

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ

GABRIEL MARCON

**APLICAÇÃO DO HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL PARA MOTORES A
COMBUSTÃO INTERNA**

CASCADEL - PR

2017

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ

GABRIEL MARCON

**APLICAÇÃO DO HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL PARA MOTORES A
COMBUSTÃO INTERNA**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

**Professor Orientador: Me. Eng. Mecânico Eliseu
Avelino Zanella Junior**

CASCADEL – PR

2017

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Rendimento térmico do ciclo Otto.	13
Equação 2: Rendimento térmico em função de volume.	14
Equação 3: Rendimento térmico em função de temperatura.	14
Equação 4: Relação compressão.....	14
Equação 5: Potência Teórica.	15
Equação 6: Potência Indicada.....	16
Equação 7: Potência Indicada para motores 4 tempos.	16
Equação 8: Potência Indicada em função de rotação.	17
Equação 9: Potência Efetiva.	18
Equação 10: Potência Efetiva simplificada.....	18
Equação 11: Torque no eixo de manivelas.	19
Equação 12: Torque no eixo de manivelas em função de R.	19
Equação 13: Potência efetiva em função de Ω	19
Equação 14: Potência efetiva em função de Torque e rotação.....	20
Equação 15: Trabalho realizado por energia elétrica.	27
Equação 16: Energia utilizada no sistema.	27
Equação 17: Calor no processo.	27
Equação 18: Energia reversível.	28
Equação 19: Energia reversível simplificada.....	28
Equação 20: Novo potencial.....	28
Equação 21: Voltagem de operação.	29
Equação 22: Perdas no processo de eletrólise.	29
Equação 23: Eficiência no processo de eletrólise.	29

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Motor de combustão interna e seus mecanismos.	9
Figura 2: Componentes da árvore de manivela (virabrequim).....	10
Figura 3: Tempos do ciclo mostrando o movimento resultante dos pistões.	12
Figura 4: Gráfico Pressão x Volume ciclo Otto.....	13
Figura 5: Diagrama força tangencial.	18
Figura 6: Processo de eletrólise para gerar hidrogênio.....	26
Figura 7: Reservatório de gás de hidrogênio de alta pressão.	30
Figura 8: Circuito ideal para funcionamento do motor.....	32
Figura 9: Projeto da célula de geração de Hidrogênio.	34
Figura 10: Controlador PWM da marca Droyd.	35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
1.1 OBJETIVO.....	6
1.1.1 Objetivo Geral	6
1.1.2 Objetivos Específicos	7
1.2 JUSTIFICATIVA	7
1.3 PROBLEMATIZAÇÃO	7
1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	8
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
2.1 MOTORES À COMBUSTÃO.....	9
2.1.1 Princípio de funcionamento do motor	10
2.1.2 Motor de ignição comandada	10
2.1.3 Rendimento Térmico no ciclo OTTO	12
2.2 POTÊNCIA EM MOTORES CICLO OTTO.....	15
2.2.1 Generalidades	15
2.2.2 Potência Teórica	15
2.2.3 Potência Indicada.....	16
2.2.4 Potência Efetiva	17
2.3 COMBUSTÍVEL.....	20
2.3.1 Generalidades	20
2.3.2 Relação Ar - Combustível.....	20
2.3.3 Composição dos gases de escapamento.....	22
2.4 REAÇÕES QUÍMICAS	23
2.4.1 Reações de Síntese ou Adição	23
2.4.2 Reações de Análise ou de Decomposição	23
2.4.3 Reação de deslocamento ou de substituição ou de simples troca	24
2.4.4 Reações de Dupla-troca ou de Dupla Substituição	24
2.5 HIDROGÊNIO	24
2.5.1 Composição	24
2.5.2 Produção	25
2.5.3 Produção do Hidrogênio no processo de eletrólise	26
2.5.4 Armazenamento de Hidrogênio.....	30
3 METODOLOGIA	32

3.1 CÉLULA (GERADOR DE HIDROGÊNIO)	33
3.2 BORBULHADOR.....	34
3.3 CONTROLADOR PWM.....	34
3.4 MOTOR.....	35
3.5 MISTURA	35
3.6 BATERIA.....	36
3.7 VÁLVULAS, TUBULAÇÕES, CONEXÕES E FIOS.....	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
5 CONCLUSÃO	39
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41

1 INTRODUÇÃO

Com a constante demanda de combustíveis provenientes do petróleo, surgem hipóteses que, um dia, essas reservas possam acabar, sendo um fator de alerta para a indústria e para o setor de energia, uma vez que se tem uma grande utilidade em critérios de fornecimento energético.

Sendo um fator importante de energia, a procura por meios alternativos de combustíveis tornou-se uma abertura nas linhas de pesquisa para resolução do possível problema das reservas e também para uma nova linha de tecnologias baseadas em combustíveis paralelos.

Como o petróleo é a matéria prima para a produção da gasolina, os clientes de alto consumo deste item como automóveis, começam a buscar soluções paralelas para uma possível falta ou baixa fonte de fornecimento, procurando por automóveis que tenham um melhor aproveitamento do combustível ou até mesmo depender de outro método de funcionamento como uma solução futurística como, por exemplo, carros híbridos e elétricos.

Em busca de soluções, através de pesquisas, pode-se notar que os automóveis podem utilizar combustíveis que não sejam provenientes de fontes de petróleo, tais eles como o etanol, eletricidade (bateria), gás (automóveis adaptados para utilização de gás veicular - GNV) e o mais novo conceito sobre combustíveis automotivos: o hidrogênio.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo Geral

Demonstrar de maneira didática e científica a possibilidade de utilização do gás de hidrogênio como uma alternativa de combustível para motores à combustão interna ciclo Otto.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Demonstrar o poder de combustão do Hidrogênio;
- Comparar atuais combustíveis com suas características;
- Mostrar a viabilidade na produção do gás;
- Aplicar adaptações, se necessárias, ao sistema de funcionamento.

1.2 JUSTIFICATIVA

A utilização de combustíveis é um fator de extrema importância, pois partindo dele conseguimos hoje possibilitar o deslocamento através de carros, além de geradores de energia elétrica e a purificação de água por processos que utilizam petróleo em sistemas de filtragem.

Tendo o consumo em grande quantidade e a todo o momento, as fontes utilizadas do planeta infelizmente são escassas, uma vez que, se acabar, não teremos mais proveito das tecnologias que utilizam esse combustível, no caso do petróleo.

Perceber que o petróleo pode acabar é um dos fatores para a utilização de meios alternativos de combustíveis, também devemos notar que além de escasso ele também é altamente poluente, logo prejudicamos a própria saúde e o planeta com a utilização desse meio de energia.

1.3 PROBLEMATIZAÇÃO

Até quando será possível utilizar fontes de combustíveis fósseis para suprir a atual demanda de automóveis? Qual combustível e como pode ser conseguido de modo a ser substituto compatível?

