



Universidade Federal do Espírito Santo
Centro Tecnológico
Departamento de Engenharia Mecânica

PEDRO JOSÉ VIEIRA DAMASCENA
VÍTOR ZONTA DE GOÉS

VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE HIDROGÊNIO PRODUZIDO “*IN SITU*” EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Vitória
2013

PEDRO JOSÉ VIEIRA DAMASCENA
VÍTOR ZONTA DE GOÉS

VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE HIDROGÊNIO PRODUZIDO “*IN SITU*” EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico. Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Guilherme Comineli.

Vitória
2013

DAMASCENA, Pedro José Vieira.

DE GÓES, Vítor Zonta

Viabilidade técnica da utilização de hidrogênio produzido “in situ” em motores de combustão interna; Pedro José Vieira Damascena, Vítor Zonta de Góes – 2013. 69f.

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Guilherme Comineli

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. HIDROGÊNIO. 2. MOTORES. 3. COMBUSTÃO INTERNA. I. DAMASCENA, Pedro José Vieira; II. DE GÓES, Vítor Zonta; III. Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica; IV. Viabilidade técnica da utilização de hidrogênio produzido “in situ” em motores de combustão interna.

PEDRO JOSÉ VIEIRA DAMASCENA
VÍTOR ZONTA DE GOÉS

VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE HIDROGÊNIO PRODUZIDO “*IN SITU*” EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Projeto apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de graduado em Engenharia Mecânica.

Aprovado em maio de 2013.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Osvaldo Guilherme Comineli
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Elias Antônio Dalvi
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Juan Sérgio R. Saenz
Universidade Federal do Espírito Santo

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus por nos dar forças e sabedoria para chegarmos até aqui. Devemos graças a nossos pais por nos proporcionarem o estudo, muitas vezes em detrimento de seus próprios sonhos. Essa vitória é tão nossa quanto de vocês. Àquelas que amamos, Laís e Menala, obrigado por entenderem e nos apoiarem neste período difícil. Vocês foram fundamentais na realização dessa etapa. Aos nossos professores, em especial ao Osvaldo Comineli, muito obrigado por acreditarem em nosso potencial e dedicarem o tempo de vocês a nos ensinar a engenharia.

RESUMO

Este trabalho propõe estudar a viabilidade da utilização do hidrogênio como substituto aos combustíveis convencionais em motores de combustão interna. Como o tema ainda é pouco difundido no Brasil é feita uma revisão bibliográfica sobre o tema focando em artigos estrangeiros. É realizada também avaliação da produção de hidrogênio por eletrólise, incluindo a fabricação de dispositivo pra produção desse gás com materiais cotidianos. É feita também análise econômica da produção de hidrogênio por reação de base alcalina, água e alumínio.

Palavras-Chave: Hidrogênio, Motores, Combustão interna.

ABSTRACT

This paper proposes to study the feasibility of using hydrogen as a substitute for conventional fuels in internal combustion engines (ICE). As the issue is still not widespread in Brazil is made a literature review on the topic focusing on foreign articles. It also performed evaluation of hydrogen production by electrolysis, including manufacturing device for production of this gas with everyday materials. It also made economic analysis of hydrogen production by reaction of alkali, water and aluminum.

Key Words: Hydrogen, Engine, Internal combustion

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relação entre a razão equivalente combustível / ar e emissões de NOx em operação homogênea (Wallner et al., 2009)	22
Figura 2 - Potência teórica de um motor com operação PFI a hidrogênio comparado com operação estequiométrica a gasolina em função da razão equivalente e pressão adotada (Verhelst et al., 2009).....	22
Figura 3 - Esquema de diferentes estratégias para Injeção Direta (Wallner et al., 2009)	22
Figura 4 - Emissões típicas de NOx para operação de ID de hidrogênio (Wallner et al., 2006)	22
Figura 5 - Comparação do indicativo de pressão efetiva (IMEP) entre operação PFI de gasolina e hidrogênio e também operação ID de hidrogênio (Eichlseder et al., 2003)	30
Figura 6 - Representação do experimento para se obter o desempenho de motores com Injeção Direta a Hidrogênio (Mohammadi et al., 2006)	41
Figura 7 - Efeitos do tempo de injeção e_j ($^{\circ}$ APMS) com a eficiência térmica η_e , o aumento máximo da taxa de pressão $(dp/d\theta)_{max}$, o tempo de ignição e_i e emissões de NOx para diferentes razões combustível / ar (Mohammadi et al., 2006)	42
Figura 8 - Representação do experimento para se obter o desempenho em motores de ignição por compressão com Injeção Direta a Hidrogênio (Gomes et al., 2009)	44
Figura 9 - Emissões de NOx para operação com hidrogênio como combustível e diesel (Gomes et al., 2009)	45
Figura 10 - Esquema construtivo do dispositivo de produção de hidrogênio por eletrólise...	47
Figura 11 - Detalhe do dispositivo de eletrólise construído, acoplado à tampa do recipiente hermético que continha água e eletrólito.....	49
Figura 12 - Dispositivo de eletrólise por placas montado..	49
Figura 13 - Dispositivo de reação de sucata de alumínio, água e soda cáustica comercial..	52
Figura 14 - Figura ilustrativa da moto utilizada no experimento...	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Constituintes médios do gasogênio (EMBRAPA, 1983)	22
Tabela 2 - Densidade de energia teórica de um motor movido a hidrogênio, metano e isooctano (Verhelst et al., 2009)	19
Tabela 3 - Resultados experimentais da análise de motor de ignição por compressão (Gomes et al., 2009)	45
Tabela 4 - Materiais utilizados no experimento	48
Tabela 5 - Comparação do poder calorífico do hidrogênio com outros combustíveis	53
Tabela 6 - Propriedades físicas e preços médios dos reagentes e produtos da reação	54
Tabela 7 - Comparação do custo da substituição dos combustíveis convencionais pelo hidrogênio.....	55
Tabela 8 - Especificações técnicas do motor utilizado no experimento	57

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1. ENERGIA	8
1.2. MOTIVAÇÃO DO ESTUDO	9
1.3. O HIDROGÊNIO.....	11
1.4. HISTÓRICO: DO GASOGÊNIO ÀS CÉLULAS COMBUSTÍVEIS	12
1.5. PROPOSTA DE TRABALHO.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRAFIA	15
2.1. HIDROGÊNIO EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	15
2.2. FORMAÇÃO DA MISTURA E ESTRATÉGIAS NO USO DO HIDROGÊNIO	18
2.2.1. Fundamentos tecnológicos	18
2.2.2. Mistura combustível-ar	18
2.2.3. Compressão do hidrogênio	20
2.2.4. Ignição por centelha com formação de mistura externa	21
2.2.5. Ignição por centelha com formação de mistura interna (Injeção Direta) ..	26
2.2.6. Ignição por compressão com formação de mistura interna (Injeção Direta)	32
2.3. COMBUSTÃO ANORMAL.....	34
2.3.1. Pré-ignição	35
2.3.2. Combustão contrária	36
2.3.3. Autoignição	36
2.4. PROJETOS OU CONVERSÃO DE MOTORES.....	37
2.4.1. Velas de ignição	37
2.4.2. Sistema de injeção	38
2.4.3. Lubrificação	38
2.4.4. Taxa de compressão	39
2.4.5. Hidrogênio em combinação com outros combustíveis	39
2.5. DESEMPENHO DO USO DE HIDROGÊNIO EM MOTORES.....	40
2.5.1. Motores de Combustão por Centelha	40
2.5.2. Motores de Combustão por Compressão	43
3. PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO - EXPERIMENTOS	46
3.1. PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO POR ELETRÓLISE	46
3.1.1. Experimento por eletrólise	47
3.2. PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO POR REAÇÃO QUÍMICA DE BASE ALCALINA, ÁGUA E ALUMÍNIO	51

3.2.1. Viabilidade econômica da produção de hidrogênio por reação de alumínio, água e base alcalina.....	52
3.2.2. Discussão	55
4. COMENTÁRIOS FINAIS E SUGESTÕES	57
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENERGIA

Energia é um conceito abstrato e que mesmo fazendo parte do cotidiano de toda a humanidade é ainda encarado de forma complexa e difícil de definir. Energia é uma quantificação que pode ser atribuída a cada partícula, objeto ou sistema e é consequência do estado desses entes (Harper, 2007). Pode ainda ser apresentada de diversas formas como potencial, cinética, térmica ou sonora. Porém o mais importante é que esses estados podem ser convertidos um em outro mantendo o montante, e essa é a premissa da Primeira Lei da Termodinâmica.

A conversão de uma forma de energia em outra é uma necessidade básica da humanidade e da natureza. Constantemente o corpo humano está consumindo energia dos alimentos e possibilitando movimento ao corpo, as plantas quando realizam a fotossíntese também são exemplos puros da necessidade vital da natureza em converter formas de energia para manutenção da vida. As economias dos países também são fundamentadas em obtenção de energia, afinal a produção industrial e até o padrão de vida de cada nação está diretamente relacionado com a quantidade per capita de energia consumida (Goldberg, 1998).

A matriz energética global está fundamentada em derivados de petróleo e apesar da aparente abundância desse recurso, o esgotamento das reservas mundiais já tem previsão de acontecer. Estudos recentes mostram que temos apenas 40 anos de suprimento de petróleo considerando os padrões de consumo (BP Sustainability Report, 2004). Algo em torno de 81% da energia que consumimos é oriunda de combustíveis fósseis (AIE – Demanda de energia Primária, 2008). E mais importante ainda que a escassez do petróleo são os problemas ambientais ocasionados por sua utilização. Grande concentrações de CO_x e NO_x na atmosfera, oriundos da atividade antropológica, e em destaque a queima de combustíveis fósseis, tem sido indicado pelos especialistas como responsáveis por potencializar o efeito estufa da atmosfera (Conti, 2005). Este efeito é um fenômeno natural no qual os raios solares atravessam a atmosfera e rebatem sobre a superfície da Terra, em que parte do calor fica aprisionado pela camada de gases que paira sobre o planeta. Sem isto, a Terra seria gelada, sem condições de manter os seres vivos tal qual se conhece. E

graças a isso a temperatura do planeta tem se mantido relativamente constante durante séculos. Dessa forma, os incrementos cada vez mais acentuados na temperatura média global têm sido atribuídos a essas emissões poluidoras. As consequências disso são o degelo das calotas polares, desequilíbrio do regime pluviométrico, estações climáticas com características alteradas, elevação do nível dos oceanos etc (Azuaga, 2000; Conti, 2005).

1.2. MOTIVAÇÃO DO ESTUDO

Motores de combustão interna são largamente utilizados em veículos e são projetados para usar como fonte energética, principalmente, combustíveis de origem fóssil. A gasolina, o álcool, o diesel e mais recentemente o gás natural movimentam praticamente toda a frota global tanto de veículos leves quanto pesados.

Grande parte do esforço no desenvolvimento de tecnologias no mercado da mobilidade tem sido voltada para aplicações de novas fontes energéticas em substituição à atual matriz, e também no projeto de motores mais eficientes capazes de utilizar menores quantidades de combustível para auferir os mesmos níveis de potência dos utilizados atualmente. Em suma, fontes alternativas de energia são qualquer uma que não as tradicionais de matriz fóssil. Diversas formas de obtenção de energia não convencionais têm sido discutidas e pesquisadas, porém as mais comumente citadas são a eólica, solar, hidrelétrica, biomassa e célula combustível.

Quando de sua primeira concepção comercial em meados do século XVII os motores de combustão interna registravam baixo rendimento. Os motores mais modernos elevaram os níveis de rendimento em torno de dez vezes, porém ainda insuficiente para atender as urgentes demandas de redução de emissões poluentes estabelecidas em convenções internacionais.

Em outubro de 2012 foi assinado pelo Governo Federal decreto do Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores - INOVAR-AUTO. Esse programa tem por finalidade promover o desenvolvimento tecnológico do setor automobilístico nacional determinando uma série de metas as quais as empresas que aderirem deverão cumprir. Dentre elas destaca-se a produção de motores mais eficientes que deverão atender a limites

decrecentes de consumo energético até 2017. Em contrapartida o Governo Federal propiciará financiamentos e incentivos fiscais às empresas aderentes.

Estudos comprovam que os veículos automotores (veículos leves, pesados e motos) correspondem a até 94% das emissões de CO e 65% das emissões de SO_x nos centros urbanos (Cetesb, 1999; Azuaga, 2000). Assim, se forem propostas soluções para essa problemática as metas de redução de emissão de poluentes acordadas entre nações nas convenções climáticas serão atingidas de maneira mais eficaz.

Na conferência sobre o clima Rio +20 realizada também em 2012 no Rio de Janeiro foram discutidas diversas propostas para mitigação das mudanças climáticas que vem sendo observadas na Terra. Apesar da presença de dezenas de chefes de estado, ao final do encontro poucas foram as soluções práticas acordadas. Porém uma discussão importante trata dos meios de transporte. Por vezes o carro elétrico tem sido colocado como solução para os carros movidos a motores de combustão. Mas, deve ser observado que não apenas a queima direta de combustível é responsável por emissões poluidoras. O descarte dos pneus, o ciclo de produção industrial dos carros e da energia que o movimenta deve ser observado. A produção industrial de energia limpa utilizando diferentes formas de geração para os mais diversos usos deve ser encarada como prioridade.

Energia Solar é bastante disponível, limpa e com baixo custo operacional, porém depende de elevados custos de instalação, considerando também um sistema de armazenamento da energia produzida durante o dia para uso noturno (Santos et al., 2008). Energia eólica também é muito eficiente no quesito ambiental, porém ao analisar a efetiva conversão de energia do vento em elétrica o percentual fica algo entorno de 35%. A biomassa tem grandes benefícios sobre os combustíveis fósseis por poder aproveitar material que seria descartado e muitas vezes poluentes como fezes de animais, na produção de energia. Porém, trata-se basicamente da queima direta desse material, ou dos gases provenientes dele em processos orgânicos. Dessa forma emissões de poluentes continuam a ser um problema. O Biodiesel também apresenta suas limitações para ser considerado como solução energética. Por ter como origem óleos vegetais pode ocorrer elevação dos preços de alimentos quando essa produção for destinada para a fabricação de combustíveis (Santos et al., 2008).

Muito se tem discutido sobre o hidrogênio como fonte alternativa de energia (Ylmaz, 2010; Kahraman, 2005; dos Santos et al., 2003). Trata-se do elemento mais abundante conhecido e de grande potencial energético devido suas características de inflamabilidade associada à baixa energia de ignição e difusividade.

Considerando os argumentos de projeção de esgotamento das reservas petrolíferas mundiais, os impactos ambientais atribuídos ao uso do combustível fóssil como matriz energética e a crescente demanda por energia, investir em uma demanda alternativa de energia tornou-se uma decisão inadiável para os governos do mundo inteiro.

Sendo assim observou-se que seria necessária uma saída mais direta e quase que imediatista e que pudesse envolver toda essa massa de veículos que já compõe a frota mundial e funciona com motores de combustão interna.

Esse trabalho propõe uma solução intermediária entre os motores de combustão interna atuais e os carros movidos a células combustíveis.

1.3. O HIDROGÊNIO

O hidrogênio é um caso particular na natureza. É o elemento químico de menor densidade e o mais abundante do universo, e apesar disso na terra apresenta-se prioritariamente em compostos químicos como hidrocarbonetos e água. Em forma de gás é extremamente raro na atmosfera, pois devido a sua pequena densidade, escapa mais facilmente da atmosfera que elementos mais pesados. Ele pode se estabilizar de duas formas: ou recebendo um elétron por intermédio de ligação iônica com um elemento da família ou grupo dos metais, ou compartilhando um elétron, por intermédio de ligação molecular, com outro elemento da família ou grupo dos não metais. A ligação com o oxigênio é dada pela segunda forma descrita.

