

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA EDUCAÇÃO CONTINUADA DA ESCOLA
POLITÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS, GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

GUSTAVO DE ANDRADE BARRETO

**AVALIAÇÃO DE METODOLOGIAS DE APLICAÇÃO DE OXI-
HIDROGÊNIO EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**

**SÃO PAULO
2014**

GUSTAVO DE ANDRADE BARRETO

**AVALIAÇÃO DE METODOLOGIAS DE APLICAÇÃO DE OXI-HIDROGÊNIO EM
MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - PECE, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Energia Renovável, Geração Distribuída e em Eficiência Energética.

Orientador: Profa. Dra. Patricia Helena Lara dos Santos Matai

SÃO PAULO
2014

EU AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Barreto, Gustavo de Andrade.

Avaliação de metodologias de aplicação de oxi-hidrogênio em motores de combustão interna./ Gustavo de Andrade Barreto; orientador : Patricia Helena Lara dos Santos Matai. – São Paulo, 2014.

49f.: il.; 30 cm.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e em Eficiência Energética) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1. Motores a Combustão. 2. Hidrogênio. 3. Geração de Hidrogênio.

Título

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA EDUCAÇÃO CONTINUADA DA ESCOLA POLITÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

GUSTAVO DE ANDRADE BARRETO

“Avaliação de metodologias de aplicação de oxi-hidrogênio em motores de combustão interna”

Monografia defendida e aprovada pela comissão julgadora:

Profa.Dra. Patricia Helena Lara dos Santos Matai
Orientadora e Presidente da Comissão Julgadora

Prof.Dr. José Roberto Simões Moreira – PECE/USP

Prof.Dr. Ivan Eduardo Chabu – PECE/USP

DEDICATÓRIA

À minha esposa, com amor e gratidão
pela compreensão e incentivo durante o
curso e na elaboração deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus e a toda espiritualidade pela oportunidade de ajudar ao progresso.

À minha orientador a Profa. Dra. Patricia Helena Lara dos Santos Matai pela confiança e amizade.

À coordenação do curso, na figura do Prof.Dr. José Roberto Simões Moreira, pela concessão da bolsa de estudos, sem a qual esta empreitada não teria sido possível.

Aos meus pais, Dirceu e Iolanda, aos meus irmãos, Carmen, Paula, Luciane e Raphael, à minha filha Mariane, aos enteados, às noras e aos netos por darem mais significado à minha vida.

OBRIGADO.

RESUMO

BARRETO, Gustavo de Andrade. **Avaliação de Metodologias de Aplicação de Oxi-Hidrogênio em Motores de Combustão Interna.** 2014. 49f. Monografia (Especialista) Programa de Educação Continuada – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

O objetivo deste trabalho foi um estudo para avaliar as metodologias de aplicação de oxi-hidrogênio em motores de combustão interna (MCI), como aditivo melhorador de eficiência energética e de desempenho ambiental, divulgadas em meios de comunicação. Para tanto, pretendeu-se selecionar algumas metodologias disponíveis em meios de comunicação que clamam ser capazes de promover significativas economias de combustível ao mesmo tempo em que reduzem a emissão de poluentes. Estas metodologias vêm sendo divulgadas através de tutoriais para construção caseira de equipamento de eletrólise da água, gerando o oxi-hidrogênio a bordo do veículo e insuflando-o junto ao ar aspirado, para queima imediata no seu motor, sem estocagem. Tanto estes tutoriais quanto alguns conjuntos de equipamentos vendidos prontos são acompanhados de informações ditas técnicas e científicas que procuram justificar seu uso e difusão. O objetivo do estudo proposto é observar estas informações à luz do conhecimento científico disponível para avaliar a sua veracidade quanto aos propalados ganhos.

Palavras-chave: Motores a combustão, hidrogênio.

ABSTRACT

BARRETO, Gustavo de Andrade. **Analysis of Methodologies for Oxi-Hydrogen Employment on Internal Combustion Engines.** 2014. 49f. Monography (Specialist) Continued Education Program – Polythecnic School, São Paulo University, São Paulo, 2014.

The objective of this work was to develop a study to evaluate the application methodologies of oxy-hydrogen in internal combustion (MCI) engines such as energy efficiency and enhancing the environmental performance additive, published in the media. To do so, we intended to select a few methods available in the media that claim to be able to promote significant fuel savings while reducing the emission of pollutants. These methodologies have been disseminated through tutorials for homemade construction of water electrolysis equipment, generating the oxy-hydrogen on board the vehicle and inflating it with the air drawn, ready to burn in the engine without storage. Both, tutorials and a few sets of equipment sold are accompanied by these technical and scientific information that seek to justify its use and dissemination. The objective of the proposed study is to observe this information considering the available scientific knowledge to evaluate its veracity as the vaunted gains.

Keywords: Internal combustion engines, hydrogen, water electrolysis, Brown gas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.1: Equipamentos industriais de eletrólise da água no final do século XIX. Fonte: Scientific American, 1891	16
Figura 2.1.1.1: Dispositivo gerador de Oxi-Hidrogênio para iluminação. Fonte: PAINÉ,1884.....	17
Figura 2.3.1: Elementos de uma sonda lambda. Fonte: Bosch,2014.	23
Figura 2.3.2: Esquemático de passagem da mistura e posicionamento das sondas lambda. Fonte: Bosch,2014. .	24
Figura 2.3.3: Curva de resposta de uma sonda lambda, tensão (V)/valor de lambda(λ). Fonte: Bosch,2014.....	25
Figura 3.1.1: Ilustração do dispositivo de eletrólise de Hoffman. Fonte: Ivan Akira (http://en.wikipedia.org/),2007.	27
Figura 3.1.2: Eletrolisadores de dois eletrodos em série. Fonte: KELLY,2005.	27
Figura 3.1.3: Arranjo das placas do dispositivo Smack´s Booster (Vista lateral). Fonte: KELLY, 2008.....	28
Figura 3.1.4: Arranjo das placas do dispositivo Smack´s Booster (Vista superior). Fonte: Elaborado a partir do original de KELLY, 2008.	29
Figura 3.1.5: Vistas esquemáticas do eletrolisador proposto Fonte: Elaborado pelo autor, 2014.	30
Figura 3.1.6: Destilador de água solar. Fonte: Acervo do autor, 2014.	32
Figura 3.1.7: Quadro comparativo de ligas de aço inoxidável austeníticos segundo a classificação AISI. (Valores porcentuais da massa) Fonte: SANCHES, 2009.	33
Figura 3.1.8: Comparativo (antes/depois) entre placas negativas de aço 316 (esquerda) e 304, usadas com 10~15A em solução de Hidróxido de Sódio, por 90.000milhas. Fonte: http://hydro-extra.webs.com/why316lstainless.htm Acessado:10/05/2014.	34
Figura 4.1.1: Vista lateral do dispositivo eletrolisador construído para este estudo. Fonte: Acervo do autor.	35
Figura 4.1.2: Vista frontal do dispositivo eletrolisador construído para este estudo. Fonte: Acervo do autor.	36
Figura 4.1.3: Quadro com características da motorização testada. Fonte: http://imperio4x4.com.br/manuais/mwm/229.htm	37
Figura 4.1.4: Reservatório <i>ad hoc</i> semi-transparente com graduação a cada 250ml. Fonte: Acervo do autor, 2014.	38
Figura 4.1.5: Posicionamento do eletrolisador no compartimento do motor. Fonte: Acervo do autor, 2014.	39
Figura 4.1.6: Posicionamento do eletrolisador e do borbulhador de segurança. Fonte: Acervo do autor, 2014....	39
Figura 4.1.7: Quadro resumo dos resultados do teste de percurso.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS

A	Ampére, unidade de corrente elétrica
AISI	American Iron and Steel Institute
CC	Corrente Contínua
DC	<i>Direct Current</i>
EFIE	<i>Electronic Fuel Injection Enhancer</i>
EP	Escola Politécnica
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i> (EUA)
EUA	Estados Unidos da América
GN	Gás Natural
HHO	Hydrogen-Hydrogen-Oxygen (se refere aos gases da eletrólise da água)
NASA	National Aviation and Space Agency
PECE	Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica
PEM	<i>Polymer Electrolite Membrane</i>
PMS	Ponto Morto Superior
RPM	Rotações por Minuto
UCM	Unidade de Controle do Motor
URL	<i>Universal Resource Locator</i>
USP	Universidade de São Paulo
V	Volt, unidade de diferença de potencial elétrico

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	11
1.1 JUSTIFICATIVA	13
1.2 OBJETIVOS	13
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	13
CAPÍTULO 2	15
2.1 A ELETRÓLISE DA ÁGUA	15
2.1.1 ELETRÓLISE DA ÁGUA DE CONDUTO ÚNICO	17
2.2 ESTEQUIOMETRIA	18
2.3 A SONDA LAMBDA	21
CAPÍTULO 3	26
3.1 MATERIAIS E MÉTODOS	26
CAPÍTULO 4	35
4.1 RESULTADOS	35
4.2 DISCUSSÃO	41
5. CONCLUSÃO	44
5.1.1 Sugestões para trabalhos futuros	45
REFERÊNCIAS	46
REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES	49

INTRODUÇÃO

Apesar de os preços do petróleo bruto estarem relativamente estáveis, existem razões para preocupação quanto à continuidade do suprimento nas quantidades atuais. Muitos estudiosos do setor advertem para uma tendência de diminuição da produção em algum momento nas próximas duas décadas, ou seja, estamos próximos de alcançar o pico de produção de petróleo. Após este máximo de produção haveria uma redução paulatina e a extinção de campos petrolíferos menores, restando então os grandes campos do oriente médio que devem ter uma sobrevida maior.

Independentemente do acerto de tais previsões quanto ao volume das reservas, o que é certo é que a exploração tem se tornado sempre mais cara desde o início da exploração comercial deste energético. A expectativa que permeia a sociedade mundial é de uma possível escassez ou, antes, uma elevação de preços.

As normas governamentais ao redor do mundo, nos últimos 20 ou 30 anos, têm tido como objetivo maior a redução de poluentes, conseguindo a melhoria de eficiência do consumo do combustível como um subproduto. Ao se melhorar a queima também se melhora a eficiência do processo. Mais recentemente, metas de redução de consumo pela distância têm sido impostas. Porém, como os motores a combustão já estão próximos dos limites tecnológico/econômico, o que se obteve foi uma redução de massa transportada.

Enquanto a sociedade aguarda pela viabilidade econômica de novas tecnologias híbridas (parecem as mais promissoras no momento), a sociedade se mobiliza para obter maior deslocamento possível dos seus veículos a partir dos mesmos litros de combustível líquido, medidos em quilômetros por litro de combustível no Brasil.

Este momento favorece que inventores de soluções marginais (*fringe science*) passem a disponibilizar meios de economizar combustível baseados em metodologias não ortodoxas, sem esclarecer os custos da pretendida economia, se é que alguma economia é obtida. Pode haver custos de vida útil do motor, aumento de emissões de diferentes tipos e mesmo a perda do investimento inicial.

Escopo do estudo

O estudo proposto pretende basear-se em metodologias disponibilizadas em meios de comunicação, em especial na Internet, para coletar a metodologia de geração de oxihidrogênio a bordo de veículos automotores para queima imediata juntamente com o

combustível primário do veículo. Verificar as variações desta metodologia e procurar avaliar teoricamente a sua viabilidade e eficiência teórica.

Metodologia

- Análise e agrupamento das metodologias disponíveis;
- Análise das teorias que norteiam as alegações de eficiência;
- Verificação empírica dos processos envolvidos;
- Análise dos resultados;

1.1 JUSTIFICATIVA

Um estudo sobre o tema se justifica pelo próprio debate que se alonga há anos, sem que se chegue a uma conclusão. Muitos discursam sobre as partes isoladas do processo, porém, dizer que o processo de eletrólise da água, por exemplo, é ineficiente sem atentar para o sistema como um todo pode ser tão temerário quanto às afirmações daqueles que têm interesse em comercializar seus equipamentos.

