

**Itajubá, Dezembro de 2013**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**GÁS PRODUTO DE ELETRÓLISE UTILIZADO EM MOTORES DE  
COMBUSTÃO INTERNA**

**Autor: Denício Andrade Coelho**

**Orientador: Prof. Dr. Vladimir Rafael Mélian Cobas**

**Itajubá**

**2013**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA ENERGIA**

**Denício Andrade Coelho**

**GÁS PRODUTO DE ELETRÓLISE UTILIZADO EM MOTORES DE  
COMBUSTÃO INTERNA**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências da Engenharia de Energia.**

**Área de concentração:**

**Exploração do Uso Racional de Recursos Naturais e Energia**

**Orientador: Prof. Dr. Vladimir Mélian Cobas**

**Itajubá - MG**

**Dezembro de 2013**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –  
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB\_6/1700

C672g

Coelho, Denicio Andrade

Gás produto de eletrólise utilizado em motores de combustão interna / Denicio Andrade Coelho. -- Itajubá, (MG) : [s.n.], 2013.

134 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Rafael Melian Cobas .  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Hidrogênio. 2. Eletrólise. 3. GPE. 4. Energia renovável.  
5. HHO. 6. Gás de Brown. I. Cobas, Vladimir Rafael Melian,  
orient. II. Universidade Federal de Itajubá. III. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA ENERGIA**

**Denício Andrade Coelho**

**GÁS PRODUTO DE ELETRÓLISE UTILIZADO EM MOTORES DE  
COMBUSTÃO INTERNA**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 02 de dezembro de 2013, conferindo ao autor o título de ***Mestre em Ciências em Engenharia de Energia.***

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Vladimir Mélian Cobas (Orientador)

Prof. Dr. José Luz Silveira

Prof. Dr. Carlos Roberto Rocha

**Itajubá 2013**

## **Dedicatória**

*Dedico este trabalho a todos aqueles que acreditam em soluções para o mundo em que vivemos.*

*Dedico também aos meus pais, que me ensinaram a arte do pensar e a atitude de amar.*

## **Agradecimentos**

*À minha família, pelos conselhos, apoio, compreensão, amizade e paciência.*

*À minha companheira de jornada, Samara Pineschi, que esteve ao meu lado e foi essencial fonte de motivação.*

*Ao meu orientador, Vladimir Cobás, pela oportunidade e ensinamentos oferecidos.*

*Aos amigos José Zota Bustamante, Luiz Célio Dom e André Luiz Macedo, pelo incentivo moral financeiro que viabilizou o início dessa pesquisa.*

*Aos amigos Lucas e Luís Gustavo de São José do Alegre, pela troca de experiências e entusiasmo.*

*Ao amigo Hildebrando Galo, pela grande ajuda com suas GHG's e seu conhecimento de mecânica de motores.*

*Ao amigo Afonso Celso “Quebrando o Sistema”, por me apresentar a tecnologia alvo dessa pesquisa.*

*A todos os amigos que me incentivam a estudar os segredos do universo e da energia.*

*It is a mere question of time*

*When men will succeed*

*In attaching their machinery to the*

*Very wheelwork of nature.*

*(Nikola Tesla)*

## RESUMO

**COELHO, D. A. (2013)**, Gás Produto de Eletrólise Utilizado em Motores de Combustão Interna, Itajubá, 134 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Energia (Exploração do Uso Racional de Recursos Naturais e Energia) – Núcleo de Excelência em Eficiência Energética, Universidade Federal de Itajubá.

O uso de hidrogênio para melhorar o desempenho de motores vem sendo investigado desde o início do século XX. Menor consumo, redução de emissões e melhor desempenho são alcançados quando da adição de pequenos volumes de hidrogênio no processo de combustão. Porém, obstáculos relacionados ao seu armazenamento e distribuição limitam as aplicações práticas dessa tecnologia em larga escala, para curto e médio prazos. O objetivo geral do trabalho é estudar técnica e experimentalmente a adição do gás produto de eletrólise (GPE) no processo de combustão, para assim, colaborar no desenvolvimento de tecnologia de transição, capaz de inserir, de forma gradativa, o hidrogênio na matriz energética do setor de transportes. Indicativos de redução de emissões de poluentes para determinadas condições de operação de motores veiculares carburados foram alcançados. Em contrapartida, o ensaio realizado em laboratório demonstrou que, sem qualquer ajuste dos parâmetros de operação de um motor estacionário de grupo gerador gasolina, a adição de GPE em taxas equivalentes à da experiência veicular realizada é ineficaz na melhora de seu desempenho. As análises da literatura e das experimentações realizadas indicam que operações com atraso do tempo de ignição e aumento da razão de excesso devem ser verificadas a fim de se identificar situações de operação que possam apresentar melhora no desempenho em experimentos reprodutíveis em laboratório. Base de informação teórica e prática foi organizada com intuito de viabilizar réplicas e experimentações futuras.