1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

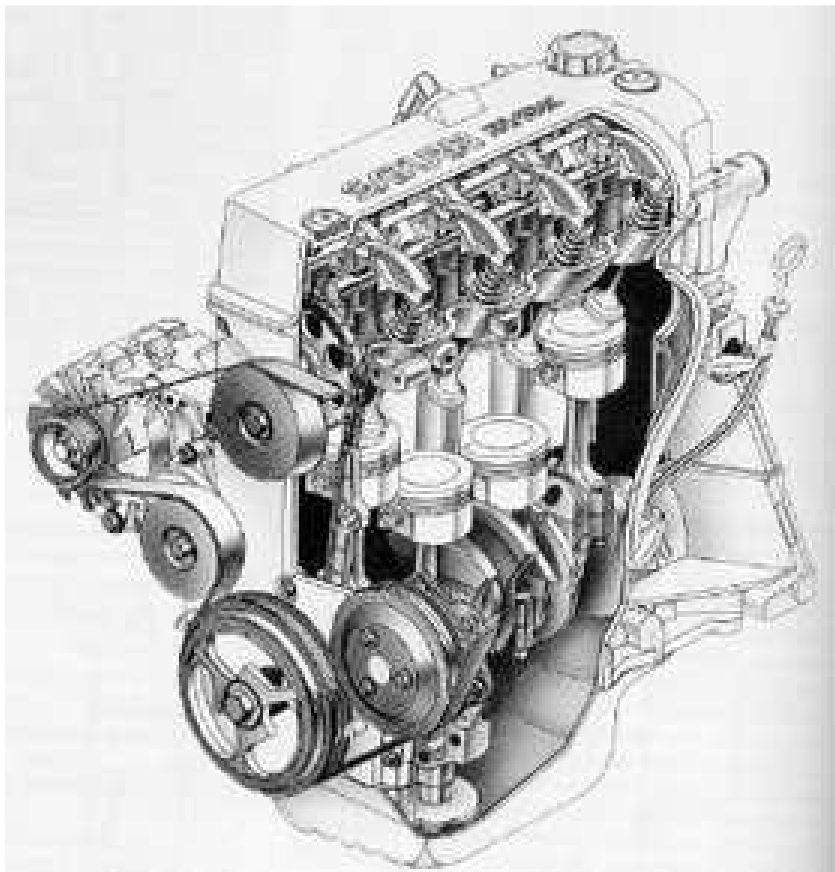
Utilizar o hidrogênio como um combustível, aplicando em um motor de combustão interna de uma motocicleta ciclo Otto e realizando testes para provar que seu desenvolvimento pode ser funcional frente a outros combustíveis presentes no mercado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MOTORES À COMBUSTÃO

Um motor de combustão é aquele que se utiliza de energia térmica para transformá-la em energia mecânica, ou seja, a partir de uma combustão seja ela proveniente de algum combustível compatível, gera uma expansão consequentemente impulsionando os componentes metálicos todos já dimensionados em um sistema de sincronismo mecânico para transformar a força de combustão em energia mecânica sendo traduzida para movimento.

Figura 1: Motor de combustão interna e seus mecanismos.



Fonte: Cavalcante (2017).

2.1.1 Princípio de funcionamento do motor

O motor de combustão interna aproveita o aumento de pressão resultante da combustão da mistura ar-combustível para gerar um movimento de rotação na árvore de manivelas (virabrequim). O motor é constituído por cilindros, nos quais, em funcionamento, movem-se os pistões ligados à árvore de manivelas, pelas bielas. Conforme se tem a rotação do virabrequim, os pistões têm movimentos lineares, subindo e descendo dentro dos cilindros. Para que o motor tenha uma rotação contínua ou para não ter irregularidades em seu andamento, uma extremidade da árvore de manivela é auxiliada de um volante de inércia, que acumula energia cinemática (MARTINS, 2006).

Figura 2: Componentes da árvore de manivela (virabrequim).



Fonte: Costa (2001-2002).

2.1.2 Motor de ignição comandada

O motor de combustão mais comum é o motor onde seu combustível é a gasolina, que se denomina motor de ignição comandada ou de ignição por faísca (centelha), pois a sua combustão é iniciada a partir de uma descarga elétrica de uma alta tensão (centelha) dentro da câmara de combustão.

Em seu ciclo, existem ao menos duas válvulas na parte superior do cilindro que podem ser abertas ou fechadas por um mecanismo com sincronismo.

Na válvula de admissão, quando aberta, mantém o cilindro conectado com o sistema de alimentação, o qual tem por função fornecer a mistura de ar + combustível.

A válvula de exaustão permite a saída dos gases de dentro do cilindro, cuja pressão os expulsa de dentro, sendo eliminados após a combustão.

Com ambas as válvulas fechadas, o pistão sobe do ponto mais baixo conhecido como PMI (ponto morto inferior) e desloca-se para o ponto mais alto conhecido como PMS (ponto morto superior), consequentemente, comprimindo os gases que foram admitidos durante o processo da abertura da válvula de admissão.

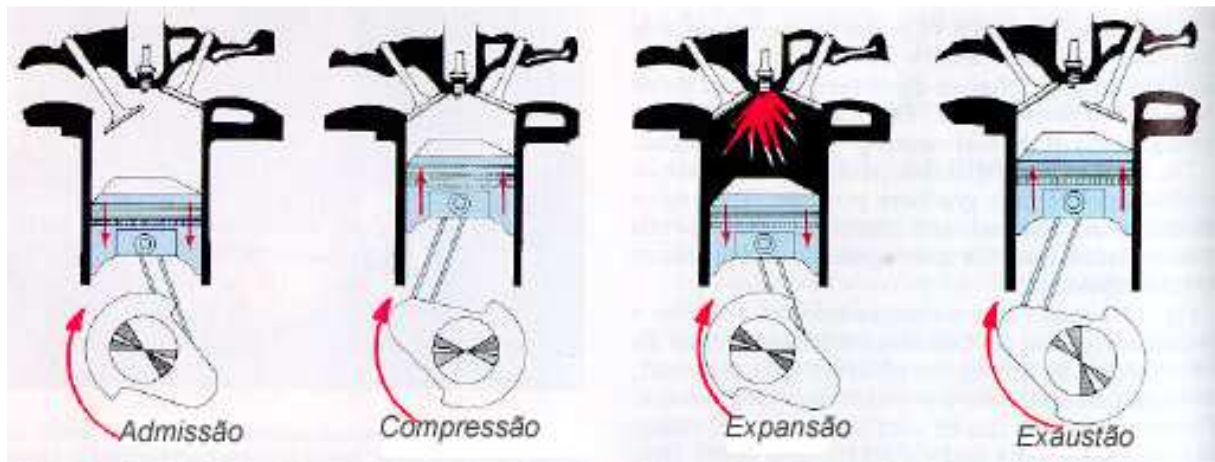
Esta compressão causa um aumento de temperatura e turbulência na mistura, vaporizando alguns vestígios de gasolina do estado líquido e, desse modo, homogeneíza a mistura. A combustão será, com a condição adquirida, mais completa, tendo uma liberação maior de calor e uma menor quantidade de combustível não queimado, altamente poluente.

No momento em que o pistão chega ao fim do curso de compressão, é iniciada de forma proposital uma faísca, originada de um componente conhecida como vela, na câmara de combustão. Como a mistura já vem aquecida e comprimida, ao entrar em contato com a faísca, ela rapidamente queima (explosão) gerando uma expansão no cilindro. A partir da combustão, a pressão obtida é extremamente alta, ocasionando que o pistão seja empurrado de forma bruta até o ponto mais baixo (ponto morto inferior). Esta ação do pistão que impulsiona a árvore de manivelas (virabrequim), sendo a única altura em que o motor fornece o trabalho (movimento).

Na válvula de escape, no final do ciclo, os gases queimados são despejados por ela. O pistão, no seu movimento, vai limpar o interior do cilindro dos gases queimados e assim lança os gases para o escapamento, sendo posteriormente lançados para a atmosfera.