O órgão governamental americano *Environmental Protection Agency* (EPA) mantém uma página onde são publicados resultados de testes de soluções economizadoras de combustível (EPA, 2014) para esclarecimento do público consumidor. Os últimos testes, no entanto, datam de 2005. Isto se deve principalmente por ser um programa voluntário, onde os fabricantes inscrevem seus produtos para passar pelas avaliações de laboratórios independentes. Até o momento não havia nenhum fabricante de soluções que envolviam eletrólise da água inscritos neste programa.

1.2 OBJETIVOS

Assim, este estudo objetiva que o assunto seja estudado, de forma sistemática e abrangente à luz do conhecimento científico atual e, especificamente, que seja montado um equipamento equivalente para testes de campo.

Especificamente, este trabalho pretende trazer como contribuição à montagem de um equipamento de eletrólise de água embarcado em um veículo para testar os parâmetros reais de aplicação das metodologias estudadas e divulgação dos resultados auferidos.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 5 partes, sendo que, na primeira parte, encontra-se a introdução, a justificativa, os objetivos principais e uma breve apresentação de informações relacionadas ao tema proposto.

No segundo capítulo realiza-se um breve resumo dos principais tópicos da teoria, necessários à melhor compreensão e aplicáveis aos sub-sistemas estudados.

O terceiro capítulo dedica-se à apresentação da seleção de materiais e métodos de trabalho que norteiam as fases seguintes do estudo.

No capítulo 4 apresentam-se os resultados aferidos nos testes empíricos e, em seguida, procede-se à discussão sobre o tema proposto e análise de tais resultados.

No capítulo 5 externam-se as conclusões finais, as limitações da pesquisa e as sugestões de futuras pesquisas.

Uma lista de endereços de internet (URLs) pode ser encontrada nas referências complementares para os interessados em se aprofundar no tema.

CAPÍTULO 2

2.1 A ELETRÓLISE DA ÁGUA

Eletrólise da água convencional é o processo de decomposição da água (H_2O) em hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2) por meio da passagem de corrente elétrica contínua (CC ou DC no inglês) através dessa água. Como, aqui, a eletricidade é um pré-requisito, a eletrólise da água surgiu apenas semanas após a invenção da Pilha Voltaica por Alessandro Volta em 1800, a primeira bateria. Anteriormente, a eletricidade que se conhecia era a Eletricidade Estática, que era produzida com altas tensões, mas com pouca energia, o que indica a contribuição trazida pelo invento de Volta à ciência: a constância e quantidade de energia. Os ingleses William Nicholson e Anthony Carlisle usaram a pilha de Volta para decompor a água.

Mais tarde, os gases produzidos durante o processo de eletrólise da água foram identificados como hidrogênio e oxigênio. Anteriormente, em 1766, Henry Cavendish foi o primeiro a afirmar que o gás hidrogênio (ainda não tinha esse nome) era uma substância nova, ao chamar de "ar inflamável" o gás liberado de uma reação de ataque ácido em metal e, em 1781, registrar que o que o gás produz água quando queimado. Foi Antoine Lavoisier quem batizou tal substância com o nome de hidrogênio (do grego *hydro* e *genes*, que gera água), em 1783, quando ele e Pierre Simon Laplace reproduziram o experimento de Cavendish, onde água era produzida quando hidrogênio é queimado.

Com o avanço da eletroquímica, Michael Faraday estabeleceu, em 1834, a proporcionalidade entre a quantidade de gás produzido na eletrólise da água e a energia elétrica consumida. Tal proporcionalidade ficou conhecida como as leis (pois são duas) de Faraday da eletrólise. Com a invenção da máquina de Gramme, um gerador elétrico criado em 1869 pelo belga Zénobe Gramme, a eletrólise da água se tornou um meio econômico de produção de hidrogênio. A produção industrial desses gases pela eletrólise foi aprimorada em 1888 pelo russo Dmitry Lachinov e, pouco depois, em 1902, mais de 400 equipamentos industriais de eletrólise já operavam. Na figura 2.1.1, a seguir, é apresentada uma ilustração de equipamentos industriais para produção de hidrogênio naquela época.

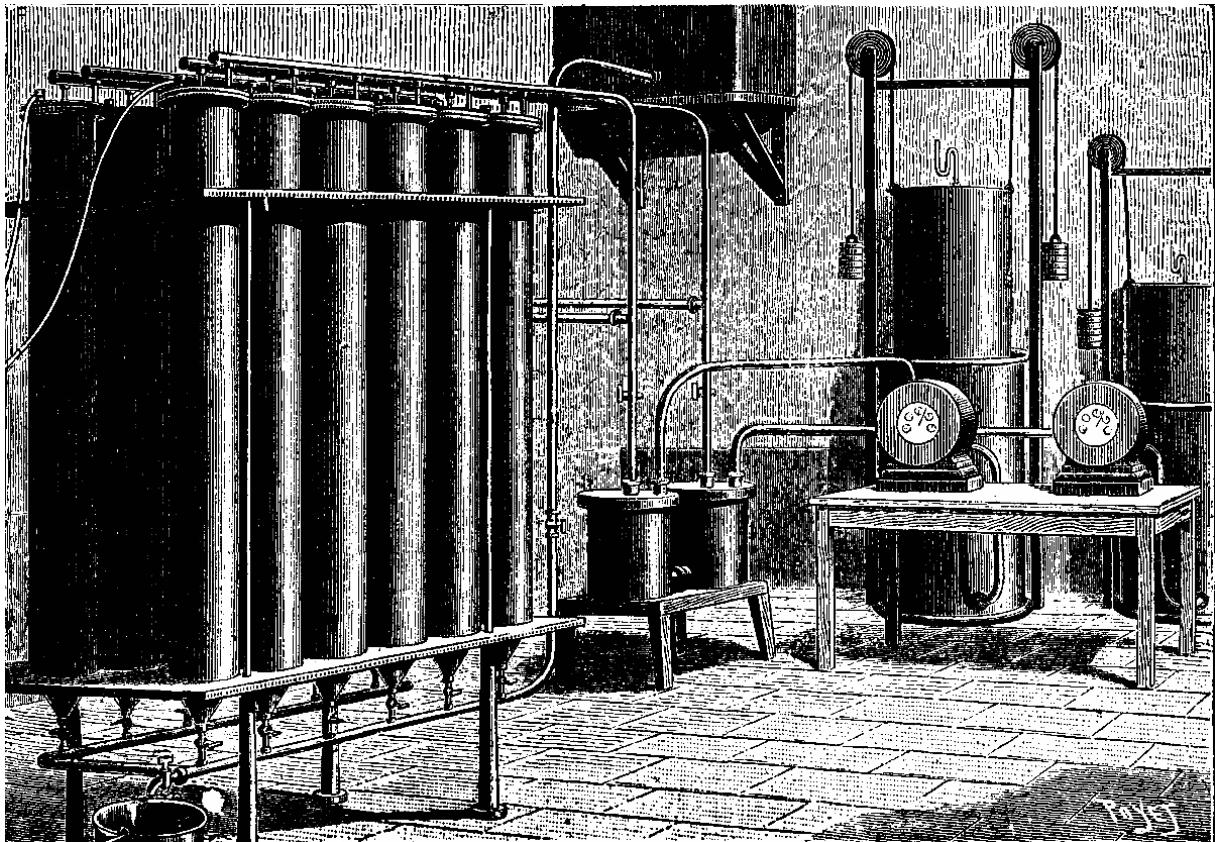


Figura 2.1.1: Equipamentos industriais de eletrólise da água no final do século XIX. Fonte: Scientific American, 1891.

Atualmente, o processo de eletrólise somente é utilizado em pequena escala ou quando se necessita de hidrogênio com alta pureza, nos outros casos é mais econômico obter o gás a partir de reforma de hidrocarbonetos, como o gás natural.

Existem relatos de eficiências de eletrolisadores alcalinos (como os estudados neste trabalho) de 50% a 70%; mas já foram alcançadas eficiências muito maiores, de até 95%, com o emprego de eletrolisadores de PEM (*Polymer Electrolyte Membrane*) e tecnologia catalítica (CARMO, 2013). Termodinamicamente, é fato que a energia gasta no processo de eletrólise da água será sempre maior que a posterior queima dos produtos.

Muitos estudos têm sido feitos para a obtenção do hidrogênio a partir da água, mas sem o uso de eletricidade. No campo da eletrólise, houve um aumento de interesse recentemente (por geração de hidrogênio) e muita pesquisa está em curso, principalmente quanto à composição dos eletrodos, dos eletrólitos e aditivos para redução de perdas.

Existem outros meios de decomposição da água. Bockris et all (1985) catalogaram os meios de decomposição da água, existentes na época da sua publicação, que diferem da eletrólise convencional. As tecnologias alternativas levantadas por ele são: termoquímicas,

sonoquímica (aplicação de ultrasom), fotocatálise, decomposição biológica da água; decomposição por campos magnéticos e forças centrifugas; eletrólise por pulsos e eletrólise por plasma.

2.1.1 ELETRÓLISE DA ÁGUA DE CONDUTO ÚNICO

Observa-se que, desde a descoberta da eletrólise da água se utilizavam dois tubos condutores, um para cada gás. Os gases eram estocados ou utilizados separadamente. Porém, sempre existiram aplicações para a queima dos gases na forma e proporção que saem do eletrolisador sem separação, como podemos ver na figura 2.1.1.1, a seguir, onde é mostrado um gerador de oxi-hidrogênio patenteado por Henry M. Paine em 1884, para fins de iluminação (PAINÉ, 1884), onde existe apenas um conduto para saída dos gases hidrogênio e oxigênio misturados.

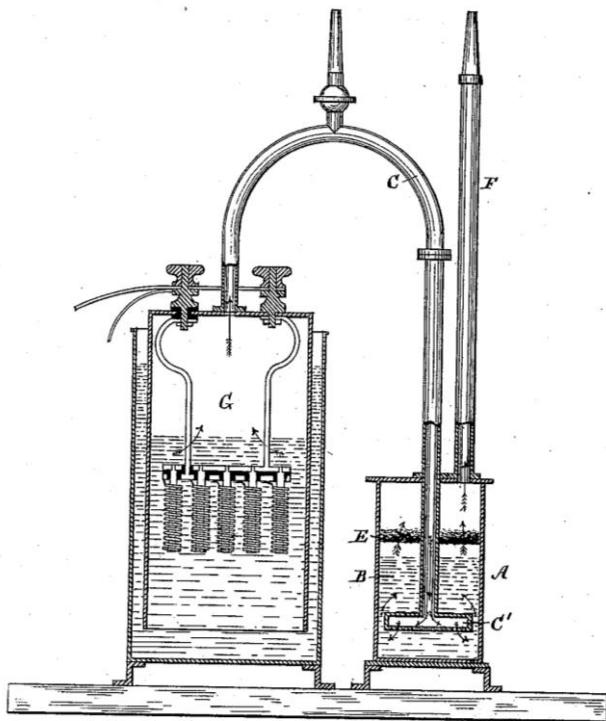


Figura 2.1.1.1: Dispositivo gerador de Oxi-Hidrogênio para iluminação. Fonte: PAINÉ, 1884.

As referências a essa mistura gasosa podem ser encontradas na literatura com diversos nomes: Oxi-Hidrogênio, *Knallgas* (no alemão), *Brown's Gas* (em referência ao inventor

australiano Yull Brown), Hydroxy, Green Gas, Di-hydroxy, Watergas, HHO, etc .

Também era comum o uso do hidrogênio e oxigênio, gerados por outros meios, que não a eletrólise, para maçaricos (*torchs*) para a fusão de metais e minerais (GRIFFIN,1827), empregados por sua alta temperatura. Mais recentemente foram criados equipamentos de solda baseados em geradores de oxi-hidrogênio por eletrólise da água que tinham em comum o uso de conduto único (RHODES,1966; SPIRIG, 1974, BROWN, 1977).