**Palavras-Chave: Hidrogênio, Eletrólise, GPE, Energia Renovável, Motores a Combustão, Análise Experimental, HHO, Gás de Brown, Eficiência Energética.**

# ABSTRACT

**COELHO, D. A. (2013)**, Electrolysis Product Gas Utilized in Internal Combustion Engines, Itajubá, 134 p. Msc. Dissertation in Energy Engineering (Exploration of Natural Resources and Energy Rational Use) – Center of Excellence in Energy Efficiency, Federal University of Itajubá.

The use of hydrogen to enhance internal combustion engine performance has been investigated since beginning of the 20<sup>th</sup> century. Reduction on pollutant emissions and better performance are obtained to small quantities of gas added to the combustion process. However, difficulties concerning storage and distribution limit its applications for large scale, for short and medium terms. The main goal of this work is study technically and experimentally the use of Electrolysis Product Gas (GPE) in the combustion process to contribute to transition technology development that is able of gradually introduce hydrogen on the transport energy matrix. Good indicatives of reduction on pollutant emissions were obtained for automotive engines with carburetor for some specific operation conditions. In contrast, the experiment performed on laboratory has shown that, in absence of operation parameters adjustment of a stationary engine belonging to a generation set, no gains occur in engine performance with GPE addition for the same insertion rate as the automotive experiment. Experiments and background literature analysis indicate that delayed ignition time and high excess air ratio operation must be verified due to identify best engine parameters adjustment, capable of improve performance when adding GPE in a reproducible laboratory experiment. Important questioning and guidance for further researches seeking GPE addition systems for internal combustion engines development are also goals of this work.

**Keywords: Hydrogen, Electrolysis, GPE, Renewable Energy, Internal Combustion Engine, HHO, Brown's Gas, Hydroxy, Experimental Analysis, Energy Efficiency.**

# SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
SUMÁRIO .....	iii
LISTA DE FIGURAS .....	vi
LISTA DE TABELAS .....	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xvi
Capítulo 1 .....	1
INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Objetivos do Trabalho .....	4
1.2 Conteúdo dos Capítulos.....	5
Capítulo 2 .....	6
REVISÃO DA LITERATURA .....	6
2.1 Eletrólise e Eletrolisadores .....	6
2.1.1 Eletrólise.....	6
2.1.2 Eletrolisadores.....	10
2.1.2 Influências da Alimentação Elétrica Aplicada ao Eletrolisador .....	13
2.2 Motores de Combustão Interna .....	20
2.2.1 Generalidades .....	20
2.2.2 Princípios de Funcionamento.....	21

2.2.3 O Processo de Combustão .....	25
2.3 A evolução do uso de hidrogênio no processo de combustão .....	29
2.3.1 Hidrogênio Proveniente de Sistemas de Armazenamento.....	33
2.3.2 Uso Gás Combustível Suplementar Imediatamente após sua Produção .....	45
2.4 A Diferença entre Gás hidrogênio e o gás produto de eletrólise.....	49
Capítulo 3 .....	53
<b>USO DE GÁS PRODUTO DE ELETRÓLISE EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA .....</b>	<b>53</b>
3.1. Visão geral da aplicação.....	54
3.2 A adaptação do Sistema em motores a combustão Interna.....	60
3.2.1 Eletrolisadores Compactos sem Separação de Gases .....	61
3.2.2 Sistemas de Segurança para Adição de GPE em Motores .....	72
3.2.3 Adaptação em Motores com Injeção Eletrônica .....	74
3.2.4 Adaptação em Motores Ciclo Otto Carburados .....	84
3.3 Controle da Energia Elétrica Fornecida a um Eletrolisador Compacto ...	87
3.3.1 Alternador e Bateria como Fontes de Energia Elétrica .....	87
3.3.2 Modulação por Largura de Pulso para controle da Corrente Elétrica Média.....	94
3.4 Análise da concentração de gases na exaustão de um GOL carburado CHT 1996 .....	99
3.4.1 Resultados e Discussões.....	101
3.5 Ensaio em grupo gerador operando com adição de GPE .....	106
3.5.1 Descrição dos elementos do Ensaio.....	106
3.5.2 Metodologia do Ensaio.....	112

<b>3.5.3 Resultados e Discussões</b> .....	114
<b>Capítulo 4</b> .....	123
<b>CONCLUSÕES</b> .....	123
<b>4.1 Sugestões para trabalhos futuros</b> .....	126
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	129