O ciclo é o conjunto destas quatro fases: admissão, compressão, expansão e exaustão. Nesta configuração de motores, as quatro fases se realizam em 4 tempos, ou seja, em 4 cursos do pistão ou 2 rotações. Nota-se que, num motor a 4 tempos apenas, há um tempo de expansão que, por consequência, em um motor monocilíndrico possui um grande volume de inércia, capaz de arrastar a árvore de manivela durante mais 3 tempos sem ter uma perda considerável de velocidade (MARTINS, 2006).

Figura 3: Tempos do ciclo mostrando o movimento resultante dos pistões.

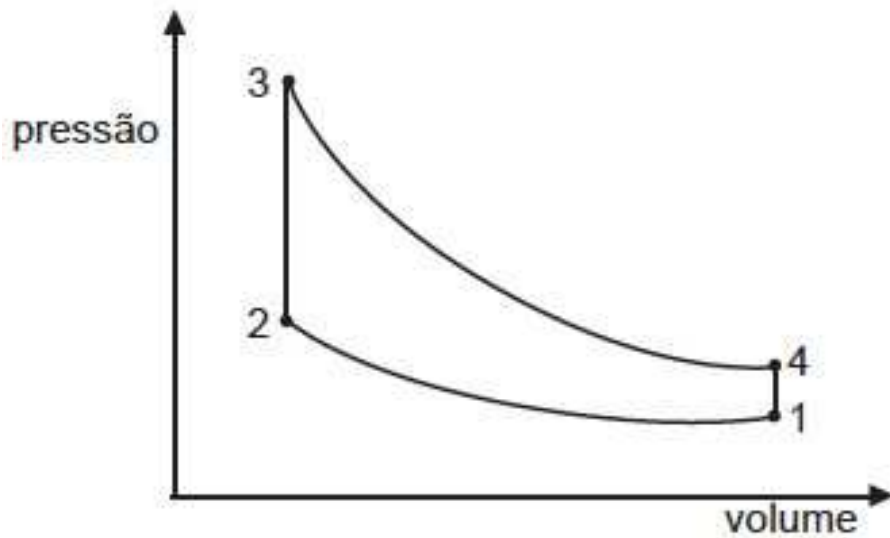


Fonte: Cavalcante (2017).

2.1.3 Rendimento Térmico no ciclo OTTO

O ciclo Otto, conhecido por ser padrão a ar pode ser considerado o ideal que se aproxima do motor de combustão interna de ignição por centelha. Avaliando o diagrama $P-v$ e $T-s$, pode-se notar no processo 1-2 que é uma compressão isentrópica do ar quando o pistão se move do ponto morto do lado da manivela (onde se tem o ponto inferior) para o ponto morto do lado do cabeçote (ponto superior). O calor então é transferido para o ar como volume constante, no momento em que o pistão está em repouso no ponto morto superior (no momento em que em um modelo real de motor está no processo correspondente da fagulha gerar a ignição da mistura ar-combustível e a queima do subsequente). O processo 3-4 é uma expansão isotrópica e o processo 4-1 é o de rejeição de calor do ar, no momento em que o pistão está localizado no ponto morto inferior (BORGNAKKE, 2013).

Figura 4: Gráfico Pressão x Volume ciclo Otto.



Fonte: PUC-RS (2010)

Para calcularmos o rendimento térmico, admitindo que o calor específico do ar seja constante, determina-se o rendimento térmico do ciclo Otto a partir de:

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{q_H - q_L}{q_H} \quad (1)$$

$$\eta_{\text{Térmico}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

Onde:

Q_L, Q_H

= Transferência de calor num corpo a alta temperatura (H) e a baixa temperatura (L)

$$\eta_{\text{Térmico}} = 1 - \frac{C_v(T_4 - T_1)}{C_v(T_3 - T_2)}$$

$$\eta_{\text{Térmico}} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}$$

Pode-se observar que:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{k-1} = \frac{T_3}{T_4} \quad (2)$$

Concluindo que:

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1}$$

Então:

$$\eta_{T\acute{e}rmico} = 1 - \left(\frac{T_1}{T_2}\right) = 1 - (r_c)^{1-k} = 1 - \frac{1}{(r_c)^{k-1}} \quad (3)$$

Sendo assim, segundo Borgnakke (2013), temos:

$$r_{c=Rela\c{c}ao\ compress\~ao} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3} \quad (4)$$

Sendo eles:

$T = Temperatura$

$V = Volume$

$k = Constante\ de\ equil\acute{b}rio$

Pode-se notar que o rendimento do ciclo padr~ao Otto ~e apenas fun\c{c}~ao da rela\c{c}~ao de compress~ao e que aumenta conforme se aumenta a rela\c{c}~ao. Pode-se dizer que, para um motor que utiliza centelha como forma de acionamento da combust~ao, tem-se um aumento do rendimento t~ermico quando a rela\c{c}~ao de compress~ao tamb~em ~e aumentada. Tendo como tend~encia a utiliza\c{c}~ao da rela\c{c}~ao de compress~ao maior sendo induzida pelos maiores esfor\c{c}os para se obter um rendimento t~ermico maior. Por~em, quando se aumenta a rela\c{c}~ao de compress~ao, em um caso real de motor a combust~ao, ocorre um aumento na tend~encia para a detona\c{c}~ao do combust\acute{v}el. Tendo essa detona\c{c}~ao gerada de uma queima de combust\acute{v}el extremamente r~apida e pela presen\c{c}a de fortes ondas de press~ao no cilindro do motor. Portanto, para se utilizar a rela\c{c}~ao de compress~ao de maneira correta, deve-se evitar a detona\c{c}~ao do combust\acute{v}el. O aumento das rela\c{c}~oes de compress~ao em motores reais se tornou poss\acute{v}el em virtude do desenvolvimento de

combustíveis com melhores características antidetonantes, principalmente com adição de chumbo tetraetil. Porém, nos tempos atuais, se tem uma gasolina desenvolvida com a isenção do chumbo, a qual apresenta boas características antidetonantes e essas foram desenvolvidas para reduzir a contaminação atmosférica (CLAUS, 2016).

2.2 POTÊNCIA EM MOTORES CICLO OTTO

2.2.1 Generalidades

A potência pode ser representada através da transformação da energia por decorrer de tempo. Em motores a combustão interna, a energia térmica resultante de uma reação de combustível mais ar atmosférico. Nem toda a energia gerada a partir da mistura sendo térmica, se converte em energia mecânica. Para avaliar os motores, existem três tipos de potência, sendo eles: Teórica, indicada e efetiva. A potência é expressa em unidade do sistema Internacional, sendo então em W (watts) ou seus múltiplos (INMETRO, 2007).