Esta mistura gasosa, por conter o combustível e o comburente, naturalmente na proporção estequiométrica (ver próximo tópico: estequiometria, a seguir), tem queima limpa e deixa como resíduo (cinzas) apenas água. Além disso, a mistura tem características que diferem da queima do hidrogênio no ar e requer procedimentos de segurança ainda maiores que o manuseio do hidrogênio puro.

A ignição por faísca do hidrogênio em ar, a 1 atm, é muito fácil, necessitando de uma energia de apenas 20 micro Joules (por exemplo, eletricidade estática) e a ignição da mistura oxi-hidrogênio requer ainda menos, 7 micro Joules. Nessa pressão, a auto-ignição por temperatura se dá aos 500°C (O'CONNOR, 2010).

A chama do hidrogênio, em ar ou oxigênio, não é visível (emitindo na faixa do ultravioleta) e por isso pode causar acidentes de contato inadvertido com a chama (O'CONNOR, 2010). A velocidade de propagação da chama do oxi-hidrogênio é de 2487m/s, muito maior que o Acetileno (100m/s) ou o hidrogênio (207m/s) (RHODES, 2004).

A temperatura de chama do hidrogênio em ar é de 2045°C (EUA, 2007) e a do oxi-hidrogênio é maior que 3550°C, chegando ao derretimento do Tungstênio (RHODES, 2004).

2.2 ESTEQUIOMETRIA

A etimologia da palavra **estequiometria** vem do grego *stoikheion* (elemento) e *metriā* (medida, de *metron*). A obra *Stoichiometria* de Nicéforo, onde a expressão foi primeiro registrada, era um catalogo de obras canônicas aceitas (na sua época, século VIII) com o respectivo número de linhas de texto (elementos), de forma a se poder controlar alterações nos textos.

Já o uso da expressão com o sentido de Equação Química apareceu na obra de Jeremias Benjamin Richter, em 1792, quando foi publicado o primeiro volume de *Richter's Stoichiometry or the Art of Measuring the Chemical Elements*.

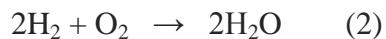
Estequiometria é definida como o cálculo das quantidades relativas de reagentes e produtos de reações químicas. A estequiometria se baseia na lei da conservação das massas, onde a massa total de reagentes é sempre igual à massa total dos produtos da reação.

Com a estequiometria podemos balancear equações químicas (o antes e depois das reações) e calcular as quantidades necessárias de reagentes mínimas para se obter um tanto de produto ou, no sentido oposto, a partir dos produtos, saber a proporção ideal de reagentes para uma reação completa, onde não sobrem ou faltem reagentes.

Como exemplo, podemos citar a reação entre os gases hidrogênio e oxigênio que se combinam para formar a água. A equação (1), a seguir, descreve esta reação (atomicamente).



Na equação (1) há uma sobra de um átomo de oxigênio e, portanto, não demonstra a estequiometria da reação, ou seja, a correta proporção relativa dos gases (moléculas). Na equação (2), a seguir, é demonstrada essa proporção e, portanto, a estequiometria molecular da reação.



O índice 2 à frente da molécula de hidrogênio indica duas moléculas de hidrogênio e depois a formação de duas moléculas de água. Apesar da reação acima ser exotérmica, isto não é indicado no balanço estequiométrico.

A equação (2) tem o mesmo número de átomos dos dois lados (antes e depois da reação), estando correta do ponto de vista da conservação de massa, e demonstra o número mínimo de moléculas necessárias para que tal reação aconteça. A partir desta equação mínima (ou fórmula mínima) podemos calcular as massas de cada reagente e a proporção mássica destes nesta reação.

Assim, o termo "estequiométrico" é também empregado em estudos termodinâmicos para indicar a correta proporção de um combustível e o ar, numa reação de combustão, de forma a não sobrar ou faltar reagentes que, neste caso, são o combustível e o comburente.

No escopo deste trabalho, em que o foco são os motores a combustão interna, esta proporção ou taxa estequiométrica de combustão é fixada, em termos mássicos, em relação ao ar atmosférico, e não ao comburente (oxigênio) nele contido. Portanto, 14,7:1 (lê-se 14,7 para 1) é a taxa mássica de ar (14,7 partes) para cada parte de combustível na mistura que

queimará no interior dos cilindros dos motores.

Para combustão com Ar de um hidrocarboneto qualquer, dado por C_xH_y , temos:



Onde:

- ✓ Composição do ar: 21% vol. O_2 + 79% vol. N_2 atmosférico (incluindo 1% de outros gases);
- ✓ “a” é o coeficiente estequiométrico.
- ✓ $a = x + y/4$.

A quantidade de Ar necessária para a reação de queima de um combustível é um parâmetro que se convencionou definir como a proporção mássica A/F (*Air/Fuel*). A “razão *ar/combustível* estequiométrica” é a grandeza que exprime essa proporção entre as massas presentes na combustão, de ar e de combustível, considerando que ocorra uma reação estequiométrica, isto é:

$$(A/F)_{stq} = (m_{ar}/m_{comb})_{stq} = 4,76 a (m_{ar}/m_{comb}) \quad (4)$$

Onde:

- ✓ m_{ar} = massa de ar; m_{comb} = massa de combustível;
- ✓ índice $_{stq}$ indica proporção estequiométrica;
- ✓ “a” é o coeficiente estequiométrico.

Em base mássica, a razão A/F estequiométrica para hidrocarbonetos varia entre 13,2 e 17,2. Para comparação, citamos a seguir exemplos dessa razão para alguns combustíveis:

Combustível	A/F
Gasolina E22 (no Brasil)	13,56
Gasolina (padrão)	14,7
Diesel	14,6
Metano (CH_4)	17,11
GNV	17,2
Álcool Hidratado E100	8,36

No entanto, o tempo disponível para que ocorra a queima no interior do cilindro do motor e as condições de dispersão das moléculas de combustível torna necessária uma quantidade adicional de Ar, além da necessária para a combustão estequiométrica, para garantir que todo o combustível seja queimado.

Essa massa adicional de Ar, o Excesso de Ar, é menos necessária para queima de gases (incluindo a gasolina vaporizada ou carburada) com ignição por faísca (Motores Otto) e mais necessária para combustíveis menos voláteis, caso do Diesel com ignição por compressão (Motores Diesel).

Na equação 5 verifica-se que o quociente entre a razão ar/combustível estequiométrica e a razão ar/combustível utilizada na prática é a Razão de Equivalência (representada pela letra grega Φ). A grandeza inversa ($1/\Phi$) é conhecida como coeficiente de excesso de ar (representada pela letra grega λ , na equação 6). Assim, temos que:

$$\text{Razão de Equivalência : } \Phi = (A/F)_{\text{stq}} / (A/F)_{\text{real}} \quad (5)$$

$$\text{Coeficiente de excesso de ar: } \lambda = (A/F)_{\text{real}} / (A/F)_{\text{stq}} \quad (6)$$

Conforme o lambda, a mistura pode ser:

$\lambda < 1$ – Combustão redutora ou rica;

$\lambda = 1$ – Combustão neutra ou estequiométrica;

$\lambda > 1$ – Combustão oxidante ou pobre.

Os sistemas de injeção eletrônica se ajustam por meio da medição do nível de oxigênio nos produtos da combustão, como se verifica a seguir.

2.3 A SONDA LAMBDA

Este dispositivo foi introduzido em 1976 pela fabricante alemã Robert Bosch GmbH e rapidamente adotado em vários países, principalmente por possibilitar a redução dos poluentes produzidos pelos veículos automotores.

Nos veículos dotados de injeção eletrônica, fica a cargo da Unidade de Controle do Motor (UCM) a dosagem de combustível para alcançar a combustão ideal. A UCM pode

considerar uma grande gama de informações para calibrar o sistema buscando a melhor eficiência e menor poluição possível.

À medida que a legislação se torna mais restritiva com a geração de poluentes, o controle da combustão se torna mais importante e detalhado. Nos veículos mais modernos encontram-se sensores de temperatura do ar aspirado, temperatura da água de arrefecimento, velocidade angular do virabrequim, posição do pedal do acelerador, entre outros.

Porém, o mais efetivo controle da combustão é obtido pelo uso da sonda lambda, ou sensor de oxigênio como é conhecido em alguns países. Este dispositivo mede a quantidade de oxigênio existente nos gases de exaustão e fornece esta informação na forma de tensão elétrica analógica (proporcional) à UCM. Esta, por sua vez, ajusta o tempo de abertura dos bicos injetores para enriquecer ou empobrecer a mistura. Este sistema funciona continuamente com ajustes a intervalos de poucos milissegundos, operando em malha fechada de controle, ou seja, com a realimentação dos parâmetros de entrada pelos resultados da reação de combustão.

A redução de poluentes, desde o surgimento da sonda lambda, se deve principalmente pelo modelo de controle anterior, sem realimentação ou de malha aberta, que era possível com os sistemas carburados e alguns sistemas de injeção de tabelas fixas (onde a única variável de entrada era a temperatura do motor). Nestes sistemas não havia como ajustar o motor para condições de pressão atmosférica, temperatura do ar ambiente, variações na composição do combustível ou ainda situações de condução do veículo, como nas desacelerações do veículo quando nenhum combustível é necessário.

O método de malha fechada com a sonda lambda possibilitou a compensação de todas essas variantes de modo eficiente e simples. Nos veículos mais modernos houve um aumento no número de sensores e atuadores de modo a melhorar ainda mais a adaptabilidade do sistema às condições ambientais e de condução, como a partida a frio e o uso de uma gama mais ampla de combustíveis nos carros Flex.

O princípio teórico de funcionamento se baseia nos estudos do físico alemão Walther Hermann Nernst sobre a polarização elétrica de uma membrana, na qual a diferença de concentração de íons em dois meios distintos, separados por uma membrana de permeabilidade seletiva ao elemento oxigênio (no caso da sonda lambda), faz com que os íons do lado mais concentrado fluam para o lado menos concentrado. Como reação a este fluxo surge uma diferença de potencial elétrico (proporcional) com o efeito de se opor a este fluxo até que seja alcançado o equilíbrio de forças.

Fazendo o papel da membrana, o elemento sensor é composto de um tubo cilíndrico cerâmico à base de dióxido de zircônio e óxido de ítrio, fechado em uma das extremidades,

banhado interna e externamente com platina porosa que funciona como eletrodos. Esta parte cerâmica é protegida por uma capa metálica com orifícios para a passagem dos gases de exaustão do motor. O lado interno do cilindro está exposto ao ar ambiente (servindo como referência, 21% de oxigênio) e o lado externo exposto aos gases de exaustão do motor, portanto a diferença entre as concentrações de oxigênio dos dois gases gera o sinal elétrico proporcional à esta diferença.

Para que o sensor comece a funcionar é necessário que seja aquecido até aproximadamente 300°C, por isso o sensor era sempre localizado próximo à saída dos gases quentes dos cilindros, e mesmo assim demorava até 10 minutos para atingir pleno funcionamento. Atualmente é incorporado um elemento aquecedor que, além de acelerar o inicio da medição, permite que o sensor seja posicionada em outros pontos do sistema de exaustão (mais frios). Na figura 2.3.1 estão identificados o cilindro cerâmico (1), o elemento aquecedor (2) e a capa protetora perfurada(3).