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Oferta interna de energia no Brasil – BEN 2013. (EPE, 2013).....	2
Figura 2: Evolução do consumo de energia em um processo de eletrólise ideal (a) como função da temperatura à pressão normal (1 atm) (b) como função da pressão à temperatura normal (298,15 K). Fonte: traduzido de (URSUA, et al., 2012) .....	8
Figura 3: Curva característica I-V de uma célula de eletrólise alcalina para temperaturas de 25° C e 65° C a uma pressão de 20 bar. Fonte: traduzido de (URSUA, et al., 2012).....	9
Figura 4: Configuração de um módulo de eletrólise (a) módulo unipolar ou conexão paralela de células (b) módulo bipolar ou conexão série de células. Fonte: traduzido de (URSUA, et al., 2012).....	10
Figura 5: Esquema do princípio operacional de uma célula de eletrólise alcalina com separação dos gases. Fonte: traduzido de (URSUA, et al., 2012) .....	11
Figura 6: Exemplo de modulação PWM.....	14
Figura 7: Forma de onda de picos ultra-curtos. Fonte: traduzido de (SHIMIZO, et al., 2006) .....	15
Figura 8: Eficiência na geração de hidrogênio como função de potência de alimentação. Fonte: traduzido de (SHIMIZO, et al., 2006) .....	16
Figura 9: Formas de onda em uma célula de eletrólise alcalina comercial – Alimentação com uso de <b>Tiristores</b> – (a) Corrente e tensão aplicados e (b) distribuição harmônica de corrente no eletrolisador. (SANCHIS, et al., 2009) .....	17

Figura 10: Formas de onda em uma célula de eletrólise alcalina comercial – Alimentação com uso de <b>Transistores</b> – (a) Corrente e tensão aplicados e (b) distribuição harmônica de corrente no eletrolisador (SANCHIS, et al., 2009).....	17
Figura 11: Consumo de Energia e eficiência referida ao PCS do H <sub>2</sub> (condições de operação 20 bar e 65 °C. Fonte: traduzido de (SANCHIS, et al., 2009).....	18
Figura 12: Mecanismos da eletrólise por plasma ao redor de placas anodo e catodo. Fonte: traduzido de (GOLDMAN, et al., 2010).....	19
Figura 13: Elementos comuns aos motores alternativos. Fonte: <a href="http://www.if.ufrgs.br/~leila/motor.htm">http://www.if.ufrgs.br/~leila/motor.htm</a> ; acesso: 15/09/13.....	22
Figura 14: Árvore de Manivelas. Fonte: <a href="http://rowalcentroautomotivo.com.br">http://rowalcentroautomotivo.com.br</a> ; acesso: 15/09/13.....	22
Figura 15: As 4 etapas de um motor de 4 tempos. ( <a href="http://rowalcentroautomotivo.com.br">http://rowalcentroautomotivo.com.br</a> ; 15/09/2013). .....	24
Figura 16: Diagrama esquemático de inserção de hidrogênio como combustível suplementar. Fonte: traduzido de (WANG, et al., 2010a).....	33
Figura 17: Pressão média efetiva X razão de excesso de ar para diferentes concentrações de hidrogênio na mistura. Fonte: traduzido de (JI, et al., 2009a) .....	34
Figura 18: Eficiência Térmica do motor X razão de excesso de ar para diferentes concentrações de hidrogênio na mistura. Fonte: traduzido de (JI, et al., 2009a) .....	36
Figura 19: Pressão Interna de Cilindro X Deslocamento do pistão. Fonte: traduzido de (JI, et al., 2009a).....	37
Figura 20: Desenvolvimento de chama X Razão volumétrica de hidrogênio adicionado $\alpha_{H_2}$ . Fonte: (WANG, et al., 2010a).....	39
Figura 21: Propagação de chama X Razão volumétrica de hidrogênio adicionado $\alpha_{H_2}$ . Fonte: (WANG, et al., 2010b).....	40