Hidrogênio na forma molecular (H_2) pode ser comercialmente produzido a partir de eletrólise da água e por gaseificação do carvão, mas também pode ser produzido por vários métodos, tais como a decomposição termoquímica da água e foto-

eletrólise solar, embora estes estejam atualmente em fase de desenvolvimento (Saravanan e Nagarajan, 2008).

1.4. HISTÓRICO: DO GASOGÊNIO ÀS CÉLULAS COMBUSTÍVEIS

O uso do hidrogênio como combustível para ser utilizado em motores de combustão não é um tema que começa a ser discutido na atualidade. No início do século 20 uma grande frota de carros, tratores e ônibus eram movidos a gasogênio. Esse período coincide com o período das grandes guerras, quando houve grande escassez de diversos insumos para a população haja vista que foram desviados para fins militares. Estima-se que até o final dos anos de 1945 existiam cerca de 700 mil veículos movidos a gasogênio na Europa (Embrapa, 1983). Em 1940, no Brasil, o Presidente Getúlio Vargas baixou um decreto instituindo a Comissão Nacional do gasogênio, com a função de promover, incrementar e facilitar o uso do gasogênio nos motores de explosão em tratores, automóveis e instalações fixas.

O gasogênio é produzido por dispositivo capaz de realizar a combustão incompleta de combustíveis sólidos tendo como produto gases que ainda poderiam servir como fonte de energia. O equipamento baseava-se em promover a queima de madeira, carvão, óleo e outros com oxigênio insuficiente para que a combustão fosse completa. Os gases combustíveis resultantes desse processo tem a composição média de acordo com a Tabela 1, abaixo:

Tabela 1 - Constituintes médios do gasogênio (EMBRAPA, 1983)

Constituinte	Porcentagem
Monóxido de Carbono (CO)	23%
Hidrogênio (H ₂)	15%
Metano (CH ₄)	2%
Dióxido de Carbono (CO ₂)	10%
Nitrogênio (N ₂)	50%

Porém, dessa mistura apenas o Monóxido de Carbono, o Hidrogênio e o Metano são combustíveis. E o poder calorífico da mistura final varia de acordo com o combustível do qual foi originado.

O desenvolvimento dessa tecnologia foi esvaído com o fim da Segunda Grande Guerra, quando a exploração do petróleo foi intensificada e a queda de preços fez com que novamente os derivados do petróleo fossem priorizados.

Atualmente, a tecnologia que vem sendo mais estudada e que deve despontar no futuro como a solução energética de utilização do hidrogênio, são as células de combustível a hidrogênio. Esse equipamento funciona como pequena fonte geradora de energia elétrica, porém está em fase de desenvolvimento e os custos ainda são muito elevados inviabilizando sua utilização em massa, apesar de diversas montadoras terem apresentado recentemente protótipos de carros elétricos movidos a esse tipo de fonte energética.

1.5. PROPOSTA DE TRABALHO

Ao final desse trabalho almeja-se criar embasamento técnico para o desenvolvimento nacional do estudo da utilização do Hidrogênio como alternativa aos combustíveis atuais em motores de combustão interna. Pretende-se também: i) criar bancada de ensaio de produção de hidrogênio por eletrólise e compara parâmetros medidos com os encontrados na bibliografia; ii) ser um guia para desenvolvimento de experimentos em laboratório na utilização e produção de hidrogênio; iii) fazer revisão bibliográfica do tema de artigos estrangeiros; iv) elaborar estudo de viabilidade econômica da utilização de alumínio e base alcalina para produção de hidrogênio em substituição aos combustíveis convencionais.

Para estudantes de engenharia esse trabalho se coloca como ponto de partida para o desenvolvimento de estudos voltados tanto para a produção de hidrogênio quanto para os efeitos desse combustível em motores de combustão interna convencionais.

Propõe-se com esse trabalho uma alternativa para contornar o problema do alto custo envolvido na utilização das células combustíveis, e ainda assim se beneficiar da utilização do hidrogênio como substituto para os combustíveis fósseis, propomos

que esse gás seja queimado na câmara de combustão. Vislumbram-se duas possibilidades para sua utilização: consorciando o hidrogênio aos combustíveis fósseis, reduzindo a dependência da fonte energética orgânica ou mesmo como único combustível havendo a possibilidade de eliminar qualquer necessidade de combustíveis oriundos da cadeia do petróleo, considerando as formas de produção alternativas de hidrogênio.

Uma saída imediata para a utilização do hidrogênio seria a instalação de um cilindro de gás hidrogênio nos carros, assim como foi feito com o GNV. Porém essa hipótese foi descartada devido aos cuidados necessários na guarda de hidrogênio pressurizado, como seu grande potencial explosivo e sua baixíssima massa específica, que faz com que seja necessário enormes volumes para o armazenamento de uma quantidade necessária para se obter autonomia razoável em carros.

Esse trabalho foca na proposta de que o hidrogênio deve ser produzido in loco, não havendo assim a necessidade armazenamentos. Serão abordadas duas formas de produção: por meio da eletrólise e por meio da reação de base alcalina, alumínio e água.

Será testado também se um motor de motocicleta convencional de 125 cc pode funcionar com esse combustível sem quaisquer alterações de projeto, apenas injetando-se o hidrogênio gasoso no carburador. As consequências aos equipamentos, bem como as possíveis modificações necessárias ao motor serão supostas ou abordadas apenas de forma qualitativa.

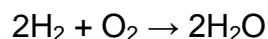
2. REVISÃO BIBLIOGRAFIA

2.1. HIDROGÊNIO EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Hidrogênio vem sendo observado como um combustível alternativo para os motores de combustão interna utilizados atualmente, principalmente os de automóveis. Recentes aumentos no preço do petróleo junto a outros fatores como aumento da emissão de gases poluentes e a restrição cada vez maior das leis ambientais são os principais motivos do uso de Hidrogênio em células combustíveis e motores de combustão interna. Especialistas acreditam que o uso de Hidrogênio como combustível para diversos setores de transporte vai se tornar realidade dentro de algumas décadas (Mohammadi et al., 2006).

Atualmente, o desenvolvimento do Hidrogênio encontra diversas barreiras, como falta de uma infraestrutura, dificuldades de armazenamento que fazem com que o hidrogênio seja menos eficiente quando comparado com outros combustíveis fósseis utilizados. Entretanto, as vantagens oferecidas pelo Hidrogênio são suficientemente significativas para estudá-lo.

Hidrogênio é reconhecido há muito tempo como um combustível com boas propriedades, para aplicação como combustível em motores. A grande presença de Hidrogênio na natureza e os baixos poluentes resultantes de sua queima fazem com que ele seja atrativo. Somando-se a isso, hidrogênio é não tóxico, inodor e apresenta uma combustão completa. Quando há queima de Hidrogênio, o único resultado é vapor d'água, exceto pela formação de NOx. (King e Rand, 1955).



Devido às características citadas acima, pesquisadores tem focado seus esforços no uso de hidrogênio como um combustível alternativo em motores de combustão interna (ICEs - internal combustion engines) e no desenvolvimento de células combustível em Veículos Híbrido-Elétricos (VHEs) (Yilmaz,2010). Hidrogênio pode ser usado como combustível solo em motores de ignição por centelha (SI - spark ignition), tanto por carburador ou por injeção direta (Das, 2002). Em motores com ignição por compressão (IC), entretanto, apesar de possível o uso do hidrogênio como combustível solo, apresentam alguns problemas, que serão relatados a seguir.

O hidrogênio tem uma velocidade de chama que pode ser mais de cinco vezes maior do que os combustíveis de hidrocarbonetos. Além disso, ele tem um baixo limite de inflamabilidade (mistura em que chama não irá propagar devido ao excesso de ar) de $\Phi = 0,1$ (razão equivalente), muito menor do que o limite teórico da gasolina ($\Phi = 0,6$). Teoricamente, é possível estender o limite de inflamabilidade para combustíveis de hidrocarbonetos, líquido ou gasoso, com a adição de uma pequena quantidade de hidrogênio. A razão equivalente, Φ , é definida como:

$$\Phi = \frac{\left[\frac{\text{Massa de combustível}}{\text{Massa de ar}} \right]_{\text{real}}}{\left[\frac{\text{Massa de combustível}}{\text{Massa de ar}} \right]_{\text{estequio}}}$$

Operando com excesso de ar assegura-se uma combustão mais completa, melhora a eficiência e resulta em uma diminuição dos picos de temperatura, o que auxilia na redução das emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) ao eliminar também os problemas geralmente associados com a operação de misturas pobres (Jingding et al, 1998). Em segundo lugar, a maior velocidade de chama aumenta a taxa de combustão da mistura diminuindo as variações ciclo-a-ciclo (Apostolescu e Chiriac, 1996). O hidrogênio tem uma maior difusividade em relação aos combustíveis de hidrocarbonetos, o que melhora a mistura, aumenta a turbulência e aumenta a homogeneidade da carga. A menor necessidade de energia de ignição do hidrogênio garante ignição rápida e facilita a partida a frio.

A capacidade dos motores de combustão interna a hidrogênio (H₂ICEs) em operar com quase zero de emissões deve-se primeiramente ao efeito conjunto de duas características únicas do hidrogênio: i) primeiramente, NOx são as únicas emissões indesejáveis do motor, formadas pela dissociação térmica e oxidação de N₂ presente no ar atmosférico durante a combustão, e ii) o baixo limite de inflamabilidade do hidrogênio permite uma combustão estável em condições altamente diluídas. O efeito conjunto é que durante uma baixa operação, temperaturas de combustão são suficientemente baixas de modo que as taxas de formação de NOx são muito pequenas e as emissões do motor ficam perto de zero (Das, 1991). A capacidade de

operar de forma eficiente é em grande parte devido a ii, pois operação estacionária do motor é possível em cargas baixas.

As únicas características de combustão do hidrogênio que permitem a operação limpa e eficiente em cargas baixas do motor apresentam dificuldades em cargas elevadas de operação do motor. Aqui, as baixas energias de ignição da mistura hidrogênio-ar causa combustão não programada, e as elevadas temperaturas de combustão de misturas perto da composição estequiométrica levam a um aumento na produção de NOx. Ambos os efeitos, na aplicação prática, limitam as densidades de energia dos H₂ICEs. Recentes pesquisas nesta área mostram que o progresso nesta frente é o desenvolvimento de avançados motores a hidrogênio com melhores densidades de energia e emissões reduzidas de NOx em cargas elevadas do motor (White et al., 2006). Alguns pesquisadores testaram os motores a diesel, utilizando o hidrogênio como combustível único, no entanto, era muito difícil de operar um motor a diesel com hidrogênio apenas através do aumento da taxa de compressão, devido à sua alta temperatura de autoignição. Portanto, vela de ignição ou bujão é frequentemente utilizado. Para os motores a hidrogênio de ignição comandada, os problemas que devem ser superados são Detonação, Pré-ignição e emissões de NOx (Lee et al., 2001).

Vários estudos têm mostrado que, se misturas são baixas e o ponto de ignição é retardado, emissões de NOx podem ser reduzidas a um ponto abaixo da combustão de combustíveis de hidrocarbonetos normais (Jingding et al., 1998). Motores alimentados com hidrogênio sofrem de potência reduzida, devido, principalmente, ao baixo poder calorífico do hidrogênio em termos de volume e também a fraca mistura de operação. Por conseguinte, a massa do ar de entrada é reduzida para qualquer dimensão do motor, enriquecendo a mistura e aumentando a potência de saída.

2.2. FORMAÇÃO DA MISTURA E ESTRATÉGIAS NO USO DO HIDROGÊNIO

2.2.1. Fundamentos tecnológicos

O amplo intervalo de limites de ignição do hidrogênio permite com que motores sejam operados com uma pequena razão combustível / ar quando comparado com combustíveis convencionais. Estudos foram publicados usando tanto uma mistura estequiométrica quanto uma mistura pobre de combustível-ar. Os maiores avanços da mistura estequiométrica combustível-ar foi o aumento da potência de saída quando comparado a pequenas razões de combustível / ar, e também o fato de que sistemas de tratamentos podem ser usados para diminuir as emissões de NOx. Por outro lado, misturas pobres de combustível-ar têm chegado a melhores resultados de eficiência nos motores.

Considerando também que a temperatura de autoignição do hidrogênio é consideravelmente superior a dos combustíveis convencionais ($H_2 = 585^\circ C$, diesel é de aprox. $250^\circ C$), o que sugere o uso de uma ignição por centelha como fonte de ignição, entretanto pesquisas foram feitas para operação de motores a hidrogênio com ignição por compressão. Operações bem sucedidas de motores de ignição por compressão a hidrogênio têm sido relatadas tanto para motores estacionários de grande cilindrada (Osafune et al., 2004), bem como para motores de automóveis (Heindl et al., 2009).

2.2.2. Mistura combustível-ar

O projeto adequado do processo de formação da mistura combustível-ar é crucial para alcançar altas eficiências do motor enquanto atende os limites de emissão de poluentes. Similar aos motores alimentados convencionalmente, motores a hidrogênio passaram por melhoria contínua e refinamento em termos de estratégias de formação da mistura.

Uma primeira classificação de formação da mistura pode ser feita se baseando no local de formação da mistura ou no local dos dispositivos de dosagem do hidrogênio. Formação de mistura externa se refere ao conceito de que o hidrogênio e ar são

misturados fora da câmara de combustão, enquanto que a formação de mistura interna se refere à introdução direta de hidrogênio na câmara de combustão. Como indicado na Tabela 2, a estratégia de formação da mistura, especialmente em funcionamento a hidrogênio, tem um impacto significativo sobre a potência de saída do motor. A grande diferença na potência de saída é causada principalmente pela baixa densidade de hidrogênio, o que resulta numa diminuição significativa da densidade da mistura quando a formação de mistura externa é usada.

Tabela 2 - Densidade de energia teórica de um motor movido a hidrogênio, metano e isooctano (Verhelst et al., 2009)

	Hydrogen	Methane	Iso-octane
PFI	86 %	92 %	100 %
DI	119 %	100 %	100 %

Utilizando uma classificação baseada no controle de tempo e na quantidade de combustível introduzido, é possível diferenciar os sistemas que usam carburadores, dispositivos de injeção mecânica controlada e dispositivos de injeção eletronicamente controlada. Motores modernos de combustão a hidrogênio usam quase que exclusivamente sistemas de injeção de combustível controlados eletronicamente, no entanto, os requisitos e especificações para esses sistemas mudam amplamente com base na localização da injeção e na temperatura do combustível injetado. Normalmente, os sistemas de injeção com formação de mistura externa hidrogênio-ar são operados a pressões mais baixas de injeção (2 - 8 atm) em comparação com os sistemas de injeção direta de hidrogênio (5 - 250 atm). Além disso, a exposição dos injetores nas temperaturas e pressões dos cilindros do motor em combinação com o aumento das pressões de injeção para a formação de misturas internas, ainda exige o desenvolvimento de injetores para atingir padrões de produção em termos de durabilidade (Welch et al., 2008). Pesquisa e desenvolvimento também têm sido realizados para formação de mistura externa com hidrogênio criogênico (Hallmannsegger, 2005; Heller et al., 2006; Ellgas, 2008) impondo desafios para o sistema de injeção, devido a temperaturas extremamente baixas (temperatura de ebulição do hidrogênio é de aproximadamente - 253 °C).

Finalmente, uma classificação baseada na homogeneidade da mistura resultante ou pretendida permite agrupar motores de combustão a hidrogênio em misturas homogêneas ou estratificadas. Devido ao período de tempo relativamente longo disponível para a mistura de combustível e ar, a mistura externa pode ser considerada homogênea. No entanto, as características na formação de mistura interna com injeção de combustível diretamente na câmara de combustão, permitem influenciar a distribuição da mistura e sua homogeneidade. Isto pode servir para reduzir a duração da combustão e melhorar a sua estabilidade em condições de misturas extremamente pobres, ou para evitar emissões de NOx em razões críticas de combustível / ar com a criação propositalmente de zonas pobres e ricas.