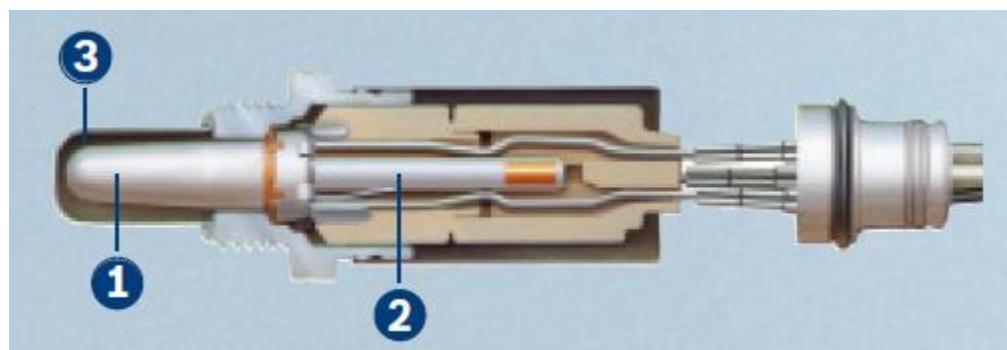


Figura 2.3.1: Elementos de uma sonda lambda. Fonte: Bosch,2014.

O controle eficiente da mistura também influencia o desempenho do Catalisador (e sua vida útil), por isso, atualmente existe outra sonda lambda depois do catalisador para diagnóstico. Na figura 2.3.2, a seguir, podemos identificar esquematicamente o tubo de admissão (1), o cabo elétrico de controle (2), o bico injetor (3), a UCM (4), a sonda lambda de controle (5), o catalisador (6), o cano de escapamento (para o silencioso) (7) e a sonda lambda de diagnóstico após o catalisador (8).

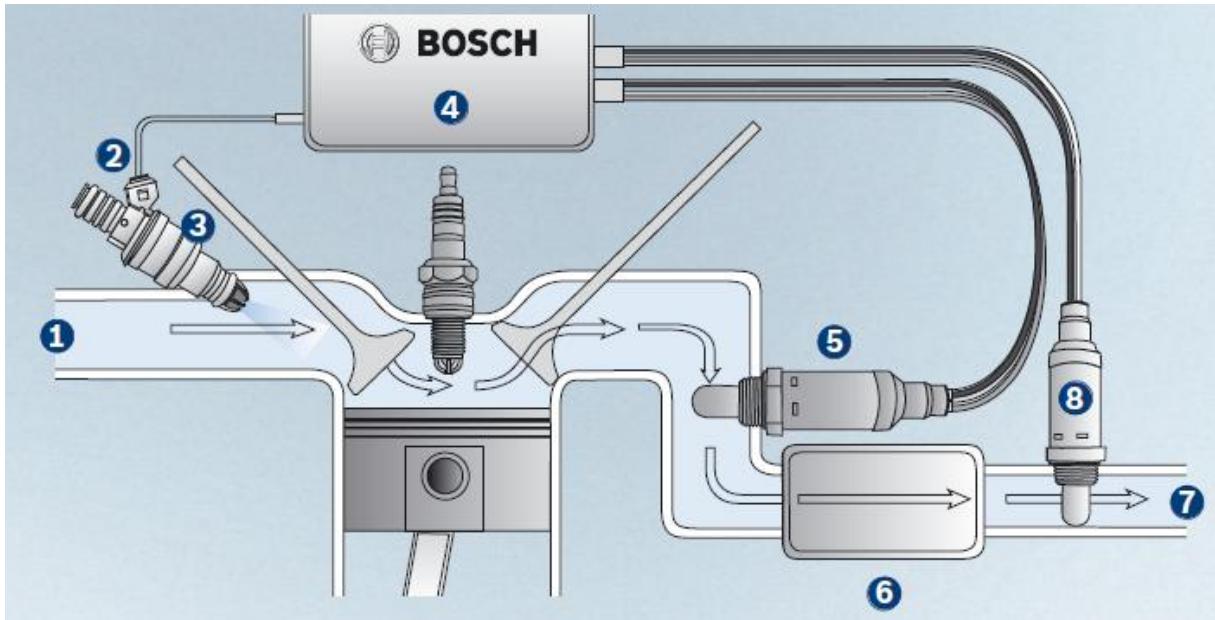


Figura 2.3.2: Esquemático de passagem da mistura e posicionamento das sondas lambda. Fonte: Bosch,2014.

O sinal elétrico gerado pela sonda é da ordem de 25mV a 900mV em geral, mas existem sondas com banda mais larga, chamadas de *Wide Band*, que fornecem até 5V, obtendo-se maior precisão e maior velocidade de resposta para aplicações especiais. Na figura 2.3.3, observa-se a curva de resposta característica de uma sonda lambda, com a indicação da região de mistura rica (a) e mistura pobre (b). Percebe-se a variação abrupta em torno do valor unitário de lambda ($\lambda = 1$).

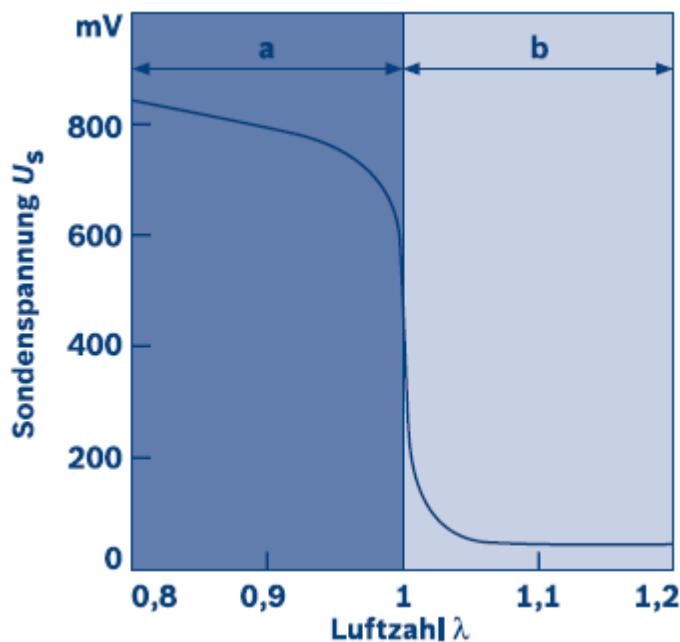


Figura 2.3.3: Curva de resposta de uma sonda lambda, tensão (V)/valor de lambda(λ). Fonte: Bosch,2014.

Por fim, note-se que este sensor pode ter a sua vida útil encurtada por condições de mistura muito pobre, provocando elevadas temperaturas, ou muito rica, causando a contaminação das superfícies seletivas, o que também ocorre com a utilização de combustíveis contendo chumbo.

Nos motores Diesel que utilizam bombas injetoras, que são a maioria dos veículos diesel da frota brasileira, não existe o controle eletrônico da mistura. A mistura é pré ajustada mecanicamente em bancada e a bomba é lacrada em postos autorizados (constituindo infração de trânsito a quebra deste lacre, pelo código brasileiro de trânsito).

CAPÍTULO 3

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada foi a de construção de um dispositivo eletrolisador, seguindo os padrões tecnológicos empregados em dispositivos semelhantes, disponíveis comercialmente e o teste deste dispositivo em situações reais, porém, melhor controladas em termos quantitativos que as referências encontradas em relatos na internet.

Assim, procurou-se um projeto de eletrolisador de água, dentre os tipos encontrados nos *sites* comerciais e amadores (incluindo fóruns sobre o assunto) que representasse a montagem mais comum ou mais aceita para a finalidade de geração de hidrogênio e oxigênio embarcada.

As montagens consideradas partiram do mais artesanal até os vendidos comercialmente, observando os degraus tecnológicos e melhorias incorporadas.

Na figura 3.1.1, a seguir, observa-se que a corrente elétrica só tem um caminho, já que só existem dois eletrodos, ou seja, dois pólos, e toda tensão elétrica é aplicada a eles.

Nos eletrolisadores que visamos, utilizados em veículos automotores, a tensão elétrica disponível, em geral de 13,8V quando o veículo está em marcha, é muito superior à necessária para a eletrólise. Por isso, se forem utilizados apenas dois eletrodos haveria muitas perdas, tornando o dispositivo ineficiente. As soluções encontradas passam por reduzir a tensão aplicada (dissipando energia em forma de calor em outro ponto) ou permitindo que uma corrente elevada passe pelo eletrólito, sem limitação, e gere calor ali (possivelmente danificando o eletrolisador). Alguns experimentadores reduzem a mistura do aditivo ao eletrólito de modo a manter uma resistência elétrica elevada do meio eletrolítico, porém a produção do gás seria reduzida.

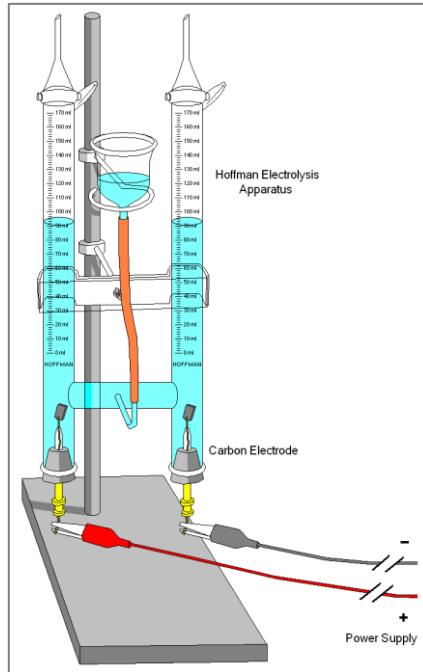


Figura 3.1.1: Ilustração do dispositivo de eletrólise de Hoffman. Fonte: Ivan Akira (<http://en.wikipedia.org/>), 2007.

Uma solução melhor, encontrada nos fóruns de discussão, é a montagem de eletrodos em série, de modo que a tensão entre cada par de eletrodos seja mais baixa, reduzindo a corrente proporcionalmente e melhorando a eficiência do conjunto. Podemos observar um esquemático dessa solução na figura 3.1.2. Tal arranjo, é mais eficiente em termos energéticos, dividindo a tensão em 6 partes (aprox. 2V por célula, dependendo do estado do eletrólito em cada uma), mas ocupa um espaço maior, que nem sempre está disponível em automóveis. A maior complexidade também favorece o surgimento de vazamentos.

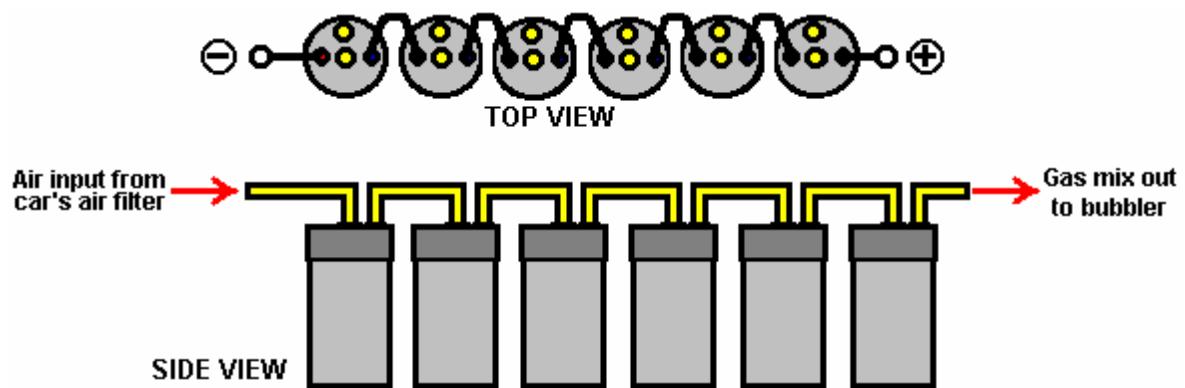


Figura 3.1.2: Eletrolisadores de dois eletrodos em série. Fonte: KELLY, 2005.