2.2.2 Potência Teórica

Potência teórica pode ser estimada com base em propriedades físicas e com consumo de combustível. Esta potência condiz que toda energia térmica com fonte da combustão é convertida em energia mecânica, sendo equalizada como:

$$P_T = p_c \cdot q \cdot d \quad (5)$$

Sendo:

$$P_T = \text{Potência Teórica}$$

$$p_c = \text{Poder calorífico do combustível} [\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$q = \text{Consumo de combustível} [\text{L} \cdot \text{h}^{-1}]$$

$$d = \text{Densidade do combustível} [\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}]$$

2.2.3 Potência Indicada

Potência indicada é estimada a partir da pressão no momento de expansão do ciclo, dimensões e rotações atuantes na árvore de manivelas do motor. Após a fase da combustão ocorre o aumento de temperatura e pressão, consequentemente deslocando o pistão do PMS (ponto morto superior) para o PMI (ponto morto inferior) onde há realização de trabalho mecânico (VARELLE, 2010). Podemos demonstrar a potência indicada através da equação:

$$P_i = \frac{F.L}{t} = \frac{P.A.L.n}{t} = P.V_{cil} \cdot \frac{1}{t} \quad (6)$$

Podendo concluir que:

$$P_i = P.V_{cil} \cdot \frac{1}{t}$$

Onde:

P_i = Potência indicada [W]

F = Força na expansão [N]

L = Curso do pistão [m]

t = Tempo para realizar o ciclo [s]

P = Pressão na expansão [Pa]

A = Área do cilindro [m²]

V_{cil} = Volume do cilindro [m³]

n = Número de cilindros

Deve-se notar que a potência indicada é dependente do ciclo do motor, portanto se o motor é dois tempos (2T) são necessários dois cursos para realizar o ciclo, em ciclos de quatro tempos (4T) são necessários quatro cursos para realizar o ciclo (VARELLA, 2010). Sendo assim a equação para motores a (4T) é demonstrada por:

$$t_{4t} = \frac{4.L}{VLP} \quad (7)$$

Onde:

$$VLP = 2 \cdot L \cdot N$$

$$t_{4t} = \frac{4 \cdot L}{2 \cdot L \cdot N} = \frac{2}{N}$$

Logo:

$$t_{4t} = \frac{2}{N}$$

Resultando em:

$$P_{i4t} = \frac{1}{2} \cdot P \cdot V_{cil} \cdot N \cdot n \quad (8)$$

Em que:

P_i = Potência indicada para motores 4T [W]

P = Pressão na expansão [Pa]

V_{cil} = Volume do cilindro [m^3]

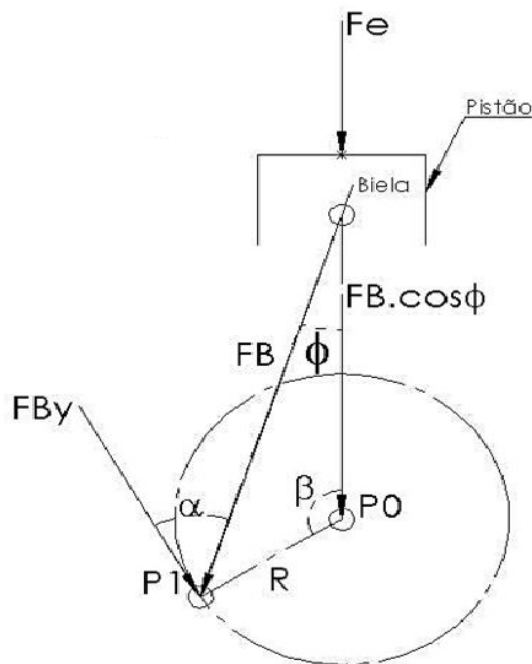
N = Rotação do motor [rps]

n = Número de cilindros do motor

2.2.4 Potência Efetiva

Potência efetiva é demonstrada em função de torque e rotação no volante do motor. São esses parâmetros que obtidos segundo normas ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), em equipamentos denominados dinamômetros. A estimativa da potência efetiva parte do conceito da energia mecânica resultante de uma força tangencial a uma circunferência de raio R, tendo o ponto P1 que gira em torno de P0 com velocidade angular constante Ω conforme demonstrado na Figura 5 (VARELLA, 2010).

Figura 5: Diagrama força tangencial.



Fonte: adaptado de Schmidt et al (2003, p.562).

Podendo então obter a força atuante na haste da biela a partir de:

$$F = F_B \cdot \cos \varphi \quad (9)$$

$$F_B = \frac{F}{\cos \varphi} = \frac{P \cdot A}{\cos \varphi}$$

Concluindo que:

$$F_B = \frac{P \cdot A}{\cos \varphi} \quad (10)$$

Onde:

F_B = Força na haste da biela [N]

P = Pressão na expansão [Pa]

φ = Ângulo entre haste da biela e vertical [graus]

Para obter o torque no eixo da árvore de manivelas, utilizamos a equação:

$$T_0 = F_{By} \cdot R \quad (11)$$

Onde:

$$F_{By} = F_B \cdot \cos \alpha$$

$$T_0 = F_B \cdot \cos \alpha \cdot R$$

$$\alpha = 90 - 180 + \varnothing + \beta = \varnothing + \beta - 90$$

Sabendo que a fase de expansão o pistão está em 0° do PMS, logo o ângulo β é igual a 90° (VARELLA, 2010), sendo assim:

$$\alpha = \varnothing + \beta - 90 = \varnothing + 90 - 90$$

$$\alpha = \varnothing$$

Para obter o torque do motor ou o torque no eixo da árvore de manivelas, utiliza-se a equação:

$$T_0 = F_B \cdot \cos \varnothing \cdot R \quad (12)$$

Onde:

$$T_0 = \text{Torque no eixo da árvore de manivelas [N]}$$

$$F_{By} = \text{Força tangencial [N]}$$

$$R = \text{Raio da circunferência [m]}$$

Em função da força tangencial F_{By} e da velocidade angular Ω do ponto P_1 podemos estimar a potência efetiva na equação:

$$P_E = F_{By} \cdot \Omega \quad (13)$$

$$P_E = F_{By} \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot N$$

$$P_E = \frac{T_0}{R} \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot N$$

Conforme Varella (2010), tem-se:

$$P_E = 2 \cdot \pi \cdot T0 \cdot N \quad (14)$$

Onde:

$$P_E = \text{Potência efetiva [W]}$$

$$T0 = \text{Torque na árvore de manivelas (torque motor)[N.m]}$$

$$N = \text{Rotação na árvore de manivelas (rotação motor)[rps]}$$

2.3 COMBUSTÍVEL

2.3.1 Generalidades

Um motor pode ser alimentado com combustíveis em estados: líquido, sólido e gasoso. Dos três, o que mais tem facilidade de formação da mistura ar + combustível e melhor uniformidade na distribuição dos cilindros é o combustível no estado gasoso.

O combustível líquido vem em segundo lugar, apresentando certa dificuldade na evaporação ao formar a mistura, porém, tem uma vantagem em relação aos combustíveis gasosos, que é a facilidade de armazenamento, uma vez que combustíveis no estado gasoso necessitam de armazenamento com pressão (PENIDO FILHO, 1983).

2.3.2 Relação Ar - Combustível

A relação ar - combustível pode ser definida simplesmente pela admissão como uma massa de ar misturada com uma massa de vapor de combustível injetada em uma câmara de combustão, porém o resultado da combustão está totalmente associado com essa relação.

Para obter uma boa combustão é preciso ter uma boa homogeneização do ar com o vapor de combustível. Em alguns casos de motores com misturas ricas

podem trazer a consequência de uma combustão pobre, por falta da homogeneização.

Sabendo que a variação da mistura pode interferir na combustão, devemos levar em consideração que o motor também pode exigir determinados tipos de mistura conforme sua carga. Uma vez que o motor está frio em sua partida, por consequência faz a condensação dos gases do combustível, sendo necessária uma mistura rica, até que seja atingida a temperatura ideal de funcionamento do motor, além disso, para garantir também uma melhor dirigibilidade do veículo (FAGGI, 2012).