As duas estratégias de injeção de mistura mais usadas para motores a hidrogênio são as citadas anteriormente. Formação de mistura externa está sendo usado na pesquisa de motores e em testes com veículos, e a injeção direta de hidrogênio, ainda está em fase de desenvolvimento e já apresenta melhores resultados. A seguir foram resumidas as características mais típicas e variações destes conceitos de formação da mistura. Porém, primeiramente é importante entender sobre os custos de energia do fornecimento de hidrogênio em baixa pressão ou em alta pressão.

2.2.3. Compressão do hidrogênio

Introdução de hidrogênio para dentro do motor, tanto no coletor de admissão ou diretamente para a câmara de combustão, requer um fluxo de hidrogênio a ser fornecido numa pressão estabelecida. A maneira mais eficiente de fornecer a pressão necessária depende do tipo de armazenamento a bordo, bem como os níveis de pressão necessários para a injeção. Com armazenamento de hidrogênio comprimido a níveis de pressão de até 700 atm, pressão suficiente mesmo para sistemas de injeção de alta pressão de funcionamento, pressões superiores a 100 atm estarão disponíveis. No entanto, se nenhum compressor adicional está disponível no sistema, a quantidade total de hidrogênio armazenado em um tanque de hidrogênio comprimido não poderá ser utilizada. Assumindo uma pressão de armazenagem de 700 atm e uma pressão de injeção de 100 atm, apenas 6/7 da massa de hidrogênio armazenado a bordo poderá ser utilizada antes da pressão no tanque cair até ao nível mínimo da pressão requerida. Se hidrogênio é comprimido a

bordo ou fora do veículo, a energia requerida para comprimir o hidrogênio é significativamente alta. O trabalho mínimo necessário para a compressão de hidrogênio é a partir de uma compressão isotérmica, o que é uma aproximação por meio do uso de compressores de êmbolo refrigerados. No entanto, mesmo sob condições ideais, a energia requerida para comprimir hidrogênio de 1 atm a 1000 atm requer mais do que 7% do teor energético do hidrogênio (Eichlseder et al., 2008). Se o hidrogênio é armazenado a bordo do veículo sob a forma de líquido criogênico, a compressão pode ser realizada de forma mais eficiente, no estado líquido. No entanto, existem várias questões restantes na construção e seleção de materiais de bombas criogênicas. Além disso, a liquefação de hidrogênio tal como é utilizado nos atuais processos de grande escala requer cerca de 30% do teor energético do hidrogênio (Eichlseder et al., 2008). A fim de evitar a etapa de compressão de hidrogênio líquido, o trabalho se restringe ao estudo de hidrogênio no estado gasoso.

2.2.4. Ignição por centelha com formação de mistura externa

Antes de avaliar os prós e os contras das diferentes estratégias de formação da mistura, é importante entender a correlação entre a relação combustível-ar e as emissões de óxido de nitrogênio, que é aplicável para todas as hipóteses de mistura homogênea. A Figura 1 mostra um traçado típico de emissões de óxido de nitrogênio em função da razão de equivalência da mistura para operação com formação de mistura externa (PFI - port fuel injection). Combustão de misturas pobres de hidrogênio tendo a razão combustível / ar inferior a 0,5 ($\lambda > 2$) resulta em emissões extremamente baixas de NOx. Devido ao excesso de ar disponível na câmara de combustão, as temperaturas de combustão não excedem o valor de temperatura crítica para formação de NOx, de aproximadamente 1800 K (Eichlseder, 2003). Exceder as razões de equivalência crítica de NOx resulta em um aumento exponencial de emissões de óxidos de nitrogênio, cujos picos estão em torno de uma razão de equivalência combustível / ar de 0,75 ($\lambda \sim 1,3$). Em condições estequiométricas, as emissões de NOx são de aproximadamente 1/3 do valor da emissão máxima. As maiores temperaturas dos gases queimados no funcionamento a hidrogênio ocorrem em torno de uma razão de equivalência combustível / ar perto

de 1,1, mas nesta razão de equivalência, a concentração de oxigênio é baixa, então a concentração de NOx não é tão alta (Salimi, 2009). À medida que a mistura fica mais pobre, o aumento das concentrações de oxigênio inicialmente compensam as quedas das temperaturas dos gases, e as emissões de NOx se tornam máximas em uma razão de equivalência combustível / ar de 0,75 ($\lambda = 1,3$).

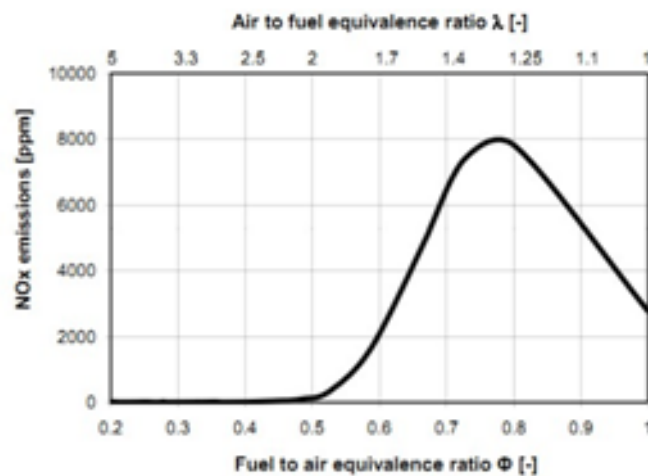


Figura 1 - Relação entre a razão equivalente combustível / ar e emissões de NOx em operação homogênea (Wallner et al., 2009)

Focando nesta dependência das emissões dos óxidos de nitrogênio como uma função da razão combustível / ar, diversas estratégias de operação foram desenvolvidas, tendo como principal objetivo conseguir densidades de potência aceitáveis, enquanto, simultaneamente, evitar excesso de emissões de NOx. Motores convertidos tomando como base motores convencionais a gasolina têm sido operados a hidrogênio utilizando uma estratégia de baixa razão constante de combustível / ar. Usando um acelerador convencional e substituindo o sistema de injeção de gasolina por injetores de hidrogênio, pode-se facilmente empregar esta estratégia (Olavson et al., 1984). Selecionando uma razão de equivalência abaixo do limite crítico de emissões de NOx, com $\phi \sim 0,5$ / $\lambda \sim 2$, resulta em níveis extremamente baixos de emissões, mesmo sem o uso de qualquer sistema de pós-tratamento. Devido às temperaturas de combustão relativamente baixas, à carga térmica do motor e ao aumento da energia de ignição requerida para a mistura pobre de ar-hidrogênio, esta estratégia operacional também evita eficazmente anomalias

de combustão. Testes em um motor com uma razão combustível / ar constante de $\phi \sim 0,55 / \lambda = 1,8$ e com uma taxa de compressão de 14,5:1 resultou em uma melhoria de 18% na economia de combustível em comparação com a gasolina, atendendo a padrões de emissões sem qualquer tratamento posterior (Szwabowski et al., 2002). Contudo, empregando uma razão de equivalência constante e fraca de combustível / ar, resulta numa perda ainda maior de potência do que o mostrado na Tabela 2 para operação estequiométrica. Assumindo uma razão equivalente constante de combustível / ar de 0,5 ($\lambda = 2$) resulta em uma potência de saída máxima teórica no motor a hidrogênio de cerca de apenas 50% de um motor a gasolina regular com mistura estequiométrica (ver Figura 2). Assim, pesquisadores têm investigado o potencial da utilização de sobrealimentação em combinação com a operação constante de mistura pobre combustível-ar para mitigar a perda de potência significativa (Verhelst et al., 2009). Este conceito também foi implementado em várias versões de pick-ups movidas a hidrogênio operando com relação combustível-ar de $\phi \sim 0,4 / \lambda \sim 2,5$ e com taxas de compressão de até 12:1 e aumentos de pressão de aproximadamente 0,8 atm (Francfort et al., 2006). A relação entre a saída de potência máxima teórica de motores a hidrogênio, com base na comparação da razão equivalente de combustível / ar assumindo eficiências constantes, é de cerca de 80% em comparação com motores movidos a gasolina (ver Figura 2).

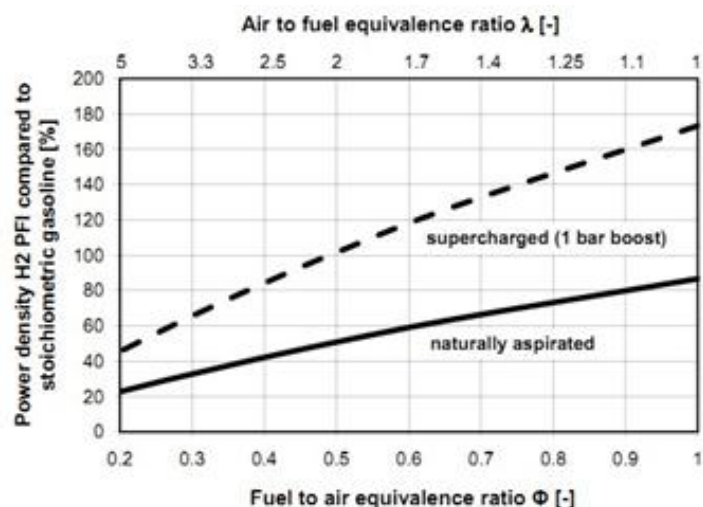


Figura 2 - Potência teórica de um motor com operação PFI a hidrogênio comparado com operação estequiométrica a gasolina em função da razão equivalente e pressão adotada (Verhelst et al., 2009)

Como já foi discutido anteriormente, um aumento significativo na eficiência do motor (em comparação com a operação a gasolina), pode ser obtido utilizando uma razão equivalente constante e fraca de combustível / ar. A relação combustível-ar é geralmente definida como tão alta quanto possível para se obter uma potência de saída aceitável e ao mesmo tempo cumprir as metas de emissões. No entanto, reduzindo a razão de equivalência foi mostrado que melhora ainda mais a eficiência do motor com um pico em $\lambda = 3,3 / \phi = 0,3$. A máxima eficiência resulta de um mínimo local das perdas devido a um aumento da duração da combustão e da transferência de calor, bem como as propriedades mais favoráveis do fluido de trabalho. Também, uma redução acentuada na eficiência foi observada numa razão equivalente de $\lambda = 4,5 / \phi = 0,22$ devido principalmente a grandes quantidades de hidrogênio não queimado e uma taxa mais lenta de combustão (Tang et al., 2002).

Para melhores resultados, uma estratégia de operação utilizando uma proporção variável de equivalência em função da carga do motor foi avaliada tanto para motores aspirados naturalmente, bem como motores superalimentados e para veículos. A variação da razão de equivalência num intervalo $2 < \lambda < 5 / 0,2 < \phi < 0,5$ em um motor GM 454 (conhecido de Chevrolet Big Block) com ignição por centelha e mistura externa de hidrogênio (PFI) mostrou um aumento de mais de 20% da potência do motor em relação a uma versão com carburador, sem aumentar o risco de detonação (Verhelst et al., 2001). As conclusões deste estudo incluem também que, em consequência do grande intervalo de aplicação de composições da mistura, o intervalo para os tempos de ignição também é grande. O tempo de injeção apresenta uma influência significativa na região de baixa carga e velocidade, e não é crítico na região de alta carga e velocidade.

Uma maneira eficaz para limitar a perda de potência em comparação com motores a gasolina ou diesel é usando hidrogênio em motores com formação de mistura externa (PFI) em razões estequiométricas de combustível / ar. No entanto, a operação com razão estequiométrica com PFI é propensa a anomalias de combustão e também exige um sistema de pós-tratamento para reduzir o nível de óxido nitrogênio das emissões. Tal como indicado na Tabela 2 e na Figura 2, a relação estequiométrica de hidrogênio-ar em operação PFI resulta em uma densidade de potência teórica de cerca de 86% em comparação com a gasolina. Um motor de ônibus MAN H 2866 UH01, 12 l com 6-cilindros, convertido para um

funcionamento bicomcombustível, atingiu 170 KW em funcionamento a gasolina e 140 KW usando a razão estequiométrica de hidrogênio com PFI, o que é cerca de 82% da potência de saída conseguida com gasolina, confirmando as considerações teóricas. No entanto, de modo a evitar anomalias de combustão, a taxa de compressão do motor teve de ser reduzida para valores mais baixos como 7,5:1 (Prumm, 2006). Com conversões de motores feitas posteriormente pelo mesmo fabricante, melhorias significativas foram conseguidas através da utilização de solenoides controladas por válvulas de injeção de hidrogênio em vez de válvulas rotativas de hidrogênio. O motor MAN H2876 UH01, de 12,8 L usando 6-cilindros com estes injetores melhorados com injeção sequencial, atingiu um pico de eficiência térmica de 31% com hidrogênio em operação estequiométrica aspirado naturalmente. Como pode ser visto na Figura 1, os resultados de operação estequiométrica de hidrogênio resultam em quantidades significativas de emissões de NOx. O motor MAN H2876 UH01 utiliza um catalisador de redução com controle para pós-tratamento de emissões. Operado com excedente de hidrogênio leve, o motor pode ser operado bem abaixo dos níveis de emissões da norma Euro 5, que é obrigatória desde 2008 (Prumm, 2006).

Os conceitos anteriores de formação de mistura utilizando PFI de hidrogênio resultam em se conseguir densidades de potência aceitáveis com uma relação equivalente fraca de combustível-ar ou boas eficiências do motor com conceitos estequiométricos. Uma possível solução para este problema é a combinação de estratégias operacionais com mistura pobre e estequiométrica. Este conceito foi proposto com base em resultados de pesquisas de motores (Eichlseder et al., 2003; Rottengruber et al., 2004) e também foi implementado em veículos de teste a hidrogênio (Kiesgen et al., 2006). Em baixas cargas do motor, o motor é operado a com uma mistura pobre de combustível-ar, resultando em boas eficiências e quase zero de emissões. Uma vez que uma determinada potência exigida é excedida, a estratégia de funcionamento é comutada para operação de mistura estequiométrica. Níveis críticos de emissões de NOx são evitados operando com relações de equivalência $1 < \phi < 2$ / $0,5 < \lambda < 1$, e um sistema de pós-tratamento convencional pode ser utilizado para reduzir as emissões de óxido de nitrogênio em operação estequiométrica. Testes realizados em um protótipo de demonstração com um motor de 6,0 l e 12 V empregando esta estratégia operacional mostrou que as

emissões somam apenas uma fração dos níveis mais rigorosos de emissões. Os resultados dos testes em um ciclo revelou emissões de NOx tão baixas como 0,0005 g/Km, 3,9% das Emissões dos Veículos de Emissão Super-Baixa, e emissões de hidrocarbonetos inferiores a concentração ambiente, indicando que este veículo reduz ativamente a concentração de alguns componentes em sua emissão (Wallner et al., 2008).

Foi mostrado que a baixa densidade de hidrogênio reduz significativamente a densidade de potência com PFI em comparação a combustíveis convencionais. Cálculos efetuados com base em um modelo validado têm mostrado que a massa de ar aprisionado por ciclo pode ser aumentada em até 16% com injeção de hidrogênio criogênico PFI (temperatura de injeção de cerca de 90 K) em comparação com a injeção de hidrogênio em condições ambiente (D'Errico et al., 2008). Isto leva a um aumento significativo na potência de saída, tornando a injeção criogênica uma medida eficaz para aumentar a potência específica de motores a hidrogênio (Heller e Ellgas, 2006). No entanto, esta estratégia de injeção só é possível em combinação com armazenamento de hidrogênio criogênico a bordo, com uma técnica com grandes benefícios de densidades de armazenamento, mas com desafios significativos, devido à complexidade do tanque e da infraestrutura.