Uma tentativa compatibilizar esta abordagem ao espaço disponível foi elaborada para concentrar todos os eletrodos, também chamados de placas, em um único compartimento. Esta é uma montagem popular entre os iniciantes e vários relatos de seu uso foram encontrados. A ilustração esquemática, retirada de um tutorial de montagem amadora, é mostrada na figura 3.1.3, a seguir:

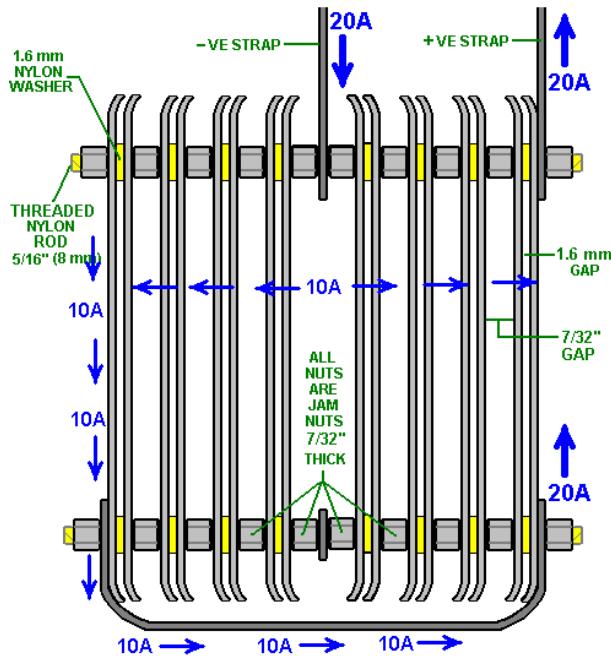


Figura 3.1.3: Arranjo das placas do dispositivo Smack's Booster (Vista lateral). Fonte: KELLY, 2008.

Observamos a indicação, em azul, do fluxo da corrente esperado pelo autor, passando somente através das placas. Em uma versão mais avançada, a conexão entre as extremidades (pelo lado inferior) é isolada do eletrólito. No entanto, não são mostrados os fluxos que não passam pelas placas, responsável por grande parte da geração de calor. Elaborou-se uma vista superior, a partir da ilustração original, para visualizar estas correntes na figura 3.1.4, a seguir:

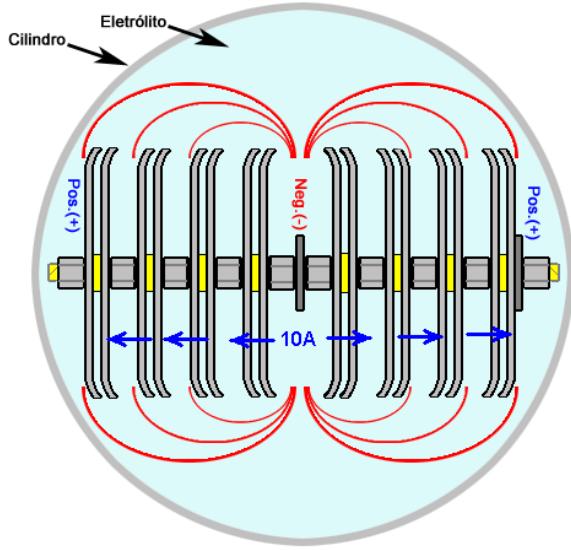


Figura 3.1.4: Arranjo das placas do dispositivo Smack's Booster (Vista superior). Fonte: Elaborado a partir do original de KELLY, 2008.

Como o eletrólito está em contato com superfícies com diferenciais de tensão mais elevadas do que os encontrados entre as placas, irão aparecer fluxos de corrente pelo eletrólito lateralmente às placas (indicados em vermelho) além daqueles esperados pelo projetista (indicado em azul, conforme desenho original) de 10A para cada metade.

Apesar de ser ainda popular pela facilidade de montagem e baixo custo, devido a ineficiência, optou-se por outro tipo de montagem que propiciasse uma maior eficiência e se aproximasse mais dos equipamentos comerciais.

Desta forma, foi projetado um eletrolisador com topologia conhecida como eletrolisador “seco”, o tipo mais comum encontrado para venda na internet, tanto montados como em forma de kits. Tais eletrolisadores são vendidos para instalação embarcada em veículos e, em versões maiores, para instalação em residências alimentados por tensões maiores que chegam a 220V.

A diferença de um eletrolisador “seco” para o “úmido” ou convencional está na restrição do caminho da corrente elétrica, que passa apenas pelas placas que servem como eletrodos, limitando as áreas de contato das placas com o eletrólito lateralmente. Cria-se assim uma sequencia de câmara que tem o mesmo efeito da montagem da figura 3.1.2, anterior, dividindo-se a tensão fornecida dentre as câmara. O numero de câmaras pode ser facilmente alterado pela adição de um novo elemento, dividindo melhor a tensão visando a redução de

perdas.

Para equalização do nível do eletrólito, é provido um furo de pequeno diâmetro próximo à base da placa. Tais furos não são coincidentes visando aumentar a resistência elétrica deste caminho, reduzindo as perdas.

Para melhor entendimento, é apresentado na figura 3.1.5, a seguir, o esquema de montagem deste tipo de dispositivo:

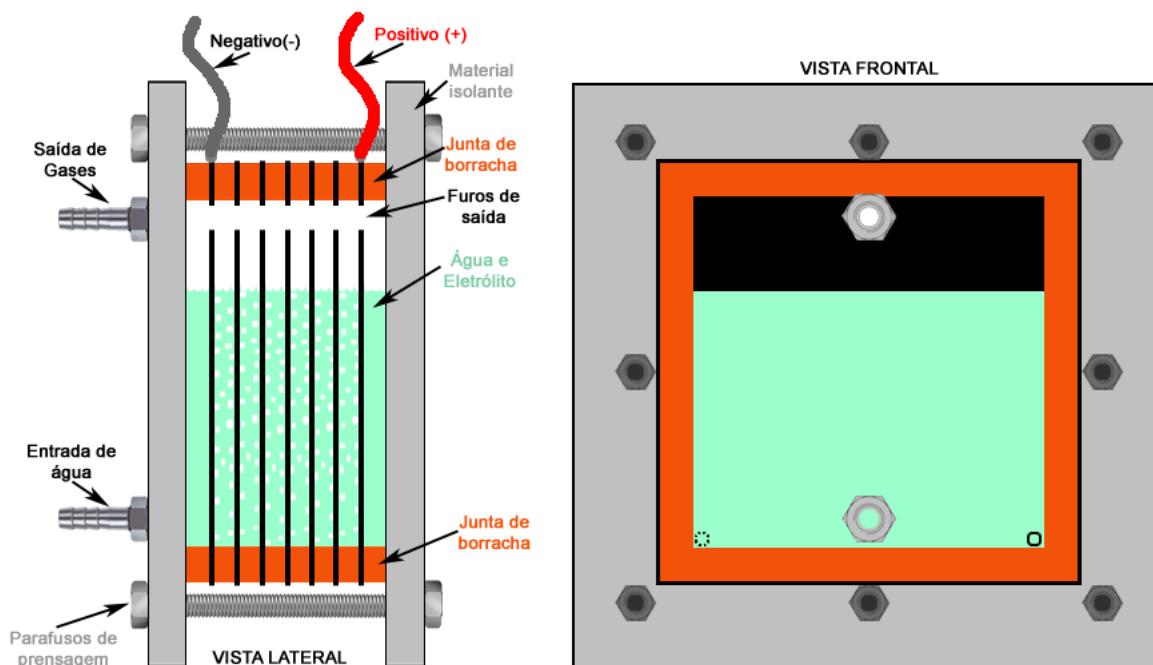


Figura 3.1.5: Vistas esquemáticas do eletrolisador proposto Fonte: Elaborado pelo autor, 2014.

Pode-se observar que as câmara são criadas pela superposição de juntas isolantes e placas de metal, que são prensadas entre duas placas de material isolante por parafusos dispostos no perímetro das placas. Como se pode observar na figura anterior, as câmara são isoladas umas das outras (exceto pelo pequeno furo não coincidente de equalização) e, portanto a corrente deve passar pelas placas. Esta característica, juntamente com o uso do mesmo eletrólito, permite dividir a tensão de alimentação igualmente entre as câmaras. Na ilustração anterior, temos 7 placas, formando 6 câmaras, portanto divide-se os $13,8V_{max}$ por 6 e obtém-se $2,3V$, uma sobretensão ainda considerada pequena.

A largura de cada câmara é fixada pela espessura da junta isolante, sendo que as recomendações encontradas são de 2 a 5mm. Existe um compromisso entre a resistência elétrica maior para a distância maior e a dificuldade de dispersar as bolhas quando o espaço é

muito estreito. Uma bolha parada na placa ou entre as placas representa uma área de placa que não está em contato com o eletrólito e, portanto, pára de realizar a eletrólise naquela área momentaneamente. Por isso, alguns sistemas avançados tem circulação forçada do líquido, o que ajuda a dispersar as bolhas.

A escolha das dimensões da placa envolve considerações sobre a densidade de corrente por área.

Quanto aos materiais empregados, existem muitas opções para os hobistas, que também aproveitam sobras de materiais na maior parte dos casos e, apesar do baixo custo, publicam seus experimentos onde conseguiram obter os gases e instalar os equipamentos em seus veículos.

Para os equipamentos vendidos por amadores ou empresas, a escolha do material é mais criteriosa e procura-se conjugar custo e eficiência. Por isso se verifica uma convergência natural para alguns materiais que se tornam típicos para esta aplicação.

Neste ponto, em que procuramos caracterizar os materiais empregados pelos atores deste segmento, vale ressaltar um aspecto de segurança negligenciado em todo material estudado neste trabalho: a fragilização por hidrogênio (ou *hydrogen embrittlement*, na literatura em inglês). Trata-se de um endurecimento provocado pelo contato com o gás hidrogênio que leva à propensão à quebra ou fraturas de soldas, reservatórios e tubulações, causando vazamentos deste gás explosivo. O mecanismo deste fenômeno ainda não é bem compreendido, mas já podem ser encontrados materiais que são resistentes a ele, identificados empiricamente pela indústria. Nos últimos anos, com o incremento de projetos visando novas aplicações do hidrogênio (não só veículos), a necessidade de estudos sobre este fenômeno cresceram (BARNOUSH, 2011). A única menção a este problema, no que tange a aplicação de hidrogênio em veículos, foi encontrada nas diretrizes de segurança do Depto. de Transporte do governo americano (EUA, 2007), onde também existe um tópico com recomendações de segurança para injeção de oxi-hidrogênio, que tratamos aqui.

Começaremos pela caracterização do eletrólito, pois a seleção de materiais é, em muito, condicionada a esta primeira escolha. Com a necessidade de transformar a água, um fluido de alta resistência elétrica, em um condutor de corrente elétrica, foram empregados vários aditivos. Desde o início dos estudos da eletrólise da água, muitas opções foram experimentadas, tornando a água mais ácida, como a utilizada pelo próprio Faraday (FARADAY, 1834), ou mais alcalina, ou seja, alterando o pH da água, que geralmente está próximo da neutralidade, para baixo (mais ácida) ou para cima (mais alcalina).

No entanto nem todas as opções são apropriadas, por exemplo, a simples adição de sal

de cozinha (NaCl , cloreto de sódio) à água, a torna mais condutiva e aumenta a produção dos gases pela eletrólise. Mas também libera o gás cloro, que é tóxico se inalado e pode trazer problemas às peças do motor (o mesmo pode ocorrer com o uso de água de torneira na solução, que é clorada).

Porém, tendo em mente que este segmento teve início com hobistas, devido a considerações de segurança no manuseio (incluindo a geração de gases perigosos), compatibilidade de materiais e facilidade de aquisição, as escolhas foram convergindo para o hidróxido de sódio (NaOH), conhecido também como soda cáustica, e o hidróxido de Potássio (KOH), conhecido por potassa cáustica ou lixívia. Este último é considerado como a melhor opção por não causar acúmulo de resíduos nas placas a longo prazo e por atuar como catalisador, ou seja, não toma parte na reação e, portanto não precisa ser reposto na solução. Apenas a água deve ser repostada para manter a concentração no ponto inicial. No Brasil, ambas as substâncias são controladas pela Polícia Federal, mas podem ser encontradas em lojas de material de limpeza em pequenas quantidades.