A mistura estequiométrica é a mistura onde a relação ar + combustível é a exata para que se obtenha uma combustão ideal. Na teoria, ela seria a razão da mistura que resultaria na máxima potência do motor, porém, na prática, isto não acontece, sendo necessária a utilização de uma mistura com - ar – combustível menor que o estequiométrico (MOREIRA, 2014).

Além da mistura estequiométrica, existem quatro maneiras de misturas que podem ser classificadas como: limite de mistura pobre, mistura econômica, mistura de máxima potência e limite de mistura rica.

Limite de mistura Pobre: É uma mistura onde a falta de combustível é excessiva, sendo prejudicial para o correto funcionamento do motor. Durante a chama no ciclo de combustão ela é extremamente lenta, podendo ser continua até o ciclo de admissão, onde pode consequentemente sobre aquecer o motor e acarretar em labaredas na parte de admissão, resultando em um motor de rotação instável.

Mistura econômica: É uma mistura levemente pobre, onde ocorre a combustão completa do vapor de combustível, esta mistura ocasiona o menor consumo específico de combustível. Porém provoca um elevado aquecimento na câmara de combustão e no escapamento, onde passam os gases resultantes da queima, também podendo gerar gases NOx (Óxido de nitrogênio). Em algumas situações precisamos enriquecer a mistura para evitar o superaquecimento no sistema de escapamento.

Mistura de máxima potência: Diferente da mistura pobre, a mistura é levemente rica, assim aproveitando todas as moléculas de oxigênio presentes na câmara para ter uma combustão total junto ao vapor de combustível, porém apresentam uma emissão maior de gases como CO (monóxido de carbono).

Limite da mistura rica: Também é uma mistura onde pode prejudicar o correto funcionamento do motor, onde o combustível em elevado nível não entra em combustão e antes mesmo da chama evapora dentro da câmara, consequentemente resfriando ela e tendo um rendimento inferior por não atingir a correta temperatura de operação, tendo também uma possibilidade do combustível condensar nas paredes do cilindro diluindo o óleo do motor, nessas condições pode acarretar em uma instabilidade no funcionamento, se ultrapassar o limite, podendo até não funcionar o motor (BRUNETTI, 2012).

2.3.3 Composição dos gases de escapamento

Em motores a combustão interna, é importante o estudo sobre os gases gerados na combustão. São eles:

- Avaliar a eficiência do ciclo de combustão, tendo uma análise de concentrações de gases como CO, CO₂, O₂ etc.
- Avaliar a concentração dos gases poluentes, limitados pelas legislações de emissões.

Para motores de combustão interna adotou-se o termo “emissões” para designar produtos que são prejudiciais ao ser humano e meio ambiente. A reação de combustão completa estequiométrica produz CO₂, H₂O e N₂, cuja composição pode ser obtida conforme sua própria equação da reação em volume ou massa.

A proporção dos gases pode variar conforme especificações do motor, do combustível utilizado e da sua qualidade de mistura com o ar.

Na reação ideal os elementos citados podem estar presentes em 98% dos gases de escapamento, sendo 1% formado de O₂ e H₂ e gases inertes e aproximadamente 1% de gases nocivos.

Por meio de modelos de tendência do crescimento das fontes de emissões e de previsões das condições atmosféricas, são definidas projeções das concentrações de gases emitidos sobre uma região determinada. Utilizando dessas projeções, são utilizadas como referencia para legislações que limitem a emissão dos principais poluentes por motores e veículos (BRUNETTI, 2012).

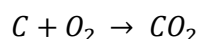
2.4 REAÇÕES QUÍMICAS

Pode-se considerar uma reação química o resultado da ação entre substâncias que reagem entre si e geralmente formam outra substância. Consequentemente as moléculas presentes nas substâncias que estão reagindo sofrem alterações gerando novas moléculas. Sendo assim, os átomos dos elementos permanecem inalterados.

As reações contendo substâncias de maneira reagentes e resultantes podem ser classificadas de quatro maneiras (TODA MATÉRIA, 2011), sendo elas:

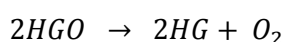
2.4.1 Reações de Síntese ou Adição

Corresponde a uma reação entre duas substâncias reagentes que por consequência, resulta em uma substância mais complexa quimicamente (SOQ, 2017) como, por exemplo:



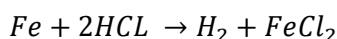
2.4.2 Reações de Análise ou de Decomposição

É uma reação cuja substância reagente se decompõe em duas ou mais substâncias simples, tendo a possibilidade de ser realizada a partir de processos como: Pirólise (onde se tem decomposição de calor), Fotólise (onde há decomposição da luz) e por Eletrólise (onde há decomposição por eletricidade) (SOQ, 2017). Sua decomposição pode ser exemplificada como:



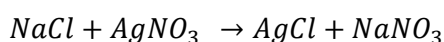
2.4.3 Reação de deslocamento ou de substituição ou de simples troca

Esta reação corresponde entre uma substância simples e outra composta, levando a transformação da substância composta para simples (SOQ, 2017), como por exemplo:



2.4.4 Reações de Dupla-troca ou de Dupla Substituição

São elas as reações que ocorrem entre duas substâncias compostas que reagem entre os elementos presentes, resultado em duas novas substâncias compostas (SOQ, 2017). Como por exemplo:



2.5 HIDROGÊNIO

2.5.1 Composição

O hidrogênio é o elemento com a maior abundância em nosso planeta representando 75% da massa dele. O hidrogênio é de extrema importância para as atividades industriais e ciclos naturais utilizadas pela humanidade. É um dos constituintes do Sol, em conjunto com o oxigênio compõe a molécula da água (H₂O).

Este elemento não possui um grupo na tabela periódica, possui número atômico e número de massa igual a 1 (um), consequentemente, é um elemento extremamente pequeno, simples e leve. Uma molécula de hidrogênio se encontra na forma gasosa com dois átomos (H₂). Suas principais características são: é incolor, é inflamável, é inodoro e insolúvel em água (PEDROLO, 2017).

2.5.2 Produção

O hidrogênio pode ser adquirido de duas maneiras, retirados de matérias-primas como água ou combustíveis fósseis, porém existem varias tecnologias para realizar a extração do gás. Os processos para produção do hidrogênio podem ser definidos em três processos: processos térmicos, processos eletrolíticos e processos fotolíticos. O processo térmico é o mais usual na indústria, os outros ainda estão passando por uma fase experimental, tendo também um custo elevado em relação ao primeiro.

Reforma de hidrocarbonetos leves: Este é o processo mais usual em larga escala utilizado, Neste processo utiliza-se o vapor de água em mistura com hidrocarbonetos reagindo em altas temperaturas na presença de um catalisador, resultando em hidrogênio e dióxido de carbono.

O hidrocarboneto mais utilizado é o gás metano (aproximadamente 90% do volume) sendo positivamente sua utilização a disponibilidade de produção uma vez que podendo ter facilidade na fabricação reduz a chance de faltar matéria prima.

Além da geração da energia requerida para gerar o vapor (através de caldeiras) utilizado na mistura, uma vez que a mistura é endotérmica. Sendo assim o processo exige o consumo de um segundo combustível para execução.

Oxidação parcial de hidrocarbonetos: A oxidação parcial de hidrocarbonetos em um rico fluxo de hidrogênio proveniente de gás natural, carvão, coque de petróleo ou biomassa é outra maneira para produzir hidrogênio. Neste processo é realizado de forma similar ao processo de reforma de hidrocarbonetos leves, porém ao invés de vapor utiliza-se oxigênio.