2.2.5. Ignição por centelha com formação de mistura interna (Injeção Direta)

Esforços para evitar anomalias de combustão e aumentar a densidade de potência dos motores de combustão interna a hidrogênio, atingindo quase zero de emissões têm conduzido ao desenvolvimento de sistemas de injeção direta (ID) de hidrogênio. Semelhante às classificações comuns para motores a gasolina, estratégias de formação de mistura com ID de hidrogênio também foram agrupadas em conceitos de jato-guiado, parede-guiada, e ar-guiado (Kirchweger et al., 2006). Com base no início da injeção (SOI - start of injection), pode-se diferenciar a operação com injeção direta precoce ou tardia, no entanto, nenhum limite claro entre estas duas categorias foi definido. A Figura 3 mostra um esquema de diferentes estratégias de ID de hidrogênio com seus respectivos tempos de injeção. Injeção precoce geralmente

refere-se a qualquer ID de hidrogênio durante o curso de compressão inicial, pouco depois de fechar a válvula de admissão, ao passo que injeção tardia refere-se a estratégias injeção no final do curso de compressão geralmente terminando pouco antes do ponto de ignição. A fim de se evitar o deslocamento de ar por hidrogênio de baixa densidade, o início da injeção mesmo para injeção precoce é geralmente definido após o fechamento da válvula de admissão. Além do funcionamento do motor com um pulso de injeção por ciclo, os resultados de múltiplas estratégias de injeção com dois ou mais impulsos por ciclo têm sido relatados por alguns autores (Wimmer et al., 2005).

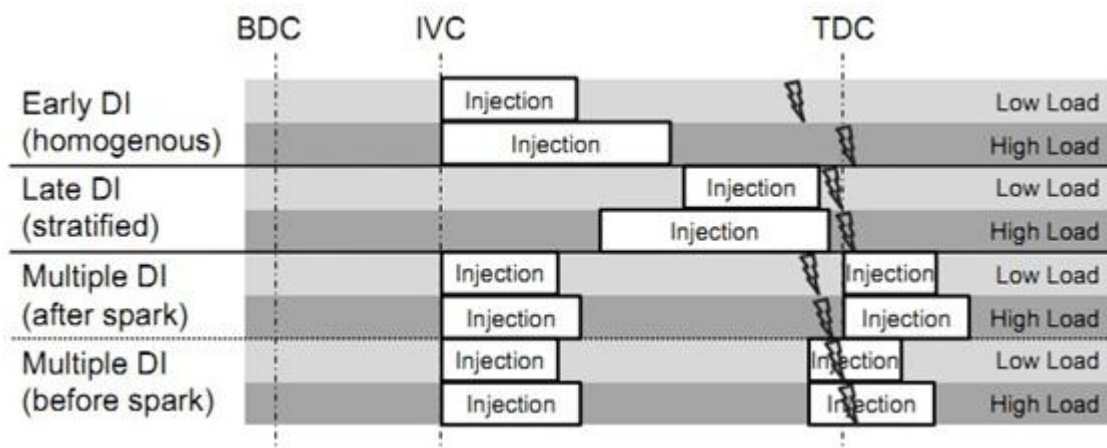


Figura 3 - Esquema de diferentes estratégias para Injeção Direta (Wallner et al., 2009)

Com base na pressão de injeção requerida, os termos de baixa pressão e alta pressão de ID também vêm sendo utilizados na literatura. Para introduzir hidrogênio diretamente na câmara de combustão, a pressão no interior do sistema de injeção deve ser superior à pressão no interior do cilindro. No entanto, apenas se as condições de injeção críticas (pressões muito elevadas) estão sendo atingida, a quantidade de hidrogênio injetada no motor torna-se independente da pressão do cilindro. Isto é um problema para a calibração do motor e para uma medição precisa de combustível, com a quantidade de combustível sendo determinada apenas como uma função da pressão de injeção e a duração da injeção. Condições críticas são obtidas a uma taxa de pressão de cerca de 0,53, indicando que a pressão de injeção tem que ser cerca de duas vezes a pressão no interior do cilindro para garantir as condições de fluxo críticas (fluxo estrangulado). Logo, as estratégias de operação

com ID precoce requerem pressões de injeção no intervalo de cerca de 5 a 20 atm, já em estratégias de injeção tardia, pressões de até 100 atm, e em estratégias de injeção múltipla com pulsos de injeção durante o evento de combustão propriamente dita, pressões de 100 a 300 atm (Steinruck e Ranegger, 2006). A exposição da ponta dos injetores nas pressões e temperaturas dos cilindros na operação de ID coloca desafios significativos para o desenvolvimento de injetores duráveis, com capacidades de medição precisa e altas taxas de fluxo (Welch et al., 2008).

O tempo de injeção durante operação com ID de hidrogênio tem uma influência importante sobre a distribuição da mistura, por conseguinte, sobre as características da combustão. Com injeção precoce, o combustível injetado tem tempo suficiente para se misturar com o ar dentro da câmara de combustão e formar uma mistura praticamente homogênea. Com a injeção tardia, o tempo limitado disponível para a mistura se homogeneizar, resulta numa mistura estratificada no ponto de ignição. Essas tendências básicas também foram confirmadas usando simuladores computacionais de fluidos dinâmicos (CFD) tridimensionais (Kovac et al., 2005) e motores opticamente acessíveis (um cilindro de vidro com pistão que permitem a utilização de técnicas com laser de diagnóstico para visualizar e medir fenômenos de combustão no motor funcionando) (Kaiser e White, 2008).

O impacto das características acima mencionadas sobre as emissões de NO_x é dependente tanto da carga do motor como da razão de equivalência combustível / ar. A Figura 4 mostra as emissões resultantes de NO_x como uma função do início da injeção (SOI) de motor para diferentes razões de equivalência, a uma velocidade do motor de 2000 RPM coletadas num motor a hidrogênio experimental de cilindro único (Wallner et al., 2007). Uma vez que o motor é estacionário, sem aceleração, a razão de equivalência corresponde à carga do motor. A configuração do injetor para esse experimento é um injetor montado lateralmente com operação de ID e com uma configuração de bico simétrico de 13 buracos (ângulo de injeção de 60°). Em cargas baixas do motor, resultados de injeção precoce mostram emissões extremamente baixas de NO_x, já que a mistura no ponto de ignição é muito provável que seja homogênea (Salazar et al., 2009). Assim, a combustão de fracas misturas homogêneas não formam emissões de NO_x. Injeção tardia com cargas baixas, por outro lado, resulta numa mistura estratificada com zonas ricas em hidrogênio, bem como zonas com misturas pobres ou mesmo ar puro. Embora a mistura global ainda

seja pobre, a combustão de zonas ricas provoca um aumento significativo na emissão de NOx. Em cargas elevadas do motor, esta tendência parece ser invertida. Injeção precoce resulta em misturas homogêneas que se aproximam da estequiometria e produzem altas emissões de NOx. Espera-se que injeção tardia resulte numa mistura estratificada, com zonas ainda mais ricas que a estequiometria, juntamente com zonas de mistura pobre. Este tipo de estratificação evita a razão de equivalência crítica $\lambda \sim 1.3 / \phi \sim 0.75$ para formação de NOx (ver Figura 1) e, assim, reduz a emissão global de NOx.

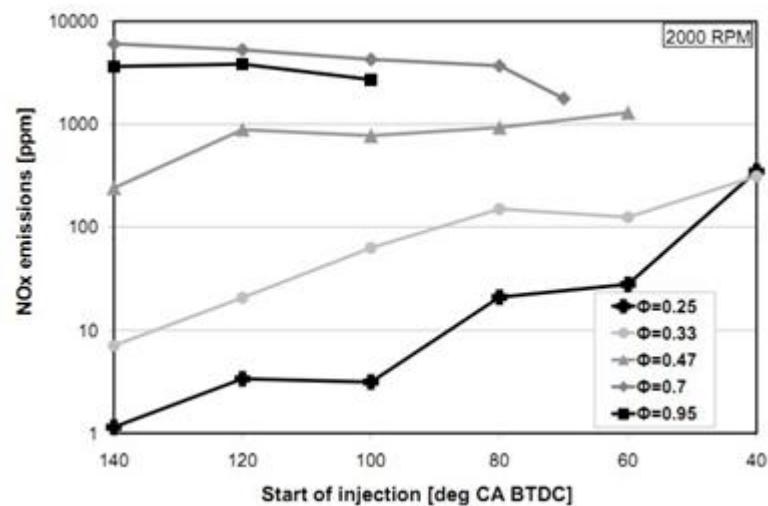


Figura 4 - Emissões típicas de NOx para operação de ID de hidrogênio (Wallner et al., 2006)

Considerações teóricas sobre os calores específicos da mistura e densidades de potência já levam a crer que os resultados do hidrogênio em operação de ID resultam em densidades de potência superiores do que em operação PFI com hidrogênio e gasolina. A Figura 5 mostra uma comparação das pressões efetivas como uma função da razão de equivalência medida num motor experimental de único cilindro de 0,5 l (Eichlseder et al., 2003). No caso de operação com ID de hidrogênio, um indicativo de pressão efetiva (IMEP - indicated mean effective pressure) em excesso de 13 atm foi alcançado, o que é aproximadamente 15% mais elevado do que o pico do IMEP com gasolina e mais de 75% do pico do IMEP com operação PFI de hidrogênio. Devido ao deslocamento do ar durante a injeção de hidrogênio no tubo de admissão e das anomalias de combustão que ocorrem com

cargas elevadas do motor, o IMEP alcançável com formação de mistura externa é muito inferior aos valores da gasolina. O comportamento do IMEP em função da razão de equivalência mostra também as diferenças entre os dois métodos de formação da mistura combustível-ar. Uma vez que durante a injeção direta de hidrogênio, a quantidade de ar mantém-se praticamente constante uma mudança da razão equivalente (o efeito de deslocamento não acontece pois o hidrogênio não é injetado antes do fechamento das válvulas de admissão), uma fraca razão de equivalência sob a mesma carga (ou o mesmo IMEP) é estabelecida em comparação com a formação de mistura externa com hidrogênio. Uma vez que ambas as emissões de NOx e a eficiência do motor são fortemente dependentes da razão de equivalência, a operação com ID é capaz de alcançar uma maior eficiência do motor e emissões de NOx mais baixas numa mesma solicitação do motor em comparação com operação PFI.

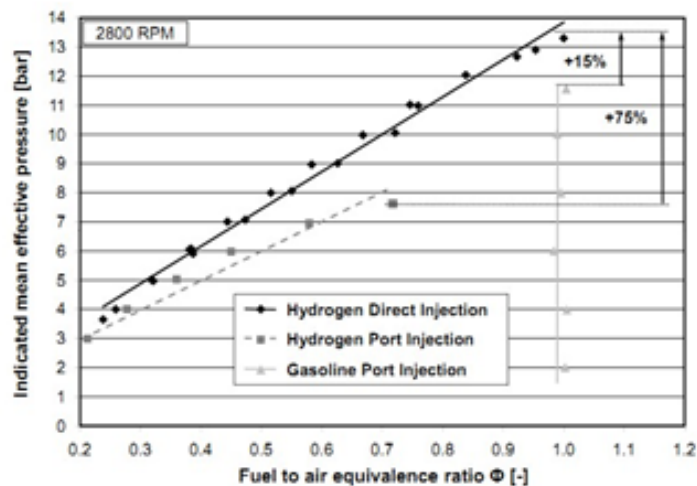


Figura 5 - Comparação do indicativo de pressão efetiva (IMEP) entre operação PFI de gasolina e hidrogênio e também operação ID de hidrogênio (Eichlseder et al., 2003)

A eficiência potencial do hidrogênio em operação de ID foi demonstrada num único cilindro num motor de pesquisa da Ford, conseguindo um pico de eficiência térmica de mais de 45% a uma velocidade do motor de 3000 RPM (Welch et al., 2008). A fim de se obter uma eficiência térmica realista, os valores de atrito no motor de um cilindro não foram levados em conta, mas o atrito numa pressão média efetiva de 0,7 atm a 3000 RPM foi estimado, típico para um motor de baixo atrito multicilindros. Mesmo em carga parcial de operação, o hidrogênio em operação de

ID pode ser usado para otimizar a eficiência do motor. Embora o amplo intervalo dos limites de inflamabilidade do hidrogênio permita teoricamente operação sem aceleração mesmo em condições de ponto morto, as misturas relativamente pobres nessas condições de operação resultam em mais longos e menos eficientes eventos de combustão. Um estudo das condições básicas de injeção utilizando um injetor de um único orifício em um motor experimental de cilindro único, demonstrou que a duração da combustão em cargas baixas do motor (IMEP ~ 2,5 atm), a uma velocidade de 2000 RPM pode ser reduzida mais que 50°CA, onde CA é o ângulo do virabrequim, com injeção precoce (100°CA APMS) para cerca de 15°CA e para injeção tardia cerca de 60°CA APMS resultando em um aumento da eficiência térmica de 29% para mais de 34% (Wallner et al., 2009).

Embora a melhoria da eficiência do hidrogênio em ID com carga reduzida e também com cargas elevadas do motor é significativa, um limite entre melhorar a eficiência do motor e reduzir as emissões de óxidos de nitrogênio vem sendo buscado. O exemplo acima mencionado, com um aumento na eficiência indicada de 29% para 34% também levou a um aumento das emissões de NOx em cerca de 5 ppm com injeção precoce para mais de 100 ppm para o caso com eficiência otimizada (Wallner et al., 2009). Para isso, injeção múltipla tem se mostrado como uma ferramenta eficaz para alcançar simultaneamente uma elevada eficiência do motor e baixas emissões de NOx. Os resultados de um motor experimental de cilindro único, sugere um potencial de redução das emissões de NOx em comparação com a injeção de única etapa de aproximadamente 95%, ao mesmo tempo que alcança uma elevada eficiência do motor. No entanto, devido ao curto período de tempo disponível para a injeção durante a fase de combustão, as estratégias de injeção múltipla colocam grandes desafios para os sistemas de injeção de hidrogênio, tanto em termos de níveis de pressão, bem como para as taxas de fluxo exigidas injetor. Assim, o potencial de injeção múltipla tem sido até agora demonstrado apenas em motores de baixas velocidades (Wallner et al., 2009).

Injetores de hidrogênio operando com ID devem suportar pressões de fornecimento de hidrogênio de até 300 atm, e também temperaturas de 300 a 400 °C na ponta do injetor, para serem confiáveis. Estima-se que uma precisão de cerca de 2% da taxa de escoamento real da injeção com durações mínimas tão curtas quanto 0,1 ms e taxas de fuga de menos de 0,1% do fluxo total são necessários para injetores de

hidrogênio (Steinruck e Ranegger, 2006). Apesar de se ter vários projetos de injetores e sistemas de atuação, incluindo solenoide, magneto e piezo-elétrico, protótipos atualmente disponíveis de injetores ainda não cumprem os requisitos de durabilidade necessários para aplicações automotivas. Um objetivo importante de desenvolvimento deve ser para aumentar substancialmente a vida dos injetores de cerca de 200 horas para 1.000 horas. Isso permitiria o desenvolvimento e a demonstração de uma fase inicial de um motor multi-cilindro com recursos avançados e tecnologia de materiais integrados no sistema de combustível de ID, com uma meta a longo prazo de desenvolver e provar 20.000 horas de durabilidade (Welch et al., 2008).

2.2.6. Ignição por compressão com formação de mistura interna (Injeção Direta)

Na busca para melhorar a eficiência do motor, pesquisas vem sendo realizadas em motores a hidrogênio de ID com ignição por compressão (IC), em aplicações estacionárias e também em motores de automóveis (Heindl et al., 2009). Trabalhos recentes de hidrogênio em motores com carga homogênea de ignição por compressão (HCCI - homogeneous charge compression ignition) têm sido publicados (Aleiferis et al., 2009). Em todos os casos, a temperatura de autoignição elevada do hidrogênio em comparação com os combustíveis convencionais, resultou num intervalo limite de operação, e também, pré-aquecimento do ar na admissão ou elevadas taxas de recirculação dos gases da emissão são pré-requisitos para atingir as temperaturas de autoignição.