Figura 22: Influência de tempo de ignição de centelha. Fonte: Traduzido de (ZANG, et al., 2010).	41
Figura 23: Concentração de HC X Razão de excesso de ar. Fonte: traduzido de (JI, et al., 2009b)	42
Figura 24: Concentração de CO X Razão volumétrica de hidrogênio adicionado $\alpha_{H_2}$ . Fonte: (WANG, et al., 2010b).	43
Figura 25: Emissões de CO <sub>2</sub> . Fonte: traduzido de (JI, et al., 2009a)	43
Figura 26: Concentração de NO <sub>x</sub> X Tempo de ignição de centelha Fonte: Traduzido de (ZANG, et al., 2010).	44
Figura 27: Foto e arranjo da Célula “B” – (1. Caixa de fibra de vidro; 2. Tubo para entrada de ar; 3.Válvula de entrada; 4.Válvula de saída; 5.conexão de eletrodo; 6. Placas de aço) (AL-ROUSAN, 2010).	46
Figura 28: Foto da célula “C” (AL-ROUSAN, 2010).	47
Figura 29: Consumo Epecífico de gasolina do motor Honda G200. Fonte: traduzido de (AL-ROUSAN, 2010).	47
Figura 30: Eficiência Térmica do motor Honda G200. Fonte: traduzido de (AL-ROUSAN, 2010).	48
Figura 31: Comportamento de emissões de CO <sub>2</sub> com adição de GPE em motor Diesel. Fonte: (BIRTAS, et al., 2011)	49
Figura 32: Molécula de H <sub>2</sub> O – Normal e Linear (ECKMAN, 2010).	50
Figura 33: Rydberg Clusters. Traduzido de (ECKMAN, 2010).	51
Figura 34: Diferenças na eletrólise com e sem separação dos gases. Fonte: traduzido de (KIM, et al., 2011)	51

Figura 35: Fluxos básicos de energia para aplicação de GPE em um veículo.....	55
Figura 36: Entradas e saídas do processo de combustão .....	56
Figura 37: Processos e fluxos de energia envolvidos na combustão.....	57
Figura 38: Processos energéticos interligados.....	58
Figura 39: Esquemático da adição de GPE em motor a combustão. Traduzido e adaptado de (WANG, et al., 2010b). .....	60
Figura 40: Arames helicoidais - Eletrodos (FREEDOM, 2008).....	62
Figura 41: Eletrolisador de arames helicoidais – Detalhe de entrada de ar. ....	63
Figura 42: Eletrolisador Water4Gas – Ligação Série. Traduzido de (FREEDOM, 2008). .....	63
Figura 43: Células de placas paralelas submersas. (Panacea University, 2012).....	65
Figura 44: Fuga de corrente em placas submersas. ....	66
Figura 45: Exemplo de Célula tipo “seca”. ....	67
Figura 46: Detalhe de Perfurações das placas em célula de placas paralelas confeccionada durante a pesquisa.....	67
Figura 47: Ilustração de uma “dry cell” ligada ao reservatório (água + eletrólito).....	68
Figura 48: Célula “Mista” - Mighty-Mite .....	69
Figura 49: Kit “Y tee MITE” comercializado pela D&N engineering e detalhe de suas placas adaptadas. Fonte: (D&N engineering, 2013) .....	70
Figura 50: Teste realizado em válvula corta-fogo pela “HHO Gas Technology”.....	73
Figura 51: Válvulas de proteção contra explosões utilizadas.....	73

Figura 52: Detalhe de construção da sonda Lambda (NTK, 2011). .....	77
Figura 53: Curva Característica básica de uma Sonda Lâmbda (NTK, 2011).....	78
Figura 54: Sinal de operação de uma sonda lambda (NTK, 2011).....	78
Figura 55: Formas de onda típicas de um Sensor de Oxigênio. Fonte: Traduzido de <a href="http://www.AA1Car.com">www.AA1Car.com</a> .....	79
Figura 56: Circuito EFIE para sensor de O <sub>2</sub> . ( <a href="http://www.free-energy-info.co.uk/D17.pdf">http://www.free-energy-info.co.uk/D17.pdf</a> ) .....	80
Figura 57: Funcionamento do Carburador - Baixa Rotação. Traduzido e adaptado de (WEISEMAN, 2010).....	84
Figura 58: Funcionamento Carburador – Alta Rotação. Traduzido e adaptado de (WEISEMAN, 2010). .....	86
Figura 59: Exemplo de curvas características de Corrente e Potência de Aacionamento de um alternador Bosch tipo N1. Fonte: (Bosch, 2002).....	88
Figura 60: Condições de carga e descarga da bateria do veículo. Fonte: (Bosch, 2002). .....	91
Figura 61: CCPWM utilizado em testes.....	96
Figura 62: Diagrama do CCPWM utilizado. Fonte: traduzido de Zero Fossil Fuel website ( <a href="http://alt-nrg.org/pwm-v2.html">http://alt-nrg.org/pwm-v2.html</a> ; 27/10/2013) .....	97
Figura 63: Instalação do sistema de Produção e adição de GPE utilizado .....	100
Figura 64: Detalhe do ponto de inserção de GPE através do carburador .....	100
Figura 65: Concentrações de HC na exaustão.....	103
Figura 66: Concentrações de CO na exaustão. ....	104