Como a água, dependendo da fonte, pode ter muitas substâncias diluídas (saís minerais, metais, cloro, etc.) que causariam efeitos indesejáveis, é sempre indicado o uso de água destilada. O custo é relativamente baixo para compra, mas também pode ser construído um destilador a energia solar se o consumo se tornar elevado. Um destilador com esta função foi construído para este estudo e é apresentado na figura 3.1.6, a seguir. A água aquecida pelo sol se condensa no vidro, mais frio, e é recolhida por uma calha no lado mais baixo.



Figura 3.1.6: Destilador de água solar. Fonte: Acervo do autor, 2014.

Quanto ao material das placas, é bastante difundido o uso do aço inoxidável pela sua resistência à corrosão, porém, como existem diversas ligas que são conhecidas genericamente como “aço inox” pelo público, convém diferenciá-las. No Brasil, é mais difundida a classificação pelo *American Iron and Steel Institute* (AISI) (SANCHES, 2009), portanto utilizaremos esta nomenclatura. As muitas ligas que compõem o que categorizamos como aço inox diferem em suas composições, criadas para obter ou realçar características necessárias para cada finalidade. Para exemplificar essas diferenças, mostramos a seguir, na figura 3.1.7, alguns tipos mais comuns empregados em eletrolisadores para veículos, segundo a classificação AISI, com os metais que compõem cada liga.

<i>AISI</i>	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Si</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Mo</i>	<i>Cu</i>	<i>N</i>	<i>Ti</i>
304	.08	2	.045	.030	1.00	18-20	8-10	.75	.75	.10	-
304L	.03	2	.045	.030	1.00	18-20	8-12	.75	.75	.10	-
316	.08	2	.040	.030	1.00	16-18	10-14	2-3	.75	-	-
316L	.03	2	.040	.030	1.00	16-18	10-14	2-3	.75	-	-

Figura 3.1.7: Quadro comparativo de ligas de aço inoxidável austeníticos segundo a classificação AISI. (Valores porcentuais da massa) Fonte: SANCHES, 2009.

Segundo Sanches (2009), o tipo AISI 316 é superior ao 304 em resistência à corrosão eletrolítica, pela maior porcentagem de Molibdênio (Mo) e Níquel (Ni), porém, as mesmas ligas mas com baixos teores de carbono, indicados pelo sufixo L (de *low*, baixo), apresentam essa característica ainda melhorada.

Esta diferença foi identificada empiricamente por usuários destes dispositivos que mostram imagens eloquentes quanto a resistência à corrosão, como as da figura 3.1.8, a seguir, que apresenta um comparativo entre placas de aço inoxidável do tipo 304 e 316 (sem o sufixo L) usadas como placas negativas de seus eletrolisadores com o mesmo desenho e emprego: corrente elétrica de 10~15 A em solução de hidróxido de sódio, por 90.000milhas.

Devido aos preços do níquel utilizados nestas ligas, Sanches (2009) sugere o emprego da liga AISI 444, um aço inoxidável ferrítico com adição de titânio (Ti), nióbio (Nb) e molibdênio, mas com baixos porcentuais de níquel, tornando-o mais econômico mas com resistência à corrosão equivalente ao 316 L (SANCHES, 2009). Opcionalmente, são relatadas experiências com aço carbono comum folhado a níquel, conferindo às placas as mesmas

características do aço inoxidável.

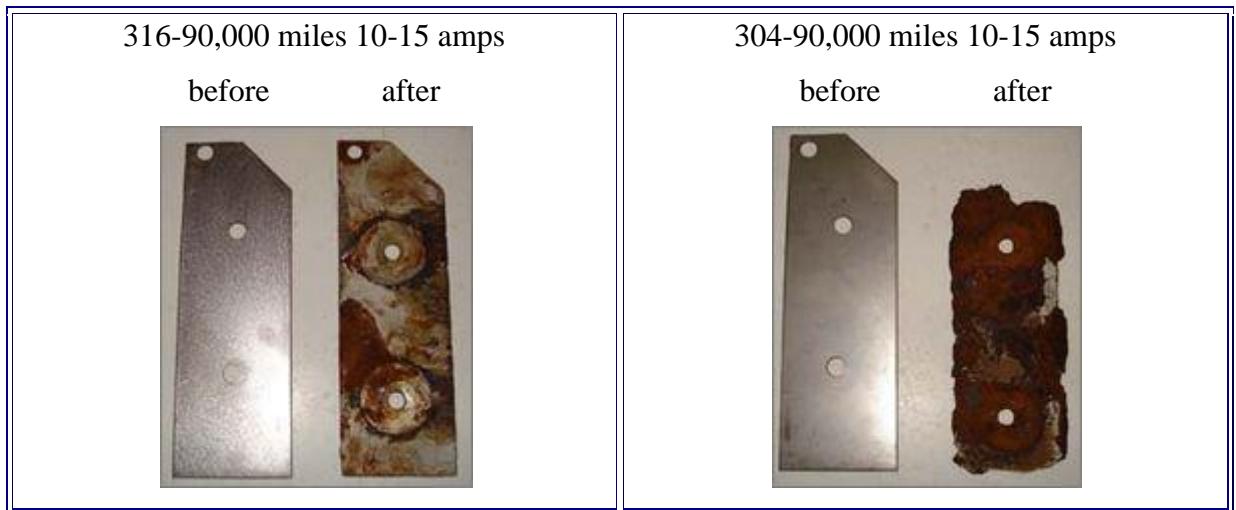


Figura 3.1.8: Comparativo (antes/depois) entre placas negativas de aço 316 (esquerda) e 304, usadas com 10~15A em solução de Hidróxido de Sódio, por 90.000milhas. Fonte: <http://hydro-extra.webs.com/why316stainless.htm> Acessado:10/05/2014.

Por fim, os sites comerciais e os tutoriais do tipo “faça você mesmo” recomendam o uso de dispositivos de segurança. O mínimo recomendado é a instalação de um relé que somente alimente o eletrólisador quando o motor estiver em funcionamento, geralmente aproveitando o sinal elétrico do sensor da pressão de óleo, e a instalação de um borbulhador, como solução para prevenir retrocesso de chama. Neste borbulhador, o gás do eletrólisador chega a um recipiente, semipreenchido com água, por um condutor no lado inferior (mergulhado), borbulha por esta água e sai pelo lado superior pela mangueira que alimenta o motor.

CAPÍTULO 4

4.1 RESULTADOS

Com fins de verificar *in loco* as alegações de economia de combustível, foi construído um eletrolisador, seguindo os parâmetros encontrados nos tutoriais disponíveis nos fóruns sobre o assunto, para ser instalado em um veículo para teste real em condições controladas.

A montagem desenvolvida foi a de múltiplas câmaras, descrita no tópico anterior, com as dimensões de placa de 15x15cm, com 3mm de espessura, em aço carbono folhado com níquel. Juntas de borracha com 3 mm de espessura e eletrólito de hidróxido de sódio (soda cáustica) com concentração de 25% em peso. As vistas lateral e frontal do dispositivo podem ser observadas nas figuras 4.1.1 e 4.1.2, a seguir, respectivamente.

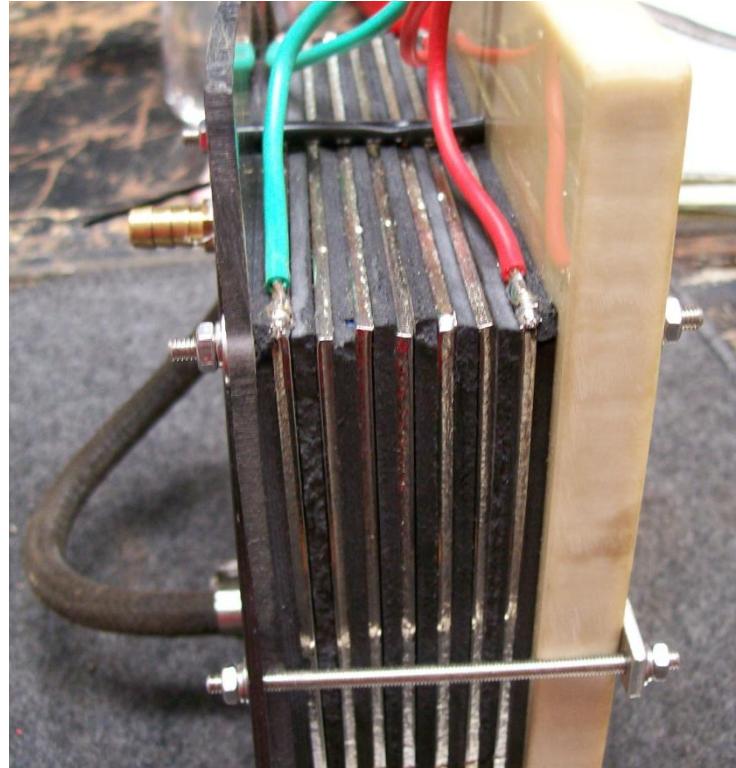


Figura 4.1.1: Vista lateral do dispositivo eletrolisador construído para este estudo. Fonte: Acervo do autor.



Figura 4.1.2: Vista frontal do dispositivo eletrolisador construído para este estudo. Fonte: Acervo do autor.

Com o objetivo de restringir o número de variáveis, foi escolhido um veículo que não fosse afetado por comportamento de eletrônica embarcada como injeção eletrônica e, principalmente, pelo sensoriamento dos níveis de oxigênio por sonda lambda.

Este requisito foi imprescindível, pois uma eventual melhora na eficiência poderia ser mascarada ou contrabalanceada pelo comportamento da UCM que poderia enriquecer a mistura devido à índices de oxigênio acima do esperado. Em kits comerciais e alguns tutoriais de hobistas, são apresentados equipamentos que interferem na medição do oxigênio pela sonda lambda procurando fazer com que o valor lido represente um nível de oxigênio baixo, situação em que a UCM vai empobrecer a mistura. Este tipo de artifício certamente reduz o consumo, mas tal redução não se deve a adição de oxi-hidrogênio diretamente, que é o que se pretende mensurar. Esse equipamento é uma unidade eletrônica, conhecida pela sigla EFIE (do inglês *Electronic Fuel Injection Enhancer*) que propicia este controle sobre a medição da sonda lambda. Também são populares os projetos disponibilizados para que o próprio usuário construa um dispositivo desses. Porém, advertem sobre os malefícios que uma mistura muito pobre pode trazer à vida útil dos componentes do motor, começando pela própria sonda lambda, conforme tratado anteriormente.

O veículo escolhido para o teste, uma camionete F-1000, possui motorização diesel,

com temporização de ignição e injeção provenientes de uma bomba injetora mecânica. As características da motorização são apresentadas na figura 4.1.3, a seguir.

Especificações da motorização testada

Fabricante/Modelo: MWM / D229-4

Bomba injetora: BOSCH, linear/vertical

Tipo: Diesel – Ignição por compressão

Cilindros: 4 em linha

Volume: 3,922 cc

Aspiração: Natural

Pressão de compressão: 19 bar (285 PSI)

Potência : 66kW (90cv) @ 3000rpm

Torque: 274 Nm @ 1500rpm

Taxa de compressão: 17,0: 1

Diâmetro x Curso: 102 x 120mm

Tipo de arrefecimento: água e aditivos

Figura 4.1.3: Quadro com características da motorização testada. Fonte:
<http://imperio4x4.com.br/manuais/mwm/229.htm>

Para melhor controle do consumo do combustível foi instalado um reservatório para este teste com capacidade de 12 litros, graduado a cada 250ml, semitransparente, conforme apresentado na figura 4.1.4, a seguir. Tanto a linha de alimentação do motor como a de retorno de excesso da bomba injetora foram desviadas para este reservatório.



Figura 4.1.4: Reservatório *ad hoc* semi-transparente com graduação a cada 250ml. Fonte: Acervo do autor, 2014.