A característica definidora da operação HCCI é que não há um iniciador direto da combustão, a densidade e temperatura da mistura são aumentadas por compressão até que toda a mistura reaja espontaneamente. A ignição por compressão de carga estratificada (IC) também depende do aumento da temperatura e da densidade resultante da compressão, porém a combustão ocorre no limite da mistura de combustível-ar, causada por um evento de injeção que inicia a combustão.

Investigações sobre um cilindro de motor opticamente acessível operado com hidrogênio e heptano revelou que para hidrogênio puro operando em HCCI, o efeito

da temperatura do ar na admissão é relativamente pequeno. Um aumento de 200 °C na temperatura de admissão para uma razão equivalente variando de $\lambda = 1.6 - 2.0 / \phi = 0.5 - 0.63$ resultou num pequeno avanço da fase de autoignição ao mesmo tempo em que levou a um aumento de 2,5 atm no pico de pressão do cilindro, sem causar muita diferença na fase dos picos de pressão. Para comparação, um aumento de 20 °C na temperatura do ar de admissão para apenas heptano em operação HCCI com razão equivalente de $\lambda = 1.4 / \phi = 0.7$ avançou o ângulo de autoignição para 10°CÁ e aumentou o pico de pressão em aproximadamente de 3 atm (Aleiferis et al., 2009). Usando éter dimetílico para elevar o número de cetano (o período de tempo entre o início da injeção e o primeiro aumento de pressão identificável durante a combustão) e estabilizar a combustão em operação HCCI em motores a hidrogênio, mostrou-se uma melhoria de 13% na eficiência térmica em comparação a operação com hidrogênio puro. Uma eficiência térmica de 42% e emissões muito baixas de NOx próximas de zero puderam ser demonstradas (Narioka et al., 2006). Investigações em um motor experimental de um único cilindro projetado especificamente para operação de IC, mostraram que IC estável de hidrogênio pode ser obtida empregando aquecimento do ar por indução e sobrealimentação sem inter-resfriamento. No entanto, os níveis de carga foram limitados para baixas e médias cargas, evitando assim fenômenos de Detonação. Estas descobertas conduziram ao desenvolvimento de uma estratégia de injeção dupla em que uma primeira injeção fornece uma pequena quantidade de combustível no interior do cilindro. Misturando, comprimindo e fazendo a ignição da mistura inicial em torno do ponto morto superior (PMS) gera a temperatura necessária na câmara de combustão. Posteriormente, uma segunda injeção é feita e quase imediatamente convertida em uma combustão por difusão, inibindo completamente fenômenos de Detonação. Fazendo-se mais estável e flexível o sistema de combustão pelo uso de ignição dupla, se conseguiu uma eficiência térmica indicada no ciclo de alta pressão de 44% (Heindl et al., 2009).

Quais dos modos de operação, IC ou funcionamento HCCI, serão mais relevantes para motores de ignição por compressão a hidrogênio, irá depender de suas faixas de operação efetiva, bem como a eficiência e características das emissões. Funcionamento HCCI tem sido geralmente limitado a baixas rotações e cargas. Vendo as complicações adicionais para um controle estável do motor em operação

HCCI, ele continuará a ser estudado até que melhorias significativas em relação à operação convencional de hidrogênio sejam realizadas, de modo que a operação HCCI ofereça alta eficiência para o motor com baixos níveis de emissões.

2.3. COMBUSTÃO ANORMAL

As mesmas propriedades que fazem do hidrogênio um combustível desejável para motores de combustão interna também são responsáveis por eventos de combustão anormais associados ao hidrogênio. Em particular, o amplo intervalo dos limites de inflamabilidade, baixa energia de ignição exigida e altas velocidades de chama altas podem resultar em fenômenos de combustão indesejáveis geralmente chamados de anomalias de combustão. Essas anomalias incluem Ignição de Superfície, Combustão contrária (do inglês, Backfire) e também autoignição (Ringler et al., 2004).

O termo Ignição de Superfície é usado aqui para denotar ignição não controlada induzida por um ponto quente na câmara de combustão. Pré-ignição geralmente descreve eventos de combustão que ocorrem no interior da câmara de combustão durante o curso de compressão do motor com o início efetivo da combustão antes de ignição. Combustão contrária, também chamada em inglês de Back-Flash, refere-se a eventos em que a combustão da mistura hidrogênio-ar ocorre durante o curso de admissão, geralmente em um duto de admissão ou coletor de admissão. "Detonação" é o termo típico usado para os motores de SI que descreve autoignição do restante do gás durante a parte final do evento de combustão, gerando oscilações de alta pressão e um barulho conhecido pelos automobilistas como "batida de pino".

Limitar a razão equivalente máxima de combustível / ar é uma medida eficaz para evitar a combustão anormal na operação a hidrogênio. Devido ao amplo limite de inflamabilidade e altas velocidades de chamas, motores de combustão interna a hidrogênio são normalmente operados empregando uma estratégia de mistura pobre. O excesso de ar na operação com mistura pobre age como um gás inerte e reduz de maneira eficaz as temperaturas de combustão e, conseqüentemente, as temperaturas dos componentes. Isto reduz significativamente a ocorrência de

combustão anormal em regimes de combustão pobres. Embora operação com mistura pobre seja muito eficiente, ela limita a potência de motores a hidrogênio. Os resultados de um motor 1.8 l, 4-cilindros em linha com intercooler, operado a gasolina e também a hidrogênio, mostraram que a combustão anormal pode ser evitada limitando a razão equivalente combustível / ar. Neste caso particular, a razão equivalente máxima foi limitada a 0,63 ($\lambda = 1,6$) a 1500 rpm e depois reduzida em função da velocidade do motor, com uma razão equivalente mínima de 0,48 ($\lambda = 2,1$) a 6000 RPM. Evitando-se de maneira eficaz a combustão anormal, reduz-se também a potência de saída do motor, de 120 KW operando a gasolina para 70 KW em funcionamento a hidrogênio (Eichlseder et al., 2009).

2.3.1. Pré-ignição

A combustão prematura durante o curso de compressão do motor com válvulas de admissão fechadas resultante da pré-ignição, uma anomalia de ignição de superfície, pode ter várias causas. Como pré-ignição é um evento estocástico, investigações detalhadas de pré-ignição são complicadas, e a causa real da pré-ignição não pode ser definida exatamente. Fontes para a pré-ignição incluem velas quentes ou eletrodos da vela, válvulas de escape quentes ou quaisquer outros pontos quentes na câmara de combustão, gás residual ou partículas restantes de óleo quente de eventos anteriores de combustão (Stockhausen et al., 2003). Em geral, tanto temperaturas elevadas quanto cargas residuais podem causar a pré-ignição. Devido à dependência da energia mínima de ignição na razão de equivalência, a pré-ignição é mais pronunciada quando a mistura de hidrogênio-ar aproximar dos níveis estequiométricos. Além disso, as condições de funcionamento do motor com velocidades e cargas crescentes são mais propensas a ocorrência de pré-ignição devido à maior temperatura dos gases e componentes.

Medidas para evitar pré-ignição incluem projeto específico das velas, sistema de ignição com carga residual baixa, projetado específico para cárter de ventilação, bem como design otimizado das passagens de arrefecimento do motor para se evitar pontos quentes. Injeção direta de hidrogênio na câmara de combustão é outra medida eficaz para reduzir ou eliminar a ocorrência de pré-ignição.

2.3.2. Combustão contrária

Combustão contrária, conhecida de Back-flash, descreve a combustão da carga de hidrogênio com ar durante o curso de admissão na câmara de combustão do motor e/ou no coletor de admissão. Com a abertura das válvulas de admissão, a mistura de hidrogênio-ar é aspirada para dentro da câmara de combustão. Quando a mistura é incendiada em pontos quentes da câmara de combustão, devidos a gás residual quente ou carga residual no sistema de ignição, combustão contrária ocorre semelhante à pré-ignição. A principal diferença com a pré-ignição é o momento em que ocorre a anomalia. Pré-ignição ocorre durante o curso de compressão, com as válvulas de admissão já fechadas enquanto a combustão contrária ocorre com as válvulas de admissão ainda abertas. Isto resulta em combustão e aumento da pressão no coletor de admissão, o que não só é nitidamente audível, mas também podem danificar ou destruir o sistema de admissão. Devido à menor energia de ignição, a ocorrência de combustão contrária é mais provável quando misturas se aproximam da estequiometria. Como a maioria das estratégias de mistura com ID começam após o fechamento das válvulas de admissão, a ocorrência de combustão contrária é geralmente limitada a formação externa da mistura.

As poucas informações disponíveis sobre as anomalias de combustão também indicam que pré-ignição e combustão contrária estão intimamente relacionadas, sendo a pré-ignição um antecessor para a ocorrência de combustão contrária. Pré-ignição aquece a câmara de combustão, o que conduz finalmente à combustão contrária num ciclo consecutivo (Sierens e Rossel, 1998). Conseqüentemente, quaisquer medidas que ajudam a evitar a pré-ignição também reduzem o risco de combustão contrária.

2.3.3. Autoignição

Quando as condições do gás final (pressão, temperatura, tempo) são tais que provocam autoignição espontânea desse gás final, segue-se uma rápida liberação da energia restante gerando ondas de grande amplitude de pressão, referidas geralmente como Detonação. A amplitude das ondas de pressão de detonação em motores pesados pode provocar danos no motor, devido ao aumento da tensão

mecânica e térmica. A tendência de haver detonação num motor depende do desenho do motor, bem como as propriedades da mistura combustível-ar.

Estudos foram relatados na tentativa de prever o comportamento de detonação em motores a hidrogênio. Uma comparação de resultados experimentais mostrou uma relação entre a variação de taxa de compressão, a razão equivalente de ar-combustível e a temperatura do ar de admissão (Li e Karim, 2006). Estes resultados sugerem que o regime de funcionamento de um motor de hidrogênio é fortemente limitado pela ocorrência de detonação. No entanto, com base no trabalho em um motor multi-cilindros com razões de compressão de até 15,3:1, foi constatado que detonação, que vem sendo observada em motores a gasolina, não ocorreu em nenhum dos testes a hidrogênio independentemente da taxa de compressão (Tang et al., 2002).

2.4. PROJETOS OU CONVERSÃO DE MOTORES

Algumas características de motores projetados ou convertidos para operação a hidrogênio foram estudadas por diversos autores. A ocorrência de anomalias de combustão discutidas anteriormente, ou, mais particularmente, o desejo de evitar essas anomalias, tem levado a um grande número de contramedidas para evitá-las nos H₂ICEs.

2.4.1. Velas de ignição

Velas de ignição a frio são recomendadas para evitar temperaturas nos eletrodos da vela de ignição que excedam o limite de autoignição causando combustão contrária (Das, 2002). Velas de ignição com eletrodos de platina devem ser evitadas, uma vez que podem funcionar como um catalisador para oxidação do hidrogênio (Das, 1996; Olavson et al., 1984) (platina tem sido usada no sistema de escape para oxidar hidrogênio não queimado).

2.4.2. Sistema de injeção

Uma opção é usar formação de mistura externa para programar um tempo de injeção de tal modo que um período de arrefecimento de ar é criado na fase inicial do curso de admissão, e o final da injeção é tal que todo o hidrogênio é introduzido, não deixando nenhum hidrogênio no coletor de admissão quando as válvulas de admissão são fechadas. O momento aqui descrito pode não ser necessário, como foi relatado num estudo onde nenhuma relação entre os tempos de injeção e combustão contrária foi encontrada (Tang, 2002). A segunda opção é usar ID durante o curso de compressão. Injetores de alto fluxo com taxas de escoamento de cerca de 4 - 6 g/seg a 100 atm de pressão na alimentação são necessários para ID (Welch et al., 2008). Em motores com operação PFI, os requisitos de fluxo elevados podem ser atenuados utilizando injetores múltiplos. Controle do tempo de injeção também diminui a quantidade de combustível não queimado no coletor de admissão em qualquer momento, limitando a gravidade do efeito de combustão contrária, caso ocorra.

2.4.3. Lubrificação

Um óleo lubrificante de motor compatível com um aumento da concentração de água no cárter tem de ser escolhido (Prumm, 2006). Um relatório em testes com motores a hidrogênio na Alemanha (Project Coordinator Motor Vehicles and Road Transport, 1990) cita duas opções de lubrificante para uso em motores a hidrogênio: um óleo demulsificante ou um óleo sintético que forma uma solução com água. DeLuchi (1989) cita uma vida útil mais longa do óleo, já que o óleo não é diluído por hidrogênio e há menos formação de ácidos (duvidoso, dadas as grandes quantidades de água e de NOx que podem ser formados durante a combustão estequiométrica com hidrogênio). Um óleo sem cinzas é recomendado para se evitar a formação de depósitos (pontos quentes) (Das, 2002). Medições da composição dos gases do cárter da Universidade de Ghent (Verhelst e Sierens, 2001) demonstraram uma percentagem muito elevada de hidrogênio (mais de 5% vol, fora do alcance do equipamento), proveniente da combustão, que ocorre de tal maneira que força a passagem de ar e combustível através dos anéis dos pistões (fenômeno

conhecido como Blow-by). Esse fenômeno pode vir a ser bastante elevado, devido a um rápido aumento de pressão (causado pela alta velocidade da chama que resulta numa taxa de combustão rápida) e a baixa densidade do gás de hidrogênio. A composição do óleo lubrificante foi investigada e comparada com a do óleo não utilizado. As propriedades do óleo foram severamente alteradas com uma grande diminuição das qualidades do lubrificante.

Um óleo de motor desenvolvido especificamente para motores a hidrogênio é provavelmente a melhor solução, mas ainda não está disponível. Por razões de segurança, um sistema de ventilação forçada do cárter deve ser montado no motor para manter a concentração de hidrogênio bem abaixo do seu limite inferior de inflamabilidade. Uma bomba de vácuo é utilizada para evacuar os gases do cárter, que passam primeiramente por um separador de óleo. A pressão no cárter é controlada para uma pequena sob pressão, através de um equilíbrio entre a pressão do ar comprimido e uma válvula by-pass na entrada da bomba de vácuo. A concentração de hidrogênio no cárter usando o sistema de ventilação foi medida como sendo inferior a 1% vol (Verhelst e Sierens, 2001).

2.4.4. Taxa de compressão

A escolha da taxa de compressão ótima é semelhante a qualquer tipo de combustível, procurando escolher uma taxa tão elevada quanto possível para aumentar a eficiência do motor, estabelecendo seu limite através do aumento das perdas de calor ou a ocorrência de combustão anormal (para o hidrogênio, principalmente ignição de superfície). A escolha pode depender da aplicação, onde a taxa de compressão ótima para obter uma eficiência mais elevada pode ser diferente da taxa de compressão ótima para obter uma máxima potência de saída. Taxas de compressão utilizadas nos H₂ICEs variam de 7,5:1 até 14,5:1 (Prumm, 2006).

2.4.5. Hidrogênio em combinação com outros combustíveis

As propriedades do hidrogênio, em particular os seu amplo intervalo de limites de inflamabilidade, o torna um combustível desejável para combinar com outros

combustíveis e, assim, melhorar suas propriedades de combustão. Com base na estratégia de formação da mistura, pode-se diferenciar entre a operação com mistura do hidrogênio com outro combustível, geralmente gasoso, e a operação bicomcombustível. Tipicamente, o combustível já está armazenado e alimenta o motor na forma de mistura pronta, usando um único carburador ou sistema de injeção de combustível. Para isto, o hidrogênio é frequentemente usado para melhorar o comportamento de queima pobre do gás natural. Por outro lado, a operação com bicomcombustível descreve qualquer combinação de hidrogênio com combustíveis líquidos, requerendo assim diversos dispositivos de preparação da mistura. Estes sistemas podem usar tanto o armazenamento quanto os sistemas de alimentação separados ou em alguns casos o hidrogênio é produzido a bordo.