Figura 67: Concentrações de CO <sub>2</sub> na exaustão.....	104
Figura 68: Variação de concentração de gases na Exaustão. ....	105
Figura 69: Grupo gerador utilizado.....	107
Figura 70: Proveta graduada e cronômetro utilizados para medição de consumo de gasolina.....	108
Figura 71: Bancada de ensaios de geradores.....	109
Figura 72: Multimetro Trifásico utilizado. ....	109
Figura 73: Eletrolisador, Fonte, CCPWM, Multímetros e Alicates Amperímetro .....	110
Figura 74: Detalhe do sistema de inserção de GPE.....	111
Figura 75: Recipientes utilizados na medição de GPE produzido.....	112
Figura 76: Exemplo de planilha utilizada para coleta de dados durante ensaio.....	114
Figura 77: Consumo específico para cada situação.....	120
Figura 78: Rendimento Global reduzido para cada situação.....	120

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados técnicos de eletrolisadores comerciais. Fonte: (SOUZA, 1998).....	13
Tabela 2: Diferenças Básicas entre motores Ciclo “Otto” e Ciclo “Diesel” (FLORES, 2004).....	25
Tabela 3: Propriedades: Hidrogênio e gasolina. Traduzido de (ZANG, et al., 2010) .....	35
Tabela 4: Exemplo de Demanda de Potência em 14V ( Gol – 96).....	92
Tabela 5: Corrente Nominal do alternador sugerida pela Bosch para diferentes faixas de potência do sistema. (Bosch, 2002) .....	93
Tabela 6: Medições de fluxo de corrente elétrica do sistema.....	98
Tabela 7: Parâmetros de operação do eletrolisador.....	101
Tabela 8: Análise de Gases da combustão .....	102
Tabela 9: Alternador Mecc Alte .....	107
Tabela 10: Motor Honda GX 620.....	108
Tabela 11: Principais Parâmetros de operação do Sistema de Produção de GPE .	113
Tabela 12: Médias das Variáveis calculadas Sem GPE.....	117
Tabela 13: Médias das Variáveis calculadas “Com GPE – 5,5 A” .....	118
Tabela 14: Médias das Variáveis calculadas “Com GPE – 6,5 A” .....	118
Tabela 15: Médias das Variáveis calculadas “Com GPE – 7,5 A” .....	118
Tabela 16: Variação média de consumo .....	119

## SIMBOLOGIA

$C_e$	<i>Consumo Específico de Energia do Sistema Eletrolisador [Wh/l]</i>
$F$	<i>Constante de Faraday [C/mol]</i>
$I_B$	<i>Corrente na Bateria [A]</i>
$I_{CELL}$	<i>Corrente em cada Célula [A]</i>
$I_e$	<i>Corrente Exigida pelo Eletrolisador [A]</i>
$I_G$	<i>Corrente do Alternador / Gerador [A]</i>
$I_L$	<i>Corrente com Motor em Marcha Lenta [A]</i>
$I_M$	<i>Corrente do Módulo Eletrolisador [A]</i>
$I_{máx}$	<i>Corrente Máxima Liberada pelo Alternador [A]</i>
$I_N$	<i>Corrente Nominal do Alternador [A]</i>
$I_W$	<i>Corrente dos Equipamentos Consumidores [A]</i>
$I_{W1}$	<i>Corrente Exigida pelos Consumidores Contínuo de Longa Duração [A]</i>
$PCS_{H_2}$	<i>Poder Calorífico Superior do Hidrogênio [kWh/m<sup>3</sup>]</i>
$P_{W1}$	<i>Potência Exigida pelos Consumidores Contínuo de Longa Duração [W]</i>
$Q$	<i>Energia Térmica [kJ/mol]</i>
$T$	<i>Temperatura [°C]</i>
$V_{ar}$	<i>Volume Real de Ar [Nm<sup>3</sup>/kg]</i>
$V_{ar}^0$	<i>Volume Mínimo de Ar para Combustão Completa [Nm<sup>3</sup>/kg]</i>