O eletrolisador foi instalado no compartimento do motor, juntamente com o dispositivo de prevenção de retrocesso de chama. A saída de gases posicionada diretamente na entrada do filtro de ar, sem nenhuma modificação no motor ou tubulações. Apesar de volumoso, não houve dificuldade para instalação física do equipamento.

A alimentação elétrica foi feita com um relé, para até 70 A, controlado a partir de uma chave no interior do veículo, somente alimentada quando a chave de contato está na posição de funcionamento do motor. O circuito de potência do relé contou com um disjuntor de 20 A como proteção do circuito.

O posicionamento do eletrolisador já instalado e do borbulhador de segurança podem ser observados nas figuras 4.1.5 e 4.1.6, a seguir, respectivamente.

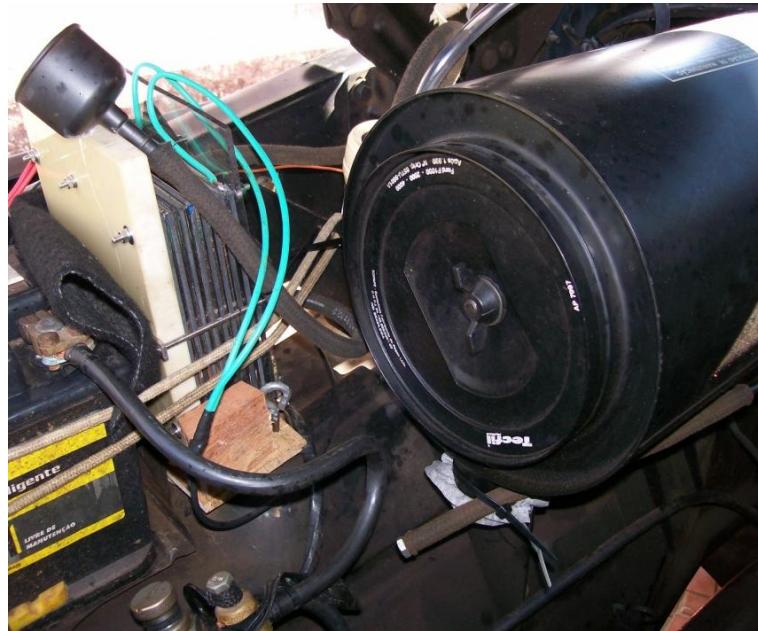


Figura 4.1.5: Posicionamento do eletrolisador no compartimento do motor. Fonte: Acervo do autor, 2014.

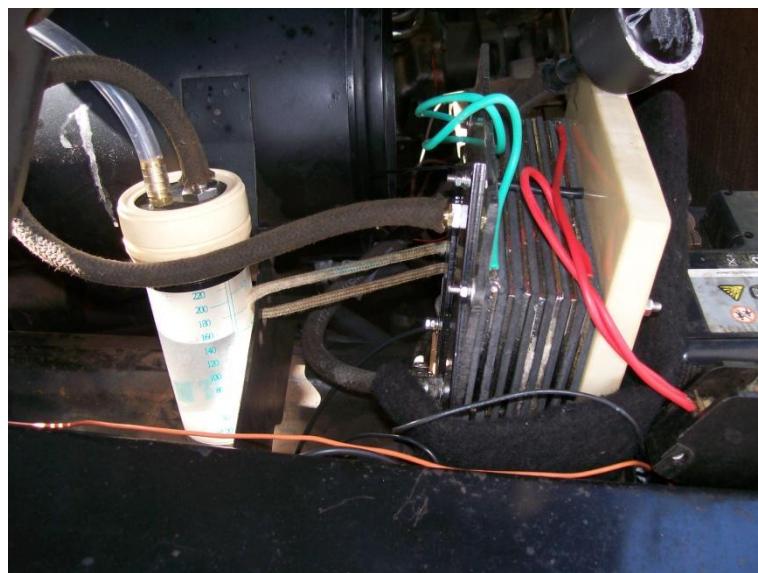


Figura 4.1.6: Posicionamento do eletrolisador e do borbulhador de segurança. Fonte: Acervo do autor, 2014.

Com o equipamento todo instalado e o motor em funcionamento, foi feita a medição do volume de gás gerado (hidrogênio + oxigênio). O processo foi de se utilizar um vasilhame de volume conhecido cheio de água e emborcado. A mangueira de suprimento de gás foi colocada de modo que as bolhas entrassem no vasilhame e o tempo para preencher o volume cronometrado.

Observou-se que a temperatura do eletrolisador é um fator importante na sua produção

de gás. Como o dispositivo gera muito pouco calor, havia a influência da temperatura do compartimento do motor. Por esta razão foi preciso alterar o caminho da mangueira para manter o compartimento fechado e aguardar a estabilização da temperatura com o motor em funcionamento.

Os volumes produzidos foram medidos por 3 vezes e a média foi de 194ml de gás por minuto, com a tensão aplicada de 13,81V e corrente variando aproximadamente +/- 5% em torno de 2,4 A. Considerando estes valores , o consumo energético para produzir 1 litro de gás foi de 2,852Wh. Comparando com a eficiência máxima teórica, segundo as leis de Faraday, que seria de 2,4Wh/litro, este eletrolisador tem eficiência de 84%.

Após essas medições foi iniciado o percurso do teste com o eletrolisador desligado para se poder obter uma linha de base para comparação. Foram percorridos dois trechos, o primeiro de 96km (trecho 1) e o segundo de 64km (trecho 2).

Como o reservatório tinha capacidade de apenas 12 litros, os trechos foram planejados para ter até 110km. A seguir foram percorridos mais dois trechos com o eletrolisador em funcionamento. O primeiro trecho 111km (trecho 3) e o segundo de 72km (trecho 4).

A cada abastecimento, sempre com óleo diesel comum, o nível de combustível no reservatório retornava à marca de 12L. O valor em litros da bomba foi conferido visualmente com a variação do nível do reservatório.

Houve a preocupação com a inclinação do piso para essa verificação visual. Para esse fim foi utilizado um nível, de bolha em líquido, que era colocado no topo do reservatório para aferição da inclinação a cada abastecimento. Observou-se que as áreas de parada para abastecimento, próximas às bombas de combustível dos postos visitados tinham o piso nivelado. Na figura 4.1.7, a seguir, é apresentado o resumo dos trechos e consumos:

Descrição	Odometro (km)	Trecho (km)	Combustível (litros)	Média (km/l)
Início	58206			
Trecho 1	58302	96	10,30	9,32
Trecho 2	58366	64	6,90	9,27
Total (1 e 2)	160		17,15	9,30
Trecho 3	58477	111	11,12	9,98
Trecho 4	58549	72	7,25	9,93
Total (3 e 4)	183		18,37	9,95

Figura 4.1.7: Quadro resumo dos resultados do teste de percurso.

Todo o percurso foi percorrido na rodovia SP-280 (Rod. Marechal Castelo Branco) que é uma rodovia com poucas curvas suaves e sem trechos de serra, no dia 29 de maio de 2014 entre 11:00h e 16:00h, entre as cidades de Santa Cruz do Rio Pardo (km315) e Barueri (km26). O limite de velocidade em todo o percurso era de 120km/h para veículos leves e procurou-se manter a velocidade de 100km/h (2500rpm). Não foi registrado qualquer congestionamento no percurso ou nos pedágios.

4.2 DISCUSSÃO

O estudo teve que transpor inicialmente a barreira da dificuldade de se identificar as fontes de opiniões e informações. Neste segmento, a mesma informação pode ser encontrada em diversos endereços eletrônicos, às vezes travestidas conforme a conveniência. Em outras ocasiões, uma informação fora do contexto original é usada para embasar uma argumentação ou ponto de vista sem o cuidado de analisar a aplicabilidade desse embasamento. Não se sabe se isto se dá por falta de conhecimento ou má fé. Um exemplo eloquente é a divulgação de documento elaborado pela NASA (EUA, 1977), onde se pesquisa a adição de hidrogênio proveniente de cilindros e de reforma de metanol em veículos a gasolina. Tal documento é divulgado em quase todos os sites que apóiam a iniciativa, sem levar em consideração se os resultados ali descritos se aplicam ao conjunto eletrólise e motores modernos com sistemas eletrônicos.

Muito se debateu sobre o tema em forums de discussão sobre energia. Várias pessoas procuram calcular volumetricamente a diferença entre a quantidade de gás produzido e a quantidade de ar+combustível que um motor de um automóvel em velocidade constante processa. De maneira clara, exercícios como o descrito têm enormes deficiências, começando por dados de entrada, como a eficiência volumétrica de um motor nessas condições.

Tal aferição seria um desafio mesmo em ambiente de um laboratório para esta finalidade, tamanho é a quantidade de variáveis a serem observadas e controladas.

Foram estas incertezas que motivaram este estudo de cunho empírico, como um ponto de partida para futuro aprofundamento, teórico e empírico.

O resultado a que se chegou, melhorando de 9,3km/l para 9,95km/l, representa um acréscimo de 6,9% em distância por litro. Um ganho relevante para país em que virtualmente

todo transporte de carga terrestre é movido a diesel.

O teste, apesar de relativamente pouco extenso, foi executado de forma a retirar o maior numero de variáveis possível da equação, utilizando um veículo bem conhecido, em um mesmo dia e em uma rodovia de perfil médio quase constante. Assim, anularam-se variáveis climáticas, de condições de tráfego, condições de rodagem do veículo (calibragem dos pneus, por exemplo), que gerariam incertezas nos resultados. O mesmo pode ser dito das medidas parciais, que corroboram o resultado final, sem desvios significativos.

O veículo empregado, com motorização de tecnologia mais elementar, sem controles e sensoriamentos eletrônicos, além de ter servido adequadamente ao teste, por isolar a contribuição do aditivo oxi-hidrogênio, também representa a mesma tecnologia da maioria dos veículos a diesel existentes no país.

A elucidação do princípio que causa a melhora no consumo de combustível, mesmo com uma quantidade pequena do aditivo, ainda carece de embasamento e respaldo de estudos mais profundos em condições laboratoriais. Porém, cabe ressaltar que, durante a pesquisa bibliográfica foram encontradas referências a aplicações semelhantes e relatos publicados na forma de artigos científicos que corroboram a opinião deste autor de que o efeito principal é como um detonante e auxiliar na propagação da chama, causando um aumento de pressão mais vigoroso.

Os estudos mencionados relatam ganhos de até 15,7% em motores diesel queimando misturas de biodiesel, misturas de diesel com óleos vegetais mais pesados ou ainda óleos vegetais puros. Por esta mesma razão, a maior velocidade da queima, é que é limitada a quantidade de oxi-hidrogênio que se pode adicionar à mistura sem provocar pré-ignição. Este aspecto, estudado por alguns institutos, levou à conclusão de que o acréscimo de apenas alguns litros por minuto de hidrogênio ao ar em motores diesel faz com que o tempo de ignição ideal passe de 23º antes do ponto morto superior (PMS) para 5º antes do PMS. Obviamente, acréscimos maiores ou até o uso do oxi-hidrogênio puro, teria que contar com um projeto mecânico/eletônico novo e não seria factível em motores projetados para outro combustível.

Como esses óleos, em geral, apresentam maior viscosidade, a contribuição de um aditivo gasoso que melhore a velocidade de propagação da queima se mostraria mais significativa quando comparados a veículos a gasolina ou GN.

Também se notou o interesse de agências ambientais no estudo da redução de emissões dos veículos diesel. Este aspecto não foi abordado neste estudo, mas pode-se contabilizar uma redução significativa de poluentes apenas pela melhora do consumo

isoladamente. Haja vista que o consumo do diesel no Brasil, que hoje está na casa dos 40,7 bilhões de litros apenas para aplicações de transporte e excluindo as de geração de eletricidade e agrícolas, tem um crescimento previsto pelo Ministério das Minas e Energia de 3,5% ao ano até 2030.