Devido a dificuldade e falta de espaço em automóveis para o armazenamento de dois combustíveis, o trabalho não aborda estas formas de utilização.

2.5. DESEMPENHO DO USO DE HIDROGÊNIO EM MOTORES

2.5.1. Motores de Combustão por Centelha

Como visto acima, Hidrogênio possui boas características para motores de combustão de ignição por centelha. Sua ampla gama de limites de inflamabilidade permitem uma operação suave em misturas pobres, com baixas emissões de NOx. Outro fator, a alta velocidade de chama do hidrogênio pode contribuir para uma maior eficiência térmica para um curto período de combustão, com a ignição perto do Ponto Morto Superior (PMS). Adicionalmente, baixa energia de ignição é requerida, o que diminuiria a flutuação do ciclo de combustão, isto é, as oscilações das variáveis do processo de combustão ciclo a ciclo.

As boas características do hidrogênio encorajam diversos estudiosos a desenvolver motores de alta-performance a hidrogênio testando diferentes designs e condições de operação. Porém, a rápida combustão do hidrogênio pode causar combustão anormal nos motores em geral, como Detonação, Pré-ignição e Combustão contrária em altas cargas o que não garante uma operação segura e limita a potência do motor. Além disto, um aumento significativo da velocidade de combustão do

hidrogênio conduz a uma diminuição da eficiência térmica comparada com outros combustíveis gasosos, devido ao aumento de perdas de calor por Knock combustão de explosão (Kondo et al., 1997). Algumas técnicas já foram desenvolvidas para prevenir os problemas citados acima, como visto anteriormente, entre elas temos o uso de mistura interna de hidrogênio que é conseguida com Injeção Direta de hidrogênio na câmara do motor. Entretanto, altas perdas de calor devido à rápida combustão do hidrogênio continuam sendo uma barreira para se obter eficiências térmicas tão altas quanto as de avançados motores à Diesel com uso de Injeção Direta.

Um estudo conduzido por Ali Mohammadi e Masahiro Shioji usando um único cilindro com ignição por centelha, alta pressão de injeção de hidrogênio e controle dos tempos de ignição obteve bons resultados em relação a performance do motor. Os experimentos foram feitos de modo a controlar a vazão mássica de hidrogênio na injeção, assim como o tempo de injeção de hidrogênio. Uma pressão de injeção de 80 atm foi estabelecida de modo a garantir suficiente penetração do jato de combustível e permitir a mistura combustível/ar, de acordo com a representação do experimento abaixo. Emissões de NOx foram medidas sempre em altas solicitações utilizando um analisador de quimioluminescência.

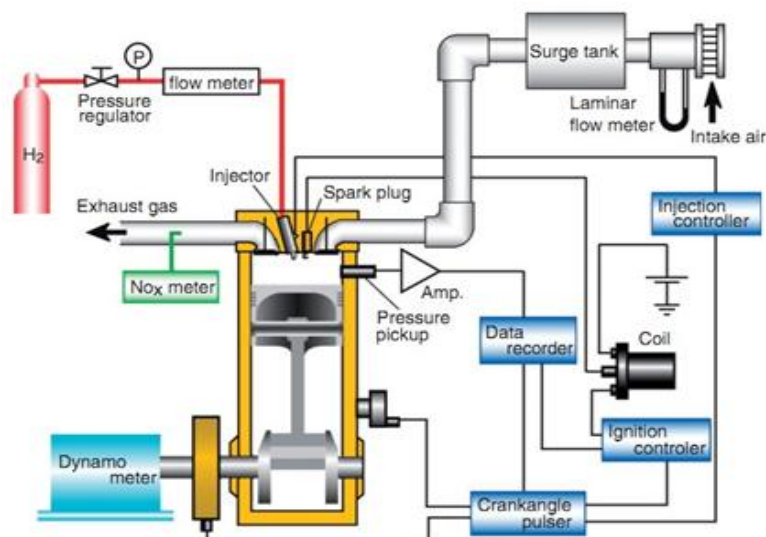


Figura 6 - Representação do experimento para se obter o desempenho de motores com Injeção Direta a Hidrogênio (Mohammadi et al., 2006)

Efeitos da concentração da mistura combustível / ar no desempenho do motor e emissões foram investigados variando o tempo de injeção num amplo intervalo. Variando a injeção de hidrogênio na admissão e retardando a injeção até estágio de compressão, um aumento de desempenho foi verificado.

Os resultados deste estudo mostraram:

1. Injeção de hidrogênio durante a admissão previne Combustão contrária. Porém, a eficiência térmica e a potência de saída são limitadas pela ocorrência de Detonação devido a redução da eficiência volumétrica.
2. Injeção de hidrogênio durante o estágio de compressão previne Detonação, aumenta a eficiência térmica e oferece máxima potência de saída.
3. Retardando a injeção de hidrogênio ao ultimo estágio de compressão, uma eficiência térmica máxima de 38,9% pode ser atingida em altas cargas do motor. Foi constatado também que injeção tardia de hidrogênio oferece grandes reduções de emissão de NOx, ver Figura 7.

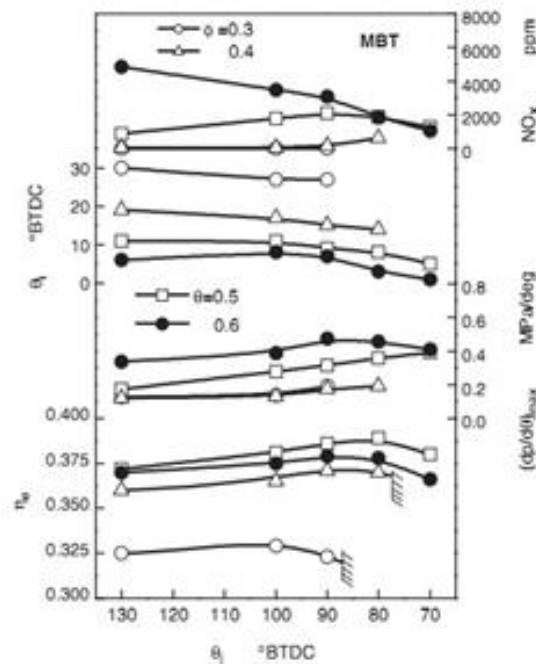


Figura 7 - Efeitos do tempo de injeção θ_j ($^{\circ}$ APMS) com a eficiência térmica η_e , o aumento máximo da taxa de pressão $(dp/d\theta)_{max}$, o tempo de ignição θ_i e emissões de NOx para diferentes razões combustível / ar (Mohammadi et al., 2006)

Relatos de outros autores também mostram que, a utilização de ID de hidrogênio juntamente com o controle do tempo de ignição e do tempo de injeção, é muito

eficiente a fim de controlar combustão anormal do hidrogênio e obter altas eficiência térmica e potência de saída. Entretanto, mais estudos devem ser feitos para se atingir melhores performances e atingir um nível aceitável de emissões de NOx, outras otimizações podem ser feitas para este fim.

2.5.2. Motores de Combustão por Compressão

A grande maioria dos estudos usando hidrogênio em motores de combustão interna tem focado no uso de hidrogênio em motores de ignição por centelha, sendo a maioria dos estudos direcionados para a indústria automotiva. A operação desses motores com altas performances e baixas emissões já foram mostradas por um número de pesquisadores. Entretanto, outros fatores continuam sendo limitantes no uso do hidrogênio, como falta de infraestrutura, estocagem e transporte.

O uso de hidrogênio em motores de ignição por compressão já foi estudado por alguns autores, porém, como citado acima, é muito difícil operar um motor a diesel com hidrogênio apenas através do aumento da taxa de compressão, devido à alta temperatura de autoignição do hidrogênio. O uso de pré-mistura de hidrogênio na admissão de ar em motores a diesel pode controlar melhor a ignição. Sistemas que utilizam hidrogênio na admissão tem a vantagem de enriquecer a queima do combustível, permitindo o uso de combustíveis com fracas ignições, tais como biocombustíveis. A necessidade de dois tanques combustível, difícil fornecimento e complexos sistemas de injeção fazem o conceito da mistura de dois combustíveis menos desejável.

Usando injeção direta de hidrogênio na câmara de combustão de um motor de ignição por compressão, resulta numa potência de saída maior que no uso de pré-mistura de hidrogênio na admissão e também supera os motores com combustíveis convencionais, desde que o calor estequiométrico de combustão seja maior para o hidrogênio (aproximadamente 3,37 MJ para Hidrogênio comparado com 2,83 MJ para gasolina) (White, 2006). Também não existiriam problemas como Detonação na válvula de admissão.

O estudo realizado por J.M. Gomes Antunes, R. Mikalsen e A.P. Roskilly apresenta o desenvolvimento de um experimento para se investigar as propriedades do

hidrogênio quando usado como combustível para motores de ignição por compressão. Um único cilindro de motor a diesel, modificado para injeção direta de hidrogênio, é utilizado nos experimentos. É controlado nos experimentos, a concentração de hidrogênio assim como o seu tempo de injeção, a posição do cilindro no momento da injeção e também a potência de saída e emissões de NOx. Devido à alta temperatura de autoignição do hidrogênio, um dispositivo de pré-aquecimento do hidrogênio é utilizado, de modo a aumentar a temperatura do hidrogênio em até 120°C, possibilitando assim uma combustão satisfatória do hidrogênio. O experimento é representado pela Figura 8 abaixo.

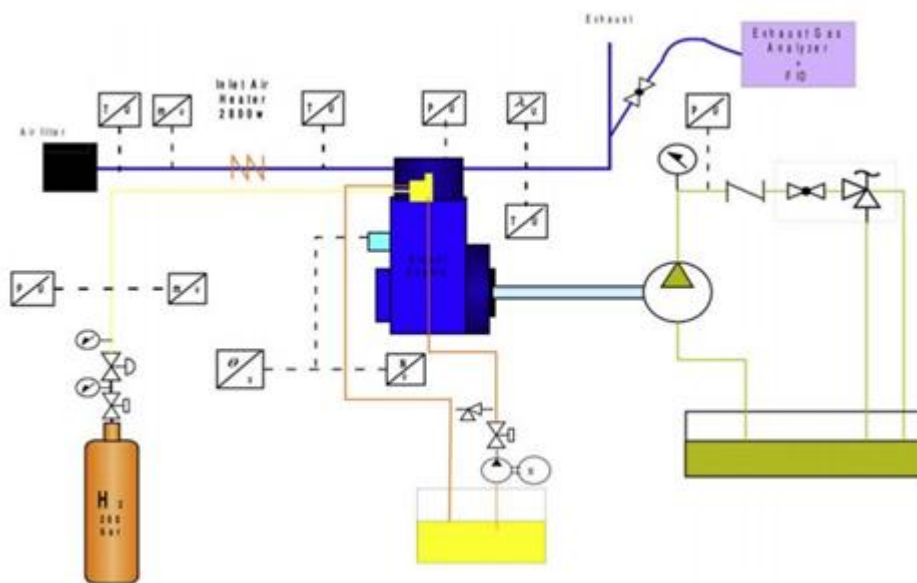


Figura 8 - Representação do experimento para se obter o desempenho em motores de ignição por compressão com Injeção Direta a Hidrogênio (Gomes et al., 2009)

Os resultados mostraram que o uso de hidrogênio por ID num motor a diesel aumentou a potência quando comparado ao uso do diesel, com a maior potência obtida sendo aproximadamente 14% maior. A eficiência do motor com ID de hidrogênio foi de 42,8%, maior que a eficiência de 27,9% obtida usando diesel. Isso se deve ao fato de que as perdas de calor e perdas por atrito nas paredes da combustão são menores devido às propriedades do combustível gasoso, levando a um enriquecimento da mistura combustível-ar. Os níveis de NOx foram aproximadamente 20% menores que aqueles obtidos em operação com o diesel, apesar de que os picos de pressão na câmara de combustão são maiores com o

hidrogênio, devido a alta taxa de combustão do hidrogênio. Os resultados são apresentados abaixo na Tabela 3 e na Figura 9, respectivamente.

Tabela 3 - Resultados experimentais da análise de motor de ignição por compressão (Gomes et al., 2009)

	Diesel DI	Dual fuel (diesel + H ₂)	H ₂ HCCI	H ₂ DI
Shaft output [%]	27.9	33.9	48.0	42.8
Cooling system [%]	42.2	31.2	20.4	17.3
Exhaust gases [%]	35.3	34.9	31.6	39.9
Shaft power [W]	9000	8950	7076	10,280

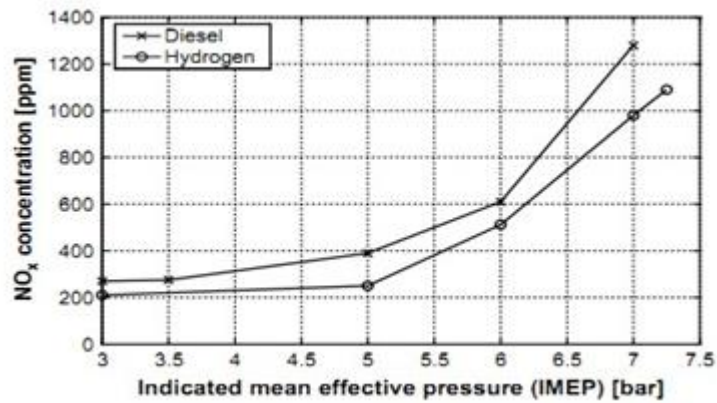


Figura 9 - Emissões de NO_x para operação com hidrogênio como combustível e diesel (Gomes et al., 2009)

Melhores resultados podem ser obtidos com o desenvolvimento de melhores injetores de hidrogênio e também com o desenvolvimento de designers de câmaras de combustão especificamente para utilização com hidrogênio como combustível.

3. PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO E UTILIZAÇÃO EM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA - EXPERIMENTOS

Diversas são as formas de se produzir o hidrogênio. Porém, na forma mais utilizada atualmente o hidrogênio é extratido de hidrocarbonetos. Dessa forma não é possível colocar o hidrogênio como fonte alternativa de energia, pois ainda há dependência de recursos fósseis. Como forma de se contornar esse problema serão propostas duas formas de se produzir hidrogênio: i) pela eletrólise da água, e ii) pela reação de alumínio proveniente de sucata com base alcalina e água.

Como propõe esse trabalho, o hidrogênio produzido “in situ” será direcionado diretamente para o carburador de uma motocicleta sem que seja feita qualquer alteração no equipamento.

3.1. PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO POR ELETRÓLISE

Eletrólise é uma reação eletroquímica onde energia elétrica é utilizada como força motora para ocorrência de reações químicas. Dessa forma substâncias são decompostas pela passagem de corrente elétrica por elas.

Na hidrólise a água é decomposta em hidrogênio e oxigênio pela passagem de corrente elétrica mediante a presença de eletrólitos dissolvidos. A corrente elétrica promove a migração de íons positivos de hidrogênio para o catodo imerso na solução, onde ocorre a redução desse íons para formação de hidrogênio gasoso. Em contra partida no anodo imerso ocorre à oxidação dos íons negativos de oxigênio ocorrendo assim a formação de oxigênio gasoso.

Esse processo apresenta uma série de benefícios como a facilidade de se controlar a reação por meio do suprimento de energia, reagentes de fácil obtenção e equipamento de construção simples. Porém apresenta também alguns pontos negativos como o alto consumo energético e a baixa produção de hidrogênio em relação a outras formas.

Como demonstra o esquema da Figura 10 o processo é simples e pode ser realizado com materiais cotidianos.