$V_{ATIVAÇÃO}$	<i>Sobretensão de Ativação do Processo de Eletrólise [V]</i>
$V_{CELL}$	<i>Tensão em cada Célula [V]</i>
$V_e$	<i>Tensão Exigida pelo Eletrolisador [V]</i>
$V_M$	<i>Tensão do Módulo Eletrolisador [V]</i>
$V_{OHM}$	<i>Sobretensão Ohmica do Processo de Eletrólise [V]</i>
$Vol_{H_2}$	<i>Volume de Gás Hidrogênio Produzido [m<sup>3</sup>]</i>
$V_{OP}$	<i>Tensão de Operação do Processo de Eletrólise [V]</i>
$V_{REV}$	<i>Tensão Reversível do Processo de Eletrólise [V]</i>
$V_{TN}$	<i>Tensão Termo-Neutra do Processo de Eletrólise [V]</i>
$V_{TRANSPORTE}$	<i>Sobretensão de Transporte do Processo de Eletrólise [V]</i>
$z$	<i>Número de Elétrons [adm]</i>
$\Delta H^o$	<i>Variação da Entalpia [kJ/mol]</i>
$\Delta G^o$	<i>Variação da Energia Livre de Gibb`s [kJ/mol]</i>
$\Delta S$	<i>Variação da Entropia [kJ/mol]</i>
$\Delta t$	<i>Tempo transcorrido [h]</i>
$\eta_e$	<i>Eficiência Geral do Sistema Eletrolisador [adm]</i>
$\eta_L$	<i>Rotação do Motor em Marcha Lenta [min<sup>-1</sup>]</i>
$\eta_{máx}$	<i>Rotação Máxima do Alternador [min<sup>-1</sup>]</i>
$\eta_N$	<i>Rotação Nominal do Alternador [min<sup>-1</sup>]</i>
$\eta_o$	<i>Rotação do Alternador com Corrente Nula [min<sup>-1</sup>]</i>

$\lambda$	<i>Coefficiente de Excesso de Ar</i>
$\alpha_{H_2}$	<i>Razão de Adição de Hidrogênio [%]</i>
$N_e$	<i>Potência Efetiva (cv)</i>
$P_{ativa}$	<i>Potência Ativa medida no multimedidor trifásica (kW)</i>
$\eta_{alternador}$	<i>Rendimento do alternador</i>
$Q$	<i>Consumo absoluto de combustível (g/h)</i>
$V_c$	<i>volume de combustível consumido medido (ml)</i>
$d_c$	<i>densidade da gasolina</i>
$t$	<i>Tempo transcorrido para consumo do volume de combustível medido</i>
$q$	<i>Consumo específico de Combustível (g/cv.h)</i>
$N_c$	<i>Potência do Combustível (cv)</i>
$PCI_{gasolina}$	<i>Poder Calorífico Inferior da gasolina</i>
$\eta_t$	<i>Rendimento Global</i>
$R$	<i>Fator de redução para motores ciclo</i>
$T$	<i>Temperatura ambiente (°C)</i>
$B_s$	<i>Pressão Barométrica de ar seco (mmHg)</i>
$B$	<i>Pressão Barométrica observada (mmHg)</i>
$\varphi$	<i>Umidade relativa do ar observada (%)</i>

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APMS: Antes do Ponto Morto Superior

Bmep: Pressão Média Efetiva

CCPWM : Modulador por Largura de Pulso a Corrente Constante

CO: Monóxido de Carbono

CO<sub>2</sub>: Dióxido do Carbono

CTS: Sensor de Temperatura de Líquido de Arrefecimento

EFIE: Adaptador de Sinais do Sistema de Injeção Eletrônica

GPE: Gás Produto de Eletrólise

GNV: Gás Natural Veicular

H<sub>2</sub>: Gás Hidrogênio

H<sub>2</sub>O: Molécula de água

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Peróxido de Hidrogênio

IAT: Temperatura do Ar no coletor de admissão

KOH: Potassa Cáustica ou Hidróxido de Potássio

LED: Diodo Emissor de Luz

MAF: Vazão da Massa de Ar

MAP: Pressão Absoluta de Coletor de Admissão

MCI: Motor de Combustão Interna

NaOH: Hidróxido de Sódio ou Soda Cáustica

N<sub>ox</sub>: Hidróxido de Nitrogênio

NTC: Coeficiente Negativo de Temperatura

N<sub>2</sub>: Gás Nitrogênio

O<sub>2</sub>: Gás Oxigênio

PMS: Ponto Morto Superior

SO<sub>2</sub>: Dióxido do Enxofre

UCE: Unidade de Controle Eletrônico

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

Atualmente, a demanda por energia, para a maioria dos processos, é suprida principalmente por combustíveis de fontes fósseis, tecnologia já dominada pelo homem, mas que causa comprovados efeitos negativos ao meio ambiente e à sociedade, tais como: altos custos de exploração e transporte, o que eleva os preços para o consumidor final, causando também instabilidade política e, para muitas nações, a dependência externa; emissão de poluentes perigosos à saúde humana; aumento nos níveis de gases de efeito estufa na atmosfera e conseqüente aumento da temperatura global, entre outros.

No Brasil esse cenário não é diferente. Grande parcela da matriz energética é composta por combustíveis produzidos a partir do petróleo. Vale ressaltar que, em nosso país, grande parte da energia elétrica ofertada, 79,9 %, é proveniente de fonte de energia primária hidráulica, e o grande uso de derivados de petróleo está altamente relacionado ao setor de transportes (EPE, 2013).

