M. Effect of H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> addition in increasing the thermal efficiency of a diesel engine. **Fuel**, Amsterdam, v. 89, n. 2, p. 378-383, 2010.
- BROWN, T. L. et al. **Química: a ciência central**. 9. ed. São Paulo: Pearson, 2005.
- CASSIDY, J. F. **Emissions and total energy consumption of a multicylinder piston engine running on gasoline and a hydrogen-gasoline mixture**. Cleveland, Ohio: Lewis Research Center, 1977. Nasa Technical Note, TN D-8487.
- DULGER, Z. Fuel economy improvement by on board electrolytic hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, Oxford, v. 25, n. 9, 2000.
- FRAZER, C. H. **Hydro-oxygen Generator**. United States Patent Office. 1,262,034, 1st ed. Columbus, Ohio, 1918.
- LIMA, F. L. M. **Motores de combustão interna**. Porto, PO: 2009. (Projecto FEUP)
- LONGO, M. A. V.; LAZZARIN, N.; MIGUEZ, T. A. **Produção biológica de hidrogênio**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina – Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, 2008.
- MAHLE. **Motores a combustão interna**: manual técnico Mahle. [s.l.], 2012.
- MARTINELLI JUNIOR, L. C. M. **Motores a combustão interna**: conceitos básicos. Ijuí, RS: Unijuí, *Campus Pamabi*, 2008.
- MEYER, S. A. **Hydrogen gas fuel and management system for an internal combustion engine utilizing hydrogen gas fuel**. WO 92/08046. Grove City, OH, 1992.
- \_\_\_\_\_. **The birth of new technology – water fuel cell** (technical brief). Grove City, Ohio: [s.n.], 1996.
- MILHOR, C. E. **Sistema de desenvolvimento para controle eletrônico dos motores de combustão interna ciclo Otto**. 2002. 86 p. Dissertação (Mestrado) – USP. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos. São Paulo, 2002.
- OLIVEIRA JUNIOR, D. P. de. **Motores a combustão interna**. Piracicaba, 1997.
- PADILHA, J. C. et al. **Produção de hidrogênio por eletrólise da água usando líquidos iônicos como eletrólitos**. Porto Alegre: Instituto de Química, 2006.
- PERFIL DE CURITIBA. Disponível em: <<http://www.curitiba.pr.gov.br>>. Acesso em: 12 ago. 2013.
- RAHDE, S. B. **Motores a combustão interna**. Departamento de Engenharia Mecânica da PUC. Rio Grande do Sul. 1997.
- SANTOS, F. M. S. M. dos; SANTOS, A. C. M. dos. **O combustível hidrogênio**. Viseu, PO: Instituto Politécnico de Viseu, 2005.

SANTOS JUNIOR, J. **Análise da viabilidade econômica da produção de hidrogênio em usinas hidrelétricas**: estudo de caso em Itaipu. 2004. 143 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Produção, Florianópolis, 2004.

SEQUEIRA, C. A. C. Hydrogen, the ultimate clean fuel. **Ciência e Tecnologia dos Materiais**, Lisboa, v. 21, n. 3/4, p. 44-47, jul. 2009.

SILVA, E. R. da et al. **Química**: transformações e energia. São Paulo: Ática, 2001. v. 2.

SILVEIRA, V. F. **Avaliação da injeção de gás HHO em um gerador a gasolina para fins de energização rural**. 2012. 67 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, Cascavel, 2012.

SIMON, J. M. **Guidelines for use of hydrogen fuel in commercial vehicles**. FMCSA-RRT-07-02. Washington, DC: U.S. Dept. of Transportation, Federal Motor Carrier Safety Administration, Office of Analysis, Research and Technology, 2007.

SMUTZER, C. **Application of Hydrogen Assisted Lean Operation to Natural Gas-Fueled Reciprocating Engines (HALO)**. Cambridge, Mass., 2006.

VLASSOV, D. **Fundamentos da combustão**. Curitiba: UTFPR, 2008.

WICKERT, J. **Introdução à engenharia mecânica**. 2. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2011.

YILMAZ, A. C. Effect of Hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines. **International Journal of Hydrogen Energy**, Amsterdam, NT, v. 35, n. 20, p. 11366-11372, Oct. 2010.