Eletrólise: O processo de eletrólise pode ser considerado o mais ecologicamente correto, pois seu processo depende unicamente de corrente elétrica, onde ela em ação na água separa as moléculas de H_2 e H_2O (hidrogênio e água), fazendo com que o gás de hidrogênio seja retirado da água 100% puro, além de não ser poluente ainda tem uma qualidade do produto final maior em relação aos outros processos. Entretanto o processo de eletrólise é considerado de alto custo, pois é necessária a utilização de energia, é recomendada para produção em massa quando é realmente necessário o gás de hidrogênio 100% puro (CRUZ, 2010).

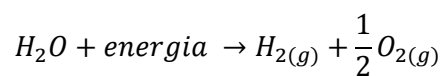
Figura 6: Processo de eletrólise para gerar hidrogênio.



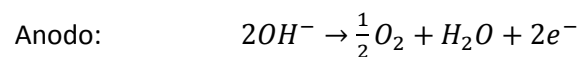
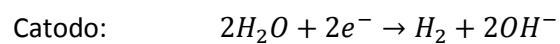
Fonte: Bullis (2014).

2.5.3 Produção do Hidrogênio no processo de eletrólise

No seu processo é efetuada a quebra da molécula da água, resultando em hidrogênio e oxigênio, sendo representado por:



A energia que se utiliza no processo é convertida em calor nos eletrodos e energia química na forma de hidrogênio gasoso. As reações nos eletrodos são representadas por:



Como o processo se utiliza da molécula da água, observa-se que ao ser quebrada, ela é consumida e, conseqüentemente, formam-se os dois gases resultantes da sua forma estrutural.

Para demonstração do processo de eletrólise da água termodinamicamente, utiliza-se a primeira lei para um sistema aberto (LIBERATO NETO, 2007), tal como:

$$Q - W = \Delta H$$

Onde Q é representado por calor, W o trabalho realizado e ΔH para a diferença de entalpia no sistema.

Sabendo que o único trabalho W é realizado a partir de energia elétrica em função do processo de separação da molécula ser através de eletrólise (LIBERATO NETO, 2007), pode-se considerara W como:

$$W = -n.F.E \quad (15)$$

Onde:

n = Número de elétrons transferidos;

F = Constante de Faraday (=23074 cal/volt equivalente)

E = Potencial elétrico [V]

Logo, substituindo a equação, tem-se:

$$E = \frac{\Delta H - Q}{n.F} \quad (16)$$

Considerando um processo isotérmico reversível onde não se tem perdas, o calor pode ser considerado como:

$$Q = T.\Delta S \quad (17)$$

Onde:

T = Temperatura

ΔS = Variação da entropia

Para se ter um resultado de potencial mínimo reversível necessário para realização do processo de eletrólise nas condições em que não há perdas, substituímos a equação de calor na equação de Energia (LIBERATO NETO, 2007), logo:

$$E_{rev} = \frac{\Delta H - T\Delta S}{nF} \quad (18)$$

Na equação resultante, o termo $(\Delta H - T\Delta S)$ segundo Gibbs é a variação de energia livre, sendo considerado como ΔG . Nas condições ambiente de pressão e temperatura (pressão de 1atm e 25 °C) consideramos $\Delta H = 68320 \frac{cal}{mol}$ e $\Delta G = 56690 \frac{cal}{mol}$ (LIBERATO NETO, 2007). Portanto, o potencial pode ser calculado através de:

$$E_{rev} = \frac{\Delta G}{nF} = volts \quad (19)$$

Porém, decorrente das perdas existentes no processo de eletrólise, o potencial é maior que o potencial reversível, uma vez que calculado sem perdas. Consequentemente, na equação em que n e F são constantes e considerados sob as mesmas condições de pressão e temperatura e concentração de eletrólito, ΔH é constante, Q varia junto ao E . Como o processo se torna irreversível, Q irá se reduzir a ponto que possa ser negativo quando a energia é perdida na forma de calor. No ponto em que $Q=0$, onde toda a energia necessária para o processo de eletrólise é suprida pela energia elétrica, o potencial pode ser chamado de voltagem termoneutra (LIBERATO NETO, 2007). Este novo potencial é representado por:

$$E_{termo} = \frac{\Delta H}{nF} = volts \quad (20)$$

Entretanto, o potencial a ser aplicado nos eletrodos, porém deve ser maior do que o calculado pela equação. Nessas condições, a energia elétrica sofre perdas na forma de calor, consequentemente aumentando as temperaturas dos eletrodos no eletrolisador (LIBERATO NETO, 2007).

Podemos calcular a voltagem de operação de um eletrolisador a partir de:

$$E = E_{rev} + Perdas \quad (21)$$

Na equação, as perdas podem ser atribuídas de diversas maneiras ao processo de eletrólise (LIBERATO NETO, 2007), logo:

$$Perdas = E_{anodo} + E_{catodo} + E_{tm} + IR \quad (22)$$

São elas:

E_{anodo} = Sobre-tensão de ativação do anodo;

E_{catodo} = Sobre-tensão de ativação do catodo;

E_{tm} = Sobre-tensão de transferência de massa;

IR = Sobre-tensão ôhmica (I é corrente e R é resistência da célula pertencente aos eletrólitos, eletrodo e terminais).

Considerado como “sobre-tensão” na eletroquímica, significa diferença de potencial elétrico do eletrodo com ação de corrente fluindo e sem a ação de corrente no estado de equilíbrio.

Pode-se calcular a eficiência da eletrólise convencional na célula (a cada par de eletrodos) a partir de:

$$\eta = \frac{\Delta H}{\Delta G + perdas} = \frac{E_{termo}}{E} \quad (23)$$

Sobre as condições ideais de operação (sem perdas ou processo reversível), a produção do hidrogênio ocorre com eficiência equivalente a 120% (condição teórica) e em condições de voltagem termoneutra a eficiência é de 100% (LIBERATO NETO, 2007).

2.5.4 Armazenamento de Hidrogênio

A produção e o armazenamento de hidrogênio são um dos desafios encontrados pelas empresas de energia, pois além de armazenar o gás em bom estado, deve ter uma segurança para manuseá-lo.

Sabendo que o hidrogênio tem a menor densidade no estado gasoso e o segundo ponto de ebulição dentro as substâncias conhecidas, faz com que se torne de difícil armazenagem tanto no estado gasoso quanto o líquido. Onde para armazenar ele no estado gasoso é necessário de um grande volume e pressão, enquanto no estado líquido necessita de uma armazenagem com sistemas de baixas temperaturas em torno de -253°C (GOMES, 2010).

Figura 7: Reservatório de gás de hidrogênio de alta pressão.



Fonte: Gomes (2012).

Apesar de sua baixa densidade de energia volumétrica, o hidrogênio possui uma maior relação energia-peso que em comparação com qualquer outro combustível. Uma desvantagem é o alto peso do tanque de armazenamento, consequentemente sendo maiores e mais pesados em relação aos de combustíveis como diesel e gasolina.

Em aplicações práticas, o hidrogênio pode ser armazenado em alta pressão, no estado líquido em contêineres criogênicos, ou quimicamente ligados a certos metais (hidretos metálicos). Já os sistemas estão cada vez se aproximando mais

quando comparamos com os reservatórios de gasolina, diesel, álcool comparando com a mesma quantidade de energia retida dentro deles.