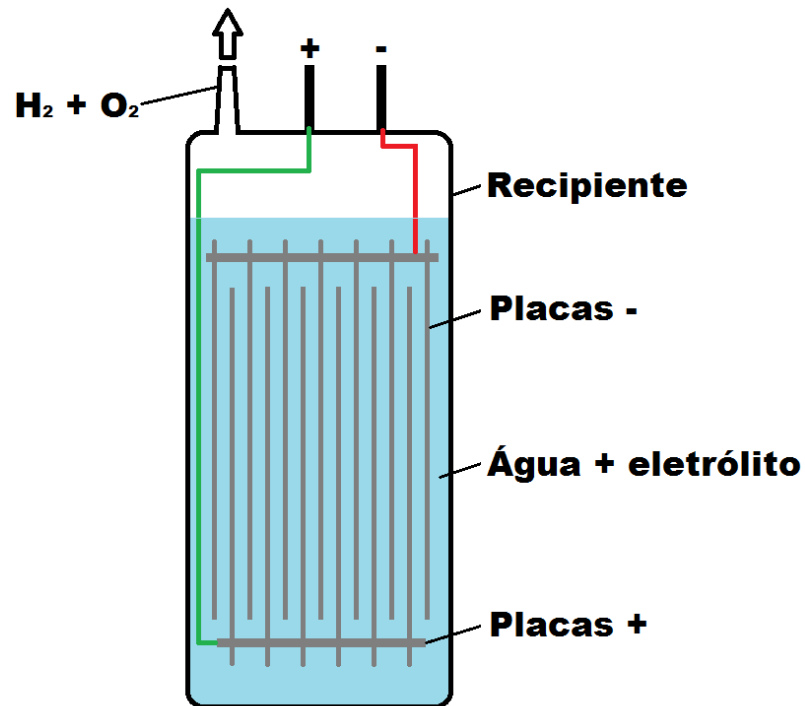


Figura 10 - Esquema construtivo do dispositivo de produção de hidrogênio por eletrólise

3.1.1. Experimento por eletrólise

Como objetivo do trabalho foi construído um dispositivo para realização de hidrólise em pequena escala. O equipamento foi baseado em projetos disponíveis da internet e realizado com materiais cotidianos.

3.1.1.1. Materiais e Métodos

Na execução desse experimento foram definidos alguns parâmetros baseados nos resultados encontrados por Yilmaz (2010). Os eletrodos aqui utilizados são do tipo placa com área superficial de 105 cm² e de aço inoxidável 316L. Foram usadas ao todo 9 placas.

Utilizamos como eletrólito NaOH comercial (Soda Cáustica) e a pureza determinada na Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico (FISPQ) pelo fabricante varia entre 68% e 70% em massa de NaOH.

Yilmaz (2010) ressalta que, se a molalidade do NaOH na solução exceder 1% pela massa, a corrente do suprimento pelas baterias terá um acréscimo drástico devido a grande redução da resistência elétrica da solução.

Dessa forma estabelecemos a fração mássica da solução em 1%. De posse dessas informações foi possível determinar a quantidade de Soda Caustica comercial para que fosse obtida a fração mássica desejada.

O suprimento de tensão foi estabelecido em 12 V corrente contínua (CC) por meio de baterias de uso automotivo, assim como também foi definido por Yilmaz (2010).

Supomos que a produção de hidrogênio + oxigênio (HHO) é diretamente proporcional à área do reator. Em seu trabalho, Yilmaz (2010) utilizou 14 placas de 80,5 cm² e obteve produção de 4 l/min mantendo-se os outros parâmetros inalterados. Dessa forma esperamos obter uma produção de 3,35 l/min de HHO.

Foram utilizados materiais comerciais encontrados com facilidade para construção e execução desse experimento, conforme Tabela 4. E as Figuras 11 e 12 trazem detalhes da construção do equipamento.

Tabela 4 - Materiais utilizados no experimento

Item	Quantidade
Recipiente de vidro com tampa hermética (120mm x 340mm – D x H)	1
Placas de aço inoxidável 316 L (70mm x 150mm x 0,5mm – B x H x E)	9
Suprimento de CC (bateria Automotiva)	1
Multímetro	1
Solução de NaOH	~1% em massa

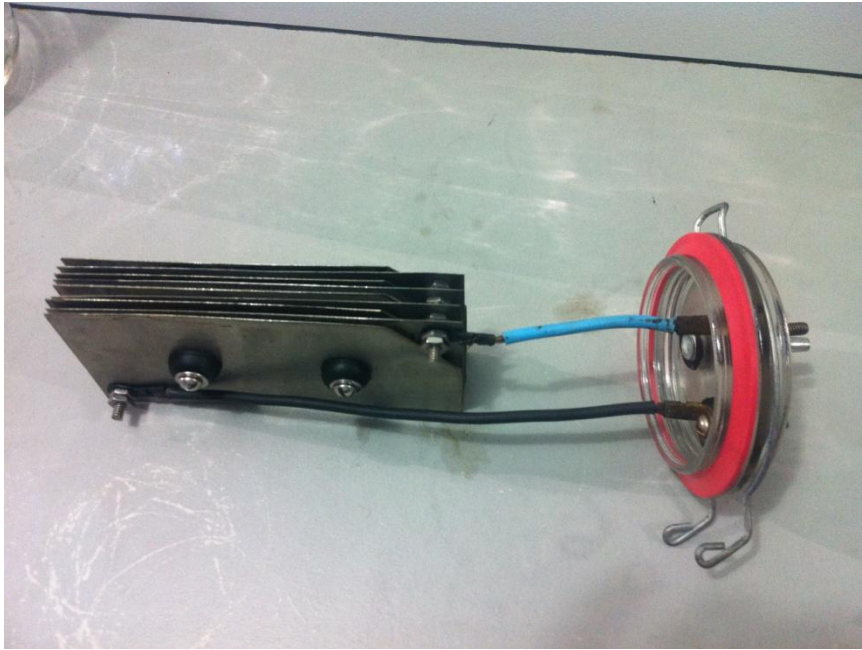


Figura 11 – Detalhe do dispositivo de eletrólise construído já acoplado à tampa do recipiente hermético que continha água e eletrólito



Figura 12 – Dispositivo de eletrólise por placas montado

No experimento realizado por Yilmaz (2010) foi encontrada uma potência de 0,13 KW. Supondo que também a potência é diretamente proporcional à área esperamos obter uma potência de 0,11 KW.

Desta forma, foi possível estimar a corrente elétrica em nosso experimento.

$$P = V \times A \quad A = 110 \text{ (W)} / 12 \text{ (V)} = 9,16 \text{ A}$$

Utilizamos um multímetro para avaliar a corrente elétrica que passava pelo sistema e também um termômetro para observar se a temperatura da solução seria suficiente para promover a ebulição. Tal situação seria indesejada, pois indicaria que vestígios de NaOH poderiam ir para o sistema de alimentação do motor e provocar avarias.

3.1.1.2. Resultados Encontrados

Foi possível medir no equipamento uma corrente de 11,4 A sob a mesma tensão de 12 V. Observou-se também que a carga da bateria automotiva rapidamente se exauriu.

Por não estar disponível equipamento para medir a vazão, esse parâmetro não pode ser avaliado. Porém pode ser observado baixa produção de gás quando avaliado o borbulhamento do gás produzido conduzido por mangueira para recipiente contendo água.

3.1.1.3. Discussão de resultados

Como sinaliza a Ficha Informação de Segurança de Produto Químico (Fispq) da Soda Cáustica utilizada (ANEXO A) há presença de Cloreto de Sódio na composição dessa. Sendo assim, é possível que se tenha obtido indesejavelmente a presença de cloro gasoso como resultante do processo e tal gás seria também conduzido à câmara de combustão podendo ali ocasionar efeitos corrosivos.

A corrente superior à prevista pode ser explicada pela composição do eletrólito que apesar de ter sido compensada a pureza da Soda Cáustica, um dos constituintes

dela é o Cloreto de Sódio, que também se apresenta como eletrólito. Outra explicação que pode dada é que as suposições precisam ser revistas.

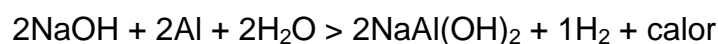
Um aspecto não abordado por Yilmaz (2010) seria a fuga de corrente pelas extremidades da placa que prejudicaria a eficiência do dispositivo, pois desviaria energia que poderia ser utilizada na eletrólise.

O processo de produção de hidrogênio por eletrólise realmente se apresenta como um processo lento de acordo com a literatura (Botton et al, 2008) quando comparado com o processo por reação de alumínio, base alcalina e água por exemplo.

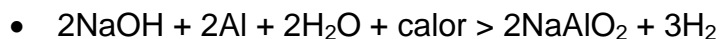
3.2. PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO POR REAÇÃO QUÍMICA DE BASE ALCALINA, ÁGUA E ALUMÍNIO

Essa reação consiste no ataque de alumínio metálico em solução de base alcalina, no caso Hidróxido de Sódio comercialmente conhecida como Soda Cáustica. A reação é imediata e ocorre da seguinte maneira. Duas reações concorrem pelos reagentes, uma exotérmica, de menor rendimento, e outra endotérmica de rendimento triplo em termos de produção de hidrogênio. A primeira serve de estopim para a segunda e ocorre na água ainda fria. Já a segunda só começa depois de ocorrer a inserção de certo calor.

- **1ª reação (exotérmica):**



- **2ª reação (endotérmica):**



Na 1ª reação as duas hidroxilas permanecem intactas. Já na 2ª reação as hidroxilas, que exigem muita energia para serem decompostas, são dissociadas. A energia necessária para ocorrência da 2ª reação é produto da 1ª reação exotérmica. Dessa forma os dois hidrogênios de cada aluminato da 1ª reação (2NaAl(OH)_2) são convertidos em hidrogênio gasoso e há formação do aluminato da 2ª reação (2NaAlO_2). Assim é triplicada a liberação de H_2 .

A reação foi promovida basicamente misturando-se os reagentes em recipiente hermético, sendo feita apenas a colocação de espigão na tampa do recipiente para que o gás produzido pudesse ser direcionado para o uso fim. O esquema construtivo desse experimento segue na figura 13.

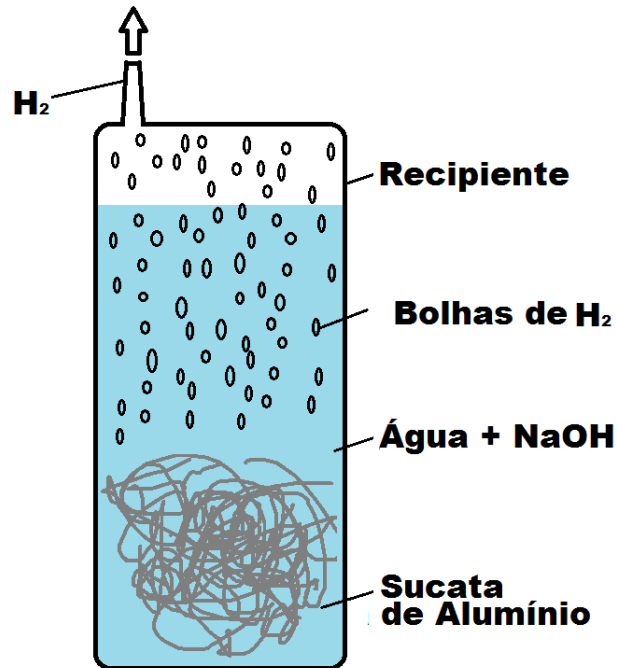


Figura 13 – Dispositivo de reação de sucata de alumínio, água e Soda Cáustica comercial.

Os aluminatos de sódio resultantes tanto da 1ª quanto da 2ª reação são muito úteis e podem ser estocados para venda. Servem como aceleradores de secagem de concreto, como aditivos em tijolos e telhas refratárias, como floculadores no tratamento de águas pluviais ou piscinas, e como recursos para se obter de volta o alumínio. Enfim, um subproduto valioso.

3.2.1. Viabilidade econômica da produção de hidrogênio por reação de alumínio, água e base alcalina

Como proposto inicialmente, foi realizada avaliação da viabilidade economicamente da substituição da gasolina, álcool e gás natural pelo hidrogênio. Para tanto, foi desenvolvida análise comparatória dos combustíveis convencionais com o

hidrogênio, tomando o Poder Calorífico Inferior (PCI) de cada um deles como parâmetro para equivalência.

A principal função de qualquer combustível é gerar calor. Esta propriedade é chamada de Poder Calorífico e é definida como sendo a quantidade de calor desprendida pela combustão estequiométrica do combustível. O Poder calorífico é definido em unidades de energia por unidade de massa. No caso de combustíveis líquidos e gasosos, ele pode ser expresso em unidades de energia por unidades de volume. Porém, neste caso, deve-se fornecer a referência de densidade e/ou as condições de temperatura e pressão.

O Poder Calorífico Superior (PCS) é normalmente medido em laboratório e o PCI é obtido indiretamente por cálculo. O que difere um do outro é o fato de o PCS levar em consideração o calor latente da água presente no combustível, e o PCI o despreza. Como a temperatura dos gases de combustão é muito elevada nas máquinas térmicas, a água contida neles se encontra sempre no estado de vapor. Portanto, deve-se considerar sempre o poder calorífico inferior e não o superior nos cálculos de eficiência de motores de combustão e na comercialização de combustíveis. Na Tabela 5 pode-se observar o Poder Calorífico e a densidade dos combustíveis avaliados.

Tabela 5 - Comparação do poder calorífico do hidrogênio com outros combustíveis

Combustível	Poder Calorífico Inferior (Kcal/Kg)	Densidade (g/l)
Etanol	6.437	789
Gás Natural	11.259	777*
Gasolina	10.377	745
Hidrogênio	28.712	-

FONTE: <http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/podercalorifico.htm>. *g/m³ a 1 atm e 0°C.

Dos dados da Tabela 5 pode-se obter que: 1l de Etanol possui 5.078,79 Kcal de PCI; 1m³ de gás natural possui 8.748,24 Kcal de PCI e 1l de gasolina possui 7.731Kcal de PCI.

Comparando-se os PCI dos combustíveis supracitados com o Hidrogênio podem-se propor as seguintes equivalências em termos de poder calorífico, as quais serão chamadas Parâmetros de Equivalência:

- 1l de etanol equivale a 177g de H₂;
- 1m³ gás natural equivale a 304g de H₂;
- 1l de gasolina equivale a 269g de H₂.

Avaliando a reação de produção de hidrogênio temos:

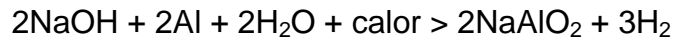


Tabela 6 - Propriedades físicas e preços médios dos reagentes e produtos da reação

Combustível	Massa Molar (g/mol)	Preço (R\$/g)
NaOH	40	0,005*
Al	36	0,003**
H ₂ O	18	-
NaAlO ₂	82	-
H ₂	2	-

FONTE: orçamentos em empresas de compra de metal para reciclagem e fornecedores de produtos químicos industriais.

De posse das informações da reação em equilíbrio e da Tabela 6 pode-se encontrar que para produzir 1g de hidrogênio gasoso são necessários: 13,34g de NaOH ao custo de R\$ 0,067 e 9g de Al ao custo de R\$ 0,027. O custo da água foi desconsiderado.

O custo de 1g de hidrogênio produzido por esse processo é em torno de R\$0,094. Na Tabela 7 pode-se comparar o custo do combustível convencional com o custo da quantidade equivalente de hidrogênio para se obter a mesma quantidade de energia.

Tabela 7 - Comparação do custo da substituição dos combustíveis convencionais pelo hidrogênio

Combustível	Preço do combustível	Parâmetro de Equivalência	Preço da quantidade de H2 equivalente
Etanol	R\$ 2,54 por l	177	R\$ 16,64
Gás Natural	R\$ 1,86 por m ³	304	R\$ 28,58
Gasolina	R\$ 2,89 por l	269	R\$ 25,29

FONTE: http://www.anp.gov.br/preco/prc/Resumo_Semanal_Posto.asp.