A Figura 1 a seguir mostra a oferta de energia interna no Brasil, no ano de 2012, segundo dados do Balanço Energético Nacional - BEN 2013, onde se pode observar o petróleo como fonte de maior expressão na oferta de energia interna do país.

Em contrapartida a esse cenário, o uso de hidrogênio vem sendo amplamente discutido e pesquisado como fonte de energia, apresentando ótimas características como combustível e sendo sugerido como potencial alternativa aos combustíveis fósseis. Seu alto conteúdo energético e a não emissão de poluentes em sua queima completa são

alguns dos fatores que apontam o hidrogênio como alternativa ideal para o deslocamento no uso de combustíveis fósseis para combustíveis alinhados a padrões de sustentabilidade.

Gráfico 1.2.a – Produção de Energia Primária  
Chart 1.2.a – Primary Energy Production

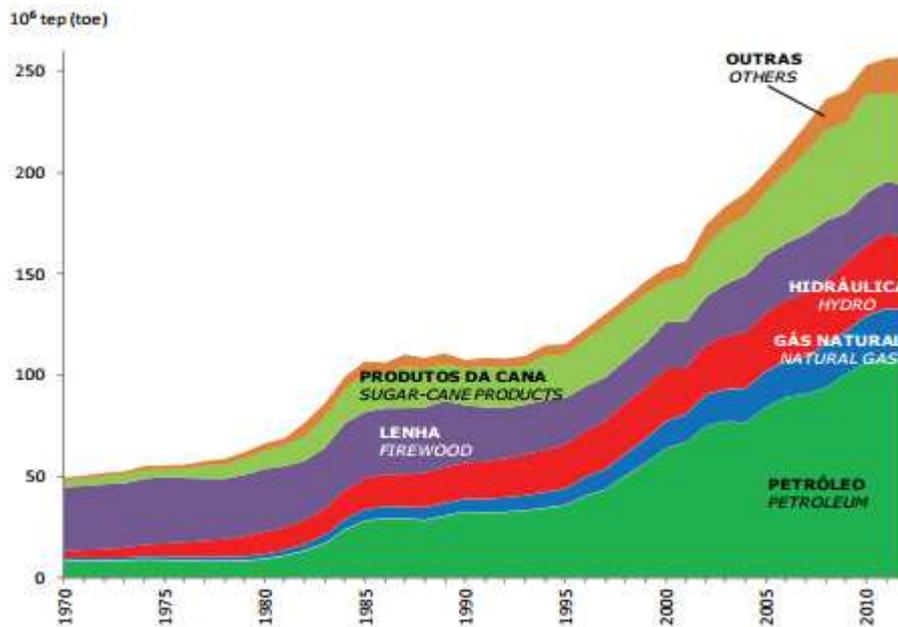


Figura 1: Oferta interna de energia no Brasil – BEN 2013. (EPE, 2013)

Entretanto, grandes desafios científicos e tecnológicos na implantação e manutenção de uma rede de geração, armazenamento e distribuição são fatores limitantes para tal desenvolvimento em larga escala, em especial quando horizontes de curto-médio prazo são considerados. Dentre os atuais desafios tecnológicos está o desenvolvimento de materiais para sistemas de armazenamento de hidrogênio confiáveis. Devido a sua alta difusibilidade, ligas especiais são necessárias na fabricação de tanques para seu armazenamento em altas pressões, e os riscos envolvidos na implantação de tais tanques para aplicações não estacionárias, veicular, por exemplo, são grandes.

Um cenário de substituição, ou seja, de inserção do hidrogênio como combustível alternativo aos combustíveis provenientes do petróleo, faz-se ainda mais complicado se observarmos o hidrogênio como vetor energético que é, e não como fonte de energia primária. Apesar de ser um dos elementos mais abundantes na natureza, o hidrogênio pronto para suprir necessidades práticas de aplicação, transporte e armazenamento só é produzido mediante fonte externa de energia, seja ela térmica ou elétrica. Sendo assim, para que o hidrogênio seja considerado um "combustível não poluente", é necessária, obrigatoriamente, a utilização de fontes de energia renováveis para sua produção. Atualmente, as formas mais comuns de produção de hidrogênio são os processos de reforma a vapor e a eletrólise. Atualmente, 96% do hidrogênio produzido no mundo são provenientes de reforma a vapor com uso de combustíveis fósseis, e os outros 4%, a partir da eletrólise da água (URSUA, et al., 2012).

Estados Unidos, alguns países da Europa e Japão desenvolvem grande número de pesquisas no desenvolvimento de tecnologias que visam utilizar o hidrogênio em células combustíveis capazes de transformar esse gás combustível em eletricidade e, assim, alimentar um motor elétrico para tração de veículos.