Além do armazenamento em materiais sólidos, existem pesquisas para comprimir o hidrogênio a pontos de conseguir altíssimas pressões para serem efetivos em automóveis, é necessária uma pressão de aproximadamente 2x maior que pressões já testadas com a maioria dos protótipos, sua fabricação é contestada pela falta de segurança (GOMES, 2010).

3 METODOLOGIA

Para desenvolvimento do estudo, será realizada uma demonstração prática baseado em informações desenvolvidas neste estudo, o projeto é baseado em um sistema de geração de hidrogênio a partir de uma célula já dimensionada e desenhada por autor referenciado.

Para demonstração, o sistema possui um motor de moto (**item 6**), uma célula de produção do gás (**item 3**), um borbulhador (**item 4**) com função de filtro e para segurança da célula impedindo o retorno de chama em caso da faísca afetar a alimentação e retornar para o sistema, além disto, também é utilizado uma válvula antichama (**item 5**) utilizada em sistema de alimentação de carros na tubulação como método de segurança primário, deixando o borbulhador para uma método secundário em caso de retorno de chama. O sistema será inteiramente instalado em uma bancada adaptada para a instalação dos componentes, tendo também uma bateria para alimentação do sistema e um componente auxiliar da produção da célula que regula a corrente elétrica fornecida para controle de geração.

Figura 8: Circuito ideal para funcionamento do motor.



Fonte: Imagens ilustrativas retiradas da internet.

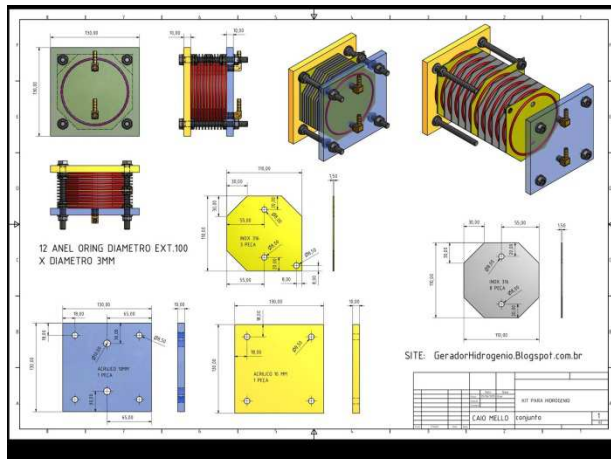
O sistema funciona a partir do acionamento manual de teclas, uma vez todo o sistema conectado a fonte de energia (bateria 12 V automobilística - **item 1**) tem-se chaves para liberar o funcionamento elétrico tanto do sistema de partida do motor quanto do controlador de corrente instalado na célula (**item 2**). Por questões de segurança, o sistema deve ser acionado somente quando for executar a demonstração de funcionamento, não podendo manter ligado o sistema de controle de corrente, pois uma vez em funcionamento, ele fornece a energia para célula que produz o gás e, posteriormente, sendo injetados para dentro do motor de maneira direta, sem armazenamentos.

A demonstração do funcionamento do sistema deve ser efetuada apenas em baixa rotação, por utilizar um protótipo, o objetivo é somente demonstrar o funcionamento e não potência e rotação desenvolvidas a partir dele, deverá somente funcionar em rotação mínima.

3.1 CÉLULA (GERADOR DE HIDROGÊNIO)

A célula construída para o sistema foi baseada no projeto do autor Caio Mello, por possuir o desenho técnico completo e promessa de funcionamento, foi adotada a utilização deste modelo, uma vez que sua produção é interna (Drycell) e possui uma área superficial de troca relativamente maior em relações a outros modelos pesquisados para esta tarefa.

Figura 9: Projeto da célula de geração de Hidrogênio.



Fonte: Projeto desenhado por Caio Mello.

3.2 BORBULHADOR

O borbulhador foi desenvolvido baseado em modelos disponíveis na internet, sendo de fácil fabricação e tendo uma função essencial no sistema, sendo necessária apenas uma garrafa pet, com furos e vedação interna para evitar que tenha perda de gás durante a transição do processo.

3.3 CONTROLADOR PWM

No processo de geração o controlador de corrente modelo PWM (Pulse-Width Modulation) de fabricação da empresa Droyd, tem uma função importante, pois com o controle da corrente enviada a célula de geração faz com que se tenha um determinado “controle” do fluxo do gás de geração e também pode interferir na qualidade da produção, uma vez que a produção efetuada em uma corrente elevada pode gerar vapor de água junto ao gás o que não seria ideal para o funcionamento do sistema. Para fins de demonstração, é utilizado o controlador de corrente.

Figura 10: Controlador PWM da marca Droyd.



Fonte: Adaptado do site da empresa Droyd.

3.4 MOTOR

No sistema, para demonstração do funcionamento do ciclo e comprovação do estudo, é utilizado um motor de moto onde o princípio de aspiração é por carburador, o motor foi escolhido por ser de fácil manuseio e por ser um sistema simples para demonstração, este motor é da fabricante Kenton, modelo 150 cilindradas, utilizado em motos.

3.5 MISTURA

Para a geração do hidrogênio dentro da célula de produção, é necessária a utilização de uma mistura que tenha um desempenho seguro e mais eficiente para o processo. No protótipo, é usada uma mistura em que a solução é desenvolvida a partir de 1 L de água destilada, misturada com 2 colheres de sopa (aproximadamente 30 g) de soda cáustica em escamas, tornando a solução altamente condutível eletricamente. Para o manuseio desses elementos, são utilizados os equipamentos de proteção individual EPI's (luvas, óculos de proteção,

máscara entre outros), pois a mistura oferece risco de queimaduras, em contato com os olhos pode causar cegueira e se ingerido pode causar até a morte.

3.6 BATERIA

Para alimentação do sistema é utilizado uma bateria de carro com tensão de 12 V e de corrente até 60 A da marca Moura. Para a utilização da corrente a fins de teste, a corrente máxima da bateria pode ser solicitada conforme necessidade exigida pelo controlador de corrente, podendo ser ajustado de 0 a 60 A.

3.7 VÁLVULAS, TUBULAÇÕES, CONEXÕES E FIOS

Para montagem do circuito, é necessária a ligação de componentes elétricos e hidráulicos. Os elétricos variam de fios, conexões e até interruptores, sendo eles emendados com estanho e isolados com fita isolante para eletricidade. No setor hidráulico do sistema, é montado a partir de mangueiras de ar pneumático, os quais podem suportar pressão e apresentam um manuseio prático, pois pode ser ligado a conectores rápidos facilitando a montagem do sistema por completo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para fins de resultados, a utilização do hidrogênio como combustível pode ser provada a partir do estudo de combustíveis, baseado em um estudo molecular, o hidrogênio tem um poder calorífico superior ao da gasolina conforme pode ser demonstrado na tabela:

Tabela 1: Poder calorífico dos combustíveis.

Tabela de comparação do poder calorífico dos combustíveis		
Combustível	Valor do Poder calorífico Superior a (25 °C e 1atm)	Valor do Poder calorífico Inferior a (25 °C e 1atm)
Hidrogênio	141,86 KJ/g	119,93 KJ/g
Metano	55,53 KJ/g	50,02 KJ/g
Propano	50,36 KJ/g	45,6 KJ/g
Gasolina	47,5 KJ/g	44,5 KJ/g
Gasóleo	44,8 KJ/g	42,5 KJ/g
Metanol	19,96 KJ/g	18,05 KJ/g

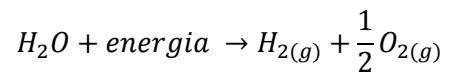
Fonte: Adaptada de Santos (2017).