5. CONCLUSÃO

Como a tecnologia alvo deste estudo se aplica a todos os combustíveis, mas o teste foi realizado apenas com diesel, devemos ter em mente que podemos estar diante de um caso particular, que é a conclusão a que chega este autor. Todos os estudos encontrados, de maior seriedade e controle, publicados em diferentes países por institutos de pesquisa, se referem a combustíveis com menor volatilidade: diesel, biodiesel e misturas com óleos vegetais.

Com as informações levantadas, tanto pela bibliografia quanto pelo resultado do teste, pode-se concluir que a tecnologia é viável, mas pode ter impacto menor em combustíveis mais voláteis ou gasosos. Como, aparentemente, o mecanismo de melhora é a inflamabilidade e a velocidade de propagação da chama, as variáveis que influenciam a velocidade de queima podem representar o diferencial de sucesso desta tecnologia. Como por exemplo, a temperatura do ar de admissão: em países frios e com combustíveis menos voláteis o aditivo pode representar uma economia maior que nos trópicos e em veículos a gasolina, etanol ou GN. Isto sem levar em consideração as diferenças na composição dos combustíveis em mercados locais, o que torna o Brasil um caso a parte nestes estudos.

Essas variantes, que não são levadas em consideração pelos hobistas e não são divulgadas pelos que vendem os equipamentos comercialmente, podem ser o motivo do acirrado debate em torno da validade dos dados: discute-se em um ambiente global e sem fronteiras, como a internet, assuntos com particularidades locais. A complexidade do conjunto formado pela eletrólise da água somada à queima de combustível em um MCI é uma experiência que não se pode replicar em todo lugar com os mesmos resultados. Um exemplo claro dessa diversidade foi identificado em um fórum na internet onde o debate abordava a forma de fazer com que a água do eletrolisador não congelasse no inverno.

Estas informações reforçam a necessidade de que a academia faça estudos controlados e de maior abrangência para esclarecer a sociedade que, no momento, pode estar à mercê de informações incompletas. Assim como está, o consumidor e os reguladores ficam sem embasamento e a tendência nestes casos é o acirramento da legislação para impedir o dano à sociedade; a mesma sociedade que se beneficiaria da nova tecnologia se houvesse informação suficiente.

5.1.1 Sugestões para trabalhos futuros

Os seguintes temas são de interesse para trabalhos futuros:

- Estudos de campo que caracterizem a contribuição do aditivo empiricamente para vários combustíveis;
- Pesquisas laboratoriais que caracterizem os princípios que regulam o aumento de eficiência;
- Estudos sobre os aspectos ambientais e de segurança dessa aplicação, em especial sobre a frota movida a diesel, tanto rodoviária quanto urbana, agrícola e aplicações estacionárias;
- Estudos relativos à otimização da eletrólise da água nas condições veiculares brasileiras.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, MIKE. **Water-Powered Cars: Hydrogen Electrolyzer Mod Can't Up MPGs.** August 7, 2008, Popularmechanics.com. Disponível em: <http://www.popularmechanics.com/cars/alternative-fuel/gas-mileage/4276846>. Acessado: 12/02/2014.
- BALL, PHILIP. **Burning water and other myths.** NatureNews. doi:10.1038. 14 de setembro de 2007. Disponível em: <http://www.nature.com/news/2007/070910/full/news070910-13.html> Acessado em: 10/02/2014.
- BARNOUSH, A. **Hydrogen embrittlement.** Saarland University Journal. Publicado 01/12/2011. Disponível: http://www.uni-saarland.de/fak8/wwm/research/phd_barnoush/hydrogen.pdf. Acessado: 20/03/2014.
- BOSCH. **Lambdasonden richtig beurteilen und behandeln.** Ref.: AA/MKG2 1 987 717 494 / 200611 64.11.XX. Disponível: http://www.bosch-lambda.de/de/downloads/bosch_tipps_lamdasonden.pdf. Acessado em: 10/04/2014.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano nacional de energia 2030.** Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética . Brasília : MME : EPE, Rio de Janeiro, 2007.
- BROWN,Yull. **Welding.** U.S.Patent n.4.014.777. Mar. 29, 1977.
- CARMO, M; Fritz D; Mergel J; Stolten D **A comprehensive review on PEM water electrolysis.** Journal of Hydrogen Energy.doi:10.1016/j.ijhydene.2013.01.151 . 2013.
- BARI,S., Esmaeil,M. Mohammad. **Effect of H₂/O₂ addition in increasing the thermal efficiency of a diesel engine.** Fuel, Volume 89, Issue 2. February 2010, Pages 378-383, ISSN 0016-2361, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2009.08.030>. 2010.
- EUA (DOT). **Guidelines for use of Hydrogen Fuel in Commercial Vehicles:** Final Report. November 2007. United States Department of Transportation, Federal Motor Carrier Safety Administration Report No.FMCSA-RRT-07-020. 2007.
- EUA (DOT). **Summary of Fuel Economy Performance.** Department of Transportation, Washington,DC. 2011.
- EUA (EPA). **Devices and Additives to Improve Fuel Economy and Reduce Pollution - Do They Really Work?.** United States Environmental Protection Agency. Office of Transportation and Air Quality (OTAQ). EPA-420-F-11-036. August 2011 (Rev 9/2012).
- EUA (EPA). **Aftermarket Retrofit Device Evaluation Program.** United States Environmental Protection Agency (EPA). Office of Transportation and Air Quality (OTAQ). Disponível: <http://www.epa.gov/otaq/consumer/reports.htm> . Acessado: 15/03/2014.
- EUA (NASA). **Emissions and Total Energy Consumption of a Multicylinder Piston**

Engine Running on Gasoline and a Hydrogen-Gasoline Mixture. NASA TN D-8487. Elaborado por Johz F. Cassidy. Lewis Research Center para National Aeronautics and Space Administration. Washington, Maio, 1977.

FARADAY, Michael. **Experimental Researches in Electricity. Sixth Series.** Philosophical Transactions Royal Society. London, January 1, 1834. Vol.124 p.55-76; doi:10.1098/rstl.1834.0007. 1884a.

_____. **Experimental Researches in Electricity. Seventh Series.** Philosophical Transactions Royal Society. London, January 1, 1834. Vol.124 p.77-122;doi:10.1098/rstl.1834.0008 . 1884b.

_____. **Experimental Researches in Electricity. Eighth Series.** Philosophical Transactions Royal Society. London, January 1, 1834. Vol.124 p.425-470;doi:10.1098/rstl.1834.0022 . 1884c.

GARCIA, Roberto. **Combustíveis e combustão industrial.** Rio de Janeiro: Interciência, 202p. 2002.

GRiffin, John J. **A Practical Treatise on the Use of the Blowpipe, in Chemical and Mineral Analysis:** Including a Systematic Arrangement of Simple Minerals, Adapted to Aid the Student in His Progress in Mineralogy, by Facilitating the Discovery of the Names of Species. 308p. Glasglow:R. Griffin & Company. 1827.

HOUSEMAN, J., Cerini , D.J. (Calif. Inst. Technol.). 1974. **On-Board Hydrogen Generator for a Partial Hydrogen Injection Internal Combustion Engine.** Disponível: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/5206481>. Acessado: 24/03/2014.

IUPAC. **Compendium of Chemical Terminology**, 2nd ed. (the "Gold Book"). Compiled by A. D. McNaught and A. Wilkinson. Blackwell Scientific Publications, Oxford (1997). XML on-line corrected version: <http://goldbook.iupac.org> (2006-) created by M. Nic, J. Jirat, B. Kosata; updates compiled by A. Jenkins. ISBN 0-9678550-9-8. doi:10.1351/goldbook.

JACOB, W. . **Effect of Hydrogen Enriched Hydrocarbon Combustion on Emissions and Performance.** Department of Biological and Agricultural Engineering, University of Idaho, 1994

KELLY, Patrick J. . **A Practical Guide to 'Free Energy' Devices: Devices Part 9.** 12/06/2005. Atualizado: 4/03/2011. Disponível: www.free-energy-info.co.uk/D9.pdf Acesso: 04/03/2014.

_____. **Electrolyser Designs.** Julho/2008. Disponível: www.free-energy-info.co.uk/Smack.pdf . Acesso: 04/03/2014.

O'CONNOR, Ken. **NASA Glenn Research Center Safety Manual.** Chapter 6- Hydrogen. NASA:Cleveland, Estados Unidos. 2010.

PAINe, Henry M. **Process of Manufagturing Illuminating Gas.** U.S.Patent n. 308276.

Nov.18,1884.

RHODES,William; Henes,Raymond. **Apparatus For The Electrolytic Production Of Hydrogen And Oxygen For The Safe Consumption Thereof.** U.S.Patent n.3.262.872 . July 26, 1966.

SANCHES, Leonardo P.; Gomes, José A.C.P.(orientador) . **Estudo comparativo quanto à resistência à corrosão entre aços inoxidáveis usados em trocadores de calor.** Trabalho de conlusão de curso. Escola Politécnica-UFRJ. Rio de Janeiro. 2009.

SANTOS, Diogo M. F.; SEQUEIRA, César A. C. and FIGUEIREDO, José L. . **Hydrogen production by alkaline water electrolysis.** Quím. Nova [online]. 2013, vol.36, n.8, pp. 1176-1193. ISSN 0100-4042.

SCHADEWALD, R.J. **Worlds of Their Own: A Brief History of Misguided Ideas: Creationism, Flat-Earthism, Energy Scams, and the Velikovsky Affair.** ISBN 9781436304351. Xlibris Corporation, 2008.

SCIENTIFIC AMERICAN. **The production of hydrogen and oxygen through the electrolysis of water;** in Scientific American Supplement, Vol. XXXII, no. 819: New York, 1891.

SIMPSON, BRUCE. **The proof that HHO is a scam.** May 2008. *Aardvark Daily*. Disponível: <http://www.aardvark.co.nz/hho.shtml> Acessado: 12/02/2014.

SHIMIZU, N.; Hotta, S.; Sekiya, T.; Oda, O. **A novel method of hydrogen generation by water electrolysis using an ultra-short-pulse power supply.** Journal Article. 2006 0021-891X. Journal of Applied Electrochemistry.V 36-N 4-10.1007/s10800-005-9090-y. p.419-423. Springer Netherlands Disponível: <http://dx.doi.org/10.1007/s10800-005-9090-y> . 2006.

SPIRIG, Ernest. **Water decomposition apparatus for producing detonating gas.** Patente US3957618. 18/05/1976.

YILMAZ, A.C.; Uludamar, E.; Aydin, K.. **Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines,** International Journal of Hydrogen Energy, Volume 35, Issue 20, October 2010, Pages 11366-11372, ISSN 0360-3199, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.07.040> . Elsevier:2010. 2010.

ZOULIAS,E.; Varkarakis,E.; Lymberopoulos,N.; Christodoulou,Chris N., Karagiorgis, George N., **A Review on Water Electrolysis,** The Cyprus Journal of Science and Technology (TCJST), vol.4, n.2, p.41-71. 2004.

ZENG, Kai, Zhang, Dongke. **Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications.** Elsevier, Progress in Energy and Combustion Science. V.36, Issue 3, Pages 307–326. DOI: 10.1016/j.pecs.2009.11.002. Junho 2010

REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES

Sites com informações e produtos relacionados:

<http://www.waterfuelconverters.com/Research.html>

<http://www.ecoenergyfuel.com/> (Brasil)

<http://www.hhogas.at/> (Austria)

<http://www.hho4free.com/> (EUA)

<http://www.diyhho.com/> (EUA)

<http://www.hho-brazil.com/> (Brasil)

<http://www.gasagua.com.br/> (Brasil)

<http://www.hhogas-germany.de/> (Alemanha)

<http://www.hhoitaly.com/it/> (Itália)

<http://hho-auto.fr/> (França)

<http://www.genepax.com/> (Japão)

<http://girirajsystems.com/> (India)