Barreiras estruturais e econômicas para tal transformação são enormes. A substituição de veículos providos de motores a combustão interna por aqueles dotados de célula combustível e motor elétrico se opõe a todo um mercado mundial vigente, com base no comércio de derivados de petróleo, que apresenta movimentação financeira de trilhões de dólares anuais. Faz-se necessário, para real viabilidade econômica da implantação desse tipo de sistemas em caráter mundial, que elevados valores financeiros devam ser agregados à tecnologia de células-combustível, o que torna a evolução de tal aplicação lenta e pouco acessível, em vista do nível de investimentos necessários.

Em contrapartida às adversidades apresentadas para um cenário ideal de total substituição e de deslocamento drástico da matriz energética em direção a combustíveis menos poluentes, um cenário de transição e inserção gradativa do hidrogênio como vetor energético desponta como possível solução, principalmente para o setor de transporte. Muitos estudos sugerem que a adição de pequenas quantidades de hidrogênio no

processo de combustão possa diminuir a emissão de gases de efeito estufa, além de melhorar desempenho e consumo de motores ciclo Otto, bem como os de ciclo Diesel.

Uma abordagem desse tipo torna possível a adaptação de motores já existentes no mercado, de forma a aumentar sua eficiência e com isso diminuir os impactos ambientais recorrentes do uso de combustíveis derivados do petróleo, porém sem a necessidade da substituição de tecnologia já amplamente utilizada. Da mesma forma, o direcionamento do desenvolvimento gradativo de alternativas aos combustíveis fósseis cria um cenário de transição viável, onde pesquisa e desenvolvimento de produtos e patentes devem ser incentivados de forma descentralizada visando maior acessibilidade e simplicidade das soluções práticas.

## **1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO**

O objetivo geral do trabalho é estudar técnica e experimentalmente a adição do Gás Produto de Eletrólise (GPE) no processo de combustão, organizando informações e criando indicadores interessantes sobre desempenho e emissão de poluentes em motores de combustão interna para, dessa forma, colaborar no desenvolvimento de tecnologia de transição capaz de inserir de forma gradativa o gás hidrogênio na matriz energética do setor de transportes. São ainda objetivos específicos deste trabalho:

- Reunir literatura disponível e de qualidade a respeito do uso do hidrogênio em pequenas quantidades para aumento de eficiência em motores de combustão interna, assim como a respeito do uso de gás rico em hidrogênio, produto da eletrólise sem separação de gases.
- Realizar experimentações para produzir indicadores sobre análise de desempenho e redução de emissão de poluentes de MCI dotado de sistema compacto de produção e inserção de gás rico em hidrogênio produto da eletrólise.

- Organizar informações que propiciem réplicas e experimentações práticas rumo ao desenvolvimento de aplicações do Gás Produto de Eletrólise e seu uso em MCI.

## 1.2 CONTEÚDO DOS CAPÍTULOS

No *Capítulo 1*, faz-se breve introdução ao tema de estudo.

No *Capítulo 2*, faz-se revisão bibliográfica dos assuntos relacionados à pesquisa, tendo como base principal publicações em indexados internacionais e livros específicos de cada tema.

No *Capítulo 3*, descrevem-se os principais fatores que influenciam o desenvolvimento de adaptações em MCI para operação com adição de GPE produzido por eletrolisadores compactos e descrevem-se, também aqui, os subsistemas da aplicação. Neste capítulo são também descritas e discutidas experimentações realizadas durante a pesquisa, assim como seus resultados.

O *Capítulo 4* reúne conclusões a respeito das dificuldades e desafios existentes no desenvolvimento das aplicações estudadas e analisa os resultados obtidos através das experimentações realizadas. São também neste capítulo delineadas recomendações para trabalhos futuros de pesquisa no campo tecnológico em questão.

## Capítulo 2

# REVISÃO DA LITERATURA

## 2.1 ELETRÓLISE E ELETROLISADORES

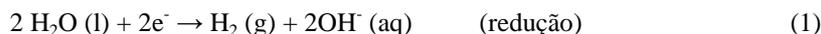
### 2.1.1 Eletrólise

A Eletrólise é o processo utilizado para produção de gás combustível suplementar rico em hidrogênio (GPE) utilizado neste estudo. Ela pode ser definida segundo Tolmasquim (2003):

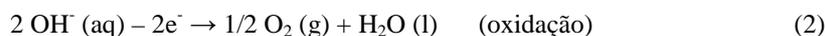
Denomina-se eletrólise o processo desenvolvido em um sistema químico onde reações são desencadeadas a partir da aplicação