Da tabela podemos concluir que a energia de 1l de etanol se fosse proveniente do hidrogênio custaria R\$16,64 ao invés de R\$2,54. Da mesma forma, a energia de 1m³ de gás natural se fosse oriunda do hidrogênio custaria R\$28,58 ao invés de R\$1,86. E por fim a energia de 1l de gasolina caso fosse proveniente do hidrogênio teria o custo de R\$25,29 e não R\$2,89.

Tomando como base um tanque de veículo de 50 litros. Caso abastecido com gasolina teria o custo de R\$144,50. Porém se for abastecido com hidrogênio, para obter o mesmo Poder Calorífico, seriam necessários R\$1264,50.

3.2.2. Discussão

Nesse tipo de produção observa-se uma série de benefícios como a alta produtividade de hidrogênio em relação à produção por eletrolise, possibilidade de utilizar-se de sucata como insumo, e como subproduto tem-se um composto útil a outros processos econômicos. Porém também são visíveis alguns problemas como a dificuldade em se interromper a reação para que seja controlado o consumo de insumos e a formação hidrogênio, além do alto custo final necessário.

A primeira vista pode parecer inviável a utilização da reação do alumínio, base alcalina e água para obter hidrogênio. Porém os benefícios ambientais dessa utilização são muito evidentes e devem ser considerados. A avaliação econômica depende de uma série de fatores. Incentivos do governo para utilização de fontes alternativas pode ser fundamental para viabilidade desse projeto. Não foi avaliado

também nesse experimento como esse combustível se comportaria no motor em termos de rendimento e essa análise influirá nessa viabilidade.

3.3. UTILIZAÇÃO DE HIDROGÊNIO PRODUZIDO “IN SITU” EM MOTOR CICLO OTTO

A proposta inicial de se verificar a possibilidade de um motor funcionar somente com a substituição do combustível convencional por hidrogênio gasoso foi testada e os resultados, mesmo que qualitativos, foram avaliados.

3.3.1. Materiais e métodos

Uma moto Yamaha do modelo Ybr fabricada em 2007 foi utilizada como protótipo. Essa moto, demonstrada ilustrativamente na figura 14 é equipada com motor ciclo Otto com potência nominal de 125cc, cujas especificações estão listadas na Tabela 8.



Figura 14 – Figura ilustrativa da moto utilizada no experimento

Tabela 8 - Especificações técnicas do motor utilizado no experimento

Característica	Especificação
Tipo	Refrigerado a ar, 4 tempos, SOHC
Disposição do cilindro	Monocilíndrico, inclinado à frente
Cilindrada	123,7 cm ³
Diâmetro x Curso	54 x 54 mm
Taxa de compressão	10 : 1
Pressão de compressão (padrão)	1.200 KPa (12 Kg/cm ² , 171 psi)
Sistema de Partida	Elétrico e a pedal
Sistema de lubrificação	Cárter úmido

FONTE: YBR 125, Guia de serviço Yamaha motor da amazônia LTDA.

Foi utilizado hidrogênio produzido por meio de reação de base alcalina, água e alumínio, pois nesse tipo de produção pôde ser observada maior taxa de produção de hidrogênio. O gás produzido de acordo com o especificado no tópico 3.2. desse trabalho foi diretamente conduzido por meio de mangueira transparente para o carburador moto.

Antes que fosse inserido o suprimento de hidrogênio a mangueira que conduz gasolina para o carburador foi retirada e a moto funcionou até o motor parasse de funcionar por falta de combustível. A condição de falta de combustível foi então verificada com sucessivas tentativas de partida sem que fosse logrado êxito.

Foi então inserido o suprimento de hidrogênio proveniente da reação e foi dado partida na moto.

3.3.2. Resultados

O motor funcionou prontamente e foi possível locomover-se com a moto sem que pudesse ser observada, inicialmente, perda de potência.

O teste foi repetido por algumas vezes e a cada repetição observava-se maior dificuldade em dar partida no motor. E quando era possível a partida, o funcionamento não se sustentava por muito tempo, mesmo tendo ainda produção de

hidrogênio intensa no dispositivo de produção “in situ”, ou ainda ocorria a interrupção do funcionamento quando era exigido maior aceleração.

Pode ser observada a formação de condensado na mangueira transparente que conduzia o gás do dispositivo de produção “in situ” até o carburador da moto.

3.3.3. Discussão

O funcionamento irregular do motor foi atribuído à presença de água no carburador. Porém apesar disso a avaliação do experimento é positiva, pois foi possível verificar que a substituição é possível mesmo sem alterações nos equipamentos. E os obstáculos encontrados podem ser superados.

Uma possibilidade crítica que deve ser considerada é entrada de resíduos de NaOH no carburador, isso provocaria oxidação e grandes danos no carburador, bem como no cabeçote e pistão do motor.

4. COMENTÁRIOS FINAIS E SUGESTÕES

O hidrogênio continua sendo uma possibilidade de energia limpa para o futuro. Porém, ainda se faz necessário sobrepor muitos obstáculos como armazenamento, tecnologia de produção in situ e principalmente de custos.

Como demonstrado na revisão bibliográfica feita, o estudo do hidrogênio em motores de combustão interna tem tido grandes avanços e resultados promissores. Porém os efeitos da utilização desse combustível nas partes internas do motor precisam ser mais bem avaliados.

A produção de hidrogênio por reação de base alcalina, água e alumínio se mostrou bastante eficiente e apesar de ser, até o momento, inviável economicamente, merece ser observada com atenção, pois apresentou grande eficiência em produzir hidrogênio gasoso.

Ao final deste trabalho pode ser apresentado que tecnicamente a proposta de substituir os combustíveis convencionais pelo hidrogênio é possível e que não são necessárias grandes alterações construtivas nos motores para isso. Foi possível também proporcionar ao laboratório de motores de combustão interna embasamento para o início de uma linha de pesquisa da utilização desse gás em motores de combustão interna, contando inclusive com material para produção de hidrogênio por eletrólise.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aleiferis P., Rosati M., Hydrogen SI and HCCI combustion in a direct-injection optical engine, SAE Paper No. 2009-01-1921 (2009).

Apostolescu N., and Chiriac R., A Study of Combustion of Hydrogen-Enriched Gasoline in a Spark Ignition Engine. SAE Paper (2006).

Azuaga D., Danos Ambientais Causados por Veículos Leves no Brasil (Rio de Janeiro), 2000, XV, 168p. 29,7cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Planejamento Energético, 2000).

D'Errico G., Onorati A., Ellgas S., 1d thermo-fluid dynamic modelling of an SI single-cylinder H₂ engine with cryogenic port injection, Int. J. Hydrogen Energy 33 5829–5841 (2008).

Das L. M., Exhaust Emission Characterization of Hydrogen Operated Engine System: Nature of Pollutants and Their Control Techniques. International Journal of Hydrogen Energy, 16:765–75 (1991).

Das L. M., Near-Term Introduction of Hydrogen Engines For Automotive and Agriculture Application. International Journal of Hydrogen Energy, 27:479–87. (2002).

DeLuchi M. A., Hydrogen vehicles: an evaluation of fuel storage, performance, safety, environmental impacts, and cost, Int. J. Hydrogen Energy 14 81–130 (1989).

Eichlseder H., Klell M., Sartory M., Schaffer K., Leitner D., Potential of synergies in a vehicle for variable mixtures of CNG and hydrogen, SAE Paper No. 2009-01-1420 (2009).

Eichlseder H., Wallner T., Freymann R., Ringler J., The potential of hydrogen internal combustion engines in a future mobility scenario, SAE Paper No. 2003-01-2267 (2003).

Ellgas S., Simulation of a hydrogen internal combustion engine with cryogenic mixture formation, Ph.D. thesis, University of Armed Forces Munich (2008).

Francfort J. E., Karner D., Hydrogen ICE vehicle testing activities, SAE Paper No. 2006-01-0433 (2006).

Goldemberg J., Energia e desenvolvimento. *Estud. av.* (online). vol.12, n.33, pp. 7-15. ISSN 0103-4014, (1998).

Hallmannsegger M., Potentials of the four-stroke Otto engine with PFI of cryogenic hydrogen, Ph.D. thesis, Graz University of Technology (2005).

Heindl R., Eichseder H., Spuller C., Gerbig F., Heller K., New and innovative combustion systems for the H₂-ICE: Compression ignition and combined processes, SAE Paper No. 2009-01-1421 (2009).

Heller K., Ellgas S., Optimisation of a hydrogen internal combustion engine with cryogenic mixture formation, 1st (Int.) Symp. on Hydrogen Internal Combustion Engines 49–58 (2006).

Jingding L., Formation and Restraint of Toxic Emissions in Hydrogen-Gasoline Mixture Fueled Engines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 23:971-5 (1998).

Kaiser S. A., White C. M., PIV and PLIF to evaluate mixture formation in a direct-injection hydrogen-fueled engine, SAE Paper No. 2008-01-1034 (2008).

Kiesgen G., Kluting M., Bock C., Fischer H., The new 12-cylinder hydrogen engine in the 7 series. the H₂ ICE age has begun., SAE Paper No. 2006-01-0431 (2006).

King, R.O., and Rand M., The Hydrogen Engine *Canadian Journal Technology*, 33:445–69 (1955).

Kirchwegger W., Eichseder H., Gerbig F., Gerke U., Optical measurement methods for the optimization of the hydrogen DI combustion, 7th International Symposium on Internal Combustion Engines Diagnostics (Baden-Baden, Germany, 2006).

Kondo, T., Lio S., Hiruma M., A study on the mechanism of backfire in external mixture formation hydrogen engines –about backfire occurred by the cause of the spark plug–, SAE Paper No. 971704 (1997).

Kovac K., Wimmer A., Hallmannsegger M., Obieglo A., Mixture formation and combustion in a hydrogen engine - a challenge for the numerical simulation, *International Congress on Engine Combustion Processes - Current Problems and Modern Techniques* (Munich, Germany, 2005).

Lee J., Kim T., and Lee C.W., An Investigation of a Cause of Backfire and Its Control Due to Crevice Volumes in a Hydrogen Fueled Engine. ASME, 123:204-10 (2001).

Li H., Karim G. A., Hydrogen fueled spark-ignition engines predictive and experimental performance, Trans. ASME: J. Eng. Gas Turbines Power 128 230–236 (2006).

Mohammadi, Shioji M., Matsui Y., Kajiwara R., Spark-ignition and combustion characteristics of high-pressure hydrogen and natural-gas in-intermittent jets, Trans. ASME: J. Eng. Gas Turbines Power 130 062801–1–7 (2008).

Olavson L. G., Baker N. R., Lynch F. E., Meija L. C., Hydrogen fuel for underground mining machinery, SAE Paper No. 840233 (1984).

Osafune S., Akagawa H., Ishida H., Egashira H., Kuma Y., Iwasaki W., Development of hydrogen injection clean engine, CIMAC Congress Paper No. 207 (Kyoto, Japan, 2004).

Prumm W., Hydrogen engines for city buses, Proceedings 1st international symposium on hydrogen internal combustion engines pp111 (Graz, Austria, 2006).

Ringler J., Gerbig F., Eichlseder H., Wallner T., Insights into the development of a hydrogen combustion process with internal mixture formation, Proceedings 6th International Symposium on Internal Combustion Diagnostics (Baden Baden, Germany, 2004).

Rottengruber H., Berckmuller M., Elsasser G., Brehm N., Schwarz C., Operation strategies for hydrogen engines with high power density and high efficiency, 15th Annual U.S. Hydrogen Conference (Los Angeles, California, 2004).

Salazar V. M., Kaiser S. A., Nande A. M., Wallner T., The influence of injector position and geometry on mixture preparation in a DI hydrogen engine, 9th International Congress 'Engine Combustion Process - Current Problems and Modern Technologies' (Munich, Germany, 2009).

Salimi F., Shamekhi A. H., Pourkhesalian A. M., Role of mixture richness, spark and valve timing in hydrogen-fuelled engine performance and emission, Int. J. Hydrogen Energy 34 3922–3929 (2009).

Sierens R., Rosseel E., Backfire mechanism in a carburetted hydrogen fuelled engine, 12th World Hydrogen Energy Conference 1537–1546 (Buenos Aires, Argentina, 1998).

Steinruck P., Ranegger G., Timed injection of hydrogen for fuel cells and internal combustion engines, Proceedings 1st international symposium on hydrogen internal combustion engines pp164177 (Graz, Austria, 2006).

Stockhausen W. F., Natkin R. J., Reams L., Crankcase ventilation system for a hydrogen fueled engine, US patent no. 6,606,982 B1 (August 2003).

Szwabowski S., Hashemi S., Stockhausen W., Natkin R., Reams L., Kabat D., Potts C., Ford hydrogen engine powered P2000 vehicle, SAE Paper No. 2002-01-0243 (2002).

Tang X., Stockhausen W. F., Kabat D. M., Natkin R. J., Heffel J. W., Ford P2000 hydrogen engine dynamometer development, SAE Paper No. 2002-01-0242 (2002).

Verhelst S., Maesschalck P., Rombaut N., Sierens R., Increasing the power output of hydrogen internal combustion engines by means of supercharging and exhaust gas recirculation, Int. J. Hydrogen Energy 34 4406–4412 (2009).

Verhelst S., Sierens R., Aspects concerning the optimisation of a hydrogen fueled engine, Int. J. Hydrogen Energy 26 981–985 (2001).

Wallner T., Lohse-Busch H., Gurski S., Duoba M., Thiel W., Martin D., Korn T., Fuel economy and emissions evaluation of a BMW hydrogen 7 mono-fuel demonstration vehicle, Int. J. Hydrogen Energy 33 7607–7618 (2008).

Wallner T., Scarcelli R., Nande A., Naber J., Assessment of multiple injection strategies in a direct injection hydrogen research engine, SAE Paper No. 2009-01-1920 (2009).

Wallner T., Ciatti S., Bihari B., Investigation of injection parameters in a hydrogen DI engine using an endoscopic access to the combustion chamber, SAE Paper No. 2007-01-1464 (2007).

Welch A., Mumford D., Munshi S., Holbery J., Boyer B., Younkins M., Jung H., Challenges in developing hydrogen direct injection technology for internal combustion engines, SAE Paper No. 2008-01-2379 (2008).

White C. M., Steeper R. R., Lutz A E.. The Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engine: A Technical Review. International Journal of Hydrogen Energy, 31:1292-1305 (2006).

Wimmer A., Wallner T., Ringler J., Gerbig F., H₂-direct injection a highly promising combustion concept, SAE Paper No. 2005-01-0108 (2005).

Yilmaz, A. C., Design and applications of Hydroxy (HHO) System, MSc thesis, 2010.

ANEXO A - FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTO QUÍMICO (página 1).



FISPQ PRODUTO SODA CÁUSTICA

FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTO QUÍMICO

1 - IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO E DA EMPRESA

Nome do Produto : Soda Cáustica (NaOH) – escamas ou fundida

Nome da Empresa : Mantovani Indústria Química Ltda

Endereço da sede : Rua Ângelo Mattioli, 63. – Cep: 14077-380

Bairro: Pq. Industrial Avelino Alves Palma.

Ribeirão Preto – SP – (16) 3628-4349

Telefone de emergência : (16) 3628-4349

2 – COMPOSIÇÃO E INFORMAÇÕES SOBRE OS INGREDIENTES

Substância : Hidróxido de Sódio

Nome Químico Comum ou

Nome Genérico : Soda Cáustica

(Soda Cáustica em Escamas ou Fundida)

Sinônimo : Soda Cáustica em Escamas ou Fundida

Composição : 68 a 70 % de Hidróxido de Sódio em peso

Cloreto de Sódio

Água

Registro no Chemical

Abstract Service (CAS) : 1310-73-2

Ingredientes que

Contribuem para o

Perigo : O produto em si