Sendo um fator favorável para sua utilização, o princípio do motor ciclo Otto e Diesel dependem de um combustível que possa fornecer energia em forma térmica resultando em mecânica.

Além de sua capacidade térmica ser favorável, o hidrogênio pode ser utilizado de maneira semelhante ao já existente gás combustível GNV (Gás Natural Veicular) que pode ser armazenado e utilizado com um funcionamento equivalente a de outros combustíveis.

Uma das vantagens do hidrogênio em uma produção por eletrólise é que pode ser obtido a partir de um processo limpo, não havendo produtos ou reações que prejudicam o meio ambiente, uma vez que ele está presente na estrutura da água (H_2O) e, conforme Pedrollo, está em aproximadamente 75% de massa presente

no planeta, além disso, o gás resultante da combustão não é nocivo à natureza por resultar em água e oxigênio conforme pode ser representado pela reação química:



5 CONCLUSÃO

Pode-se concluir a partir deste estudo, que a utilização de hidrogênio como combustível para motores a combustão interna é uma possível solução para fornecimento de combustíveis paralelos sem exigência de recursos técnicos muito elaborados, o que pode tornar sua aplicação viável.

A viabilidade ainda pode ser testada através da comparação com outros combustíveis convencionais já existentes (principalmente gasolina, etanol e diesel), demonstrando por equações matemáticas que é possível fazê-lo adotando-se como parâmetros o poder calorífico, massa e relação da mistura ar-combustível, além dos custos inerentes.

Porém a viabilidade na aplicação a nível industrial é questionável, pois é necessária uma adequação com maior segurança para poder ser aplicado a automóveis, uma vez que seu armazenamento depende de reservatórios robustos para suportar pressão necessária para armazenamento.

Para a aplicação em automóveis, além de se utilizar um reservatório robusto, também é necessário se ter um dimensionamento diferenciado em relação a motores já projetados, pois o hidrogênio possui uma liberação de energia maior que outros combustíveis, gerando maiores temperaturas, também, por ser um gás, pode prejudicar componentes que dependem de lubrificação, tornando a vida útil de elementos utilizados com gasolina consideravelmente reduzida.

Através de um protótipo, com testes realizados em ambientes com segurança, notou-se o funcionamento utilizando hidrogênio, porém o motor não consegue atingir sua máxima potência por fatores ainda a serem estudados, alguns deles podem ser considerados como falta de fornecimento de gás, regulação na parte de carburação e até mesmo falhas no sistema de ignição.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como forma de complementação deste trabalho, tem-se como sugestões de trabalhos futuros uma análise mais detalhada da utilização do combustível em pauta, com enfoque em testes práticos com o hidrogênio, objetivando uma avaliação das viabilidades econômicas, rendimentos e impactos ambientais entre outros, questionando-se a viabilidade prática na atual realidade tecnológica, principalmente considerando o nosso país.

Para tanto, um estudo sobre as maneiras de geração do hidrogênio direcionando sua utilização para motores de combustão interna é um tema que pode complementar a pesquisa, despertando bastante interesse social, até como forma de industrialização de componentes separados ou kits para adaptação em motores de veículos e até mesmo em sistemas de geração de energia elétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BORGNAKKE, Claus e Richard E. Sonntag. **Fundamentos da termodinâmica**. 8.ed. Editora Edgard Blucher Ltda, 2013.

BRUNETTI, Franco. **Motores de combustão Interna**. 4.ed. Volume 2. São Paulo: Blucher, 2012.

CAVALCANTE, Kleber. **Entendendo o Motor de Um Carro**. Disponível em: <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/enetendendo-motor-um-carro.htm>>. Acesso em: 12 abr. 2017.

COSTA. G. Paulo. **Bíblia do Carro**. 2001 - 2002. Disponível em: <<http://www.oficinaecia.com.br/bibliadocarro/biblia.asp?status=visualizar&cod=5>> Acesso em: 12 abr. 2017.

CRUZ, E. Flavio da, **Produção de hidrogênio em refinarias de petróleo: Avaliação exergética e custo de produção**. São Paulo, [s.ed.], 2010.

FAGGI, Rodrigo. **Formação de mistura ar combustível em motores de ignição por faísca a quatro tempos**. São Caetano do Sul, SP, 2010. Disponível em: <<http://maua.br/files/monografias/formacao-de-mistura-ar-combustivel-em-motores-de-ignicao-por-faisca-a-quatro-tempos.pdf>> Acesso em: 10 mar. 2017.

FERGUSON, Colin R. **Internal combustion engines: applied thermodynamics**. Colin R. Ferguson, Allan T. Kirkpatrick, 2001.

FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. **Funcionamento do Motor de Combustão**. *Brasil Escola*. Disponível em: <<http://brasilecola.uol.com.br/quimica/funcionamento-motor-combustao.htm>>. Acesso em: 15 abr. 2017.

GOMES H. Emilio, **Brasil H2 fuelcellenergy**. Disponível em: <http://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/celula_combustivel/armazenamento_de_hidrogenio.html>. Acesso em: 07 mai. 2017.

INMETRO. 2007. **Sistema Internacional de Unidades-SI**. 8.ed.rev. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, 2007. 114p.

LIBERATO NETO, Roberto. **Geração e Combustão do Hidrogênio obtido através do Processo de Eletrólise da Água**. São Paulo: USP, 2007. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2007/Artigos/Art_TCC_018_2007.pdf>. Acesso em: 05 set. 2017.

MARTINS, Jorge. **Motores de combustão interna**. 2.ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2006.

MELLO, Caio. **Projeto gerador de hidrogênio**. 2015. Disponível em: <<http://geradorhidrogenio.blogspot.com.br/2015/06/medidas-para-montar-gerador-de.html>>. Acesso em: 17 jul. 2016.

MOREIRA, Antonio. **Estequiometria – Preparação da mistura ar combustível**, 2015. Disponível em: <<http://docslide.com.br/documents/estequiometria-preparacao-da-mistura-ar-combustivel.html>>. Acesso em: 12 abr. 2017.

PEDROLO, Caroline. **Hidrogênio**. Unifra, 2014. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/elementos-quimicos/hidrogenio/>> Acesso em: 04 abr. 2017.

PENIDO FILHO, Paulo. **Os motores a Combustão Interna**. Diadema-SP: Editora Lemi, 1983.

PUC-RS. **Vestibular Inverno**. 2010. Disponível em: <<http://hupples.com/questoes/1000017/puc-rs-inverno-2010/questao-7>> Acesso em: 10 jun. 2017.

SANTOS, Fernando Miguel S. M. dos. **O Combustível “Hidrogênio”**. Disponível em: <<http://www.ipv.pt/millennium/millennium31/15.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2017.

SCHMIDT, Richard J.; BORESI, Arthur P. **Estática**. São Paulo: Pioneira Thompson Learning Ltda, 2003. p. 674.

SOQ: Portal de Química. **Tipos de Reações Químicas**. 2017. Disponível em: <<http://www.soq.com.br/conteudos/ef/reacoesquimicas/p2.php>>. Acesso em: 10 jun. 2017.

TODA MATÉRIA. **Reações Químicas**. 2011. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/>>. Acesso em: 10 jun. 2017.

VARALLE, Carlos Alberto Alves. **Estimativa da potência dos motores de combustão interna**. UFRJ, 2010. Disponível em: <http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT154_motores_e_tratores/Aulas/estimativa%20da%20potencia%20dos%20motores.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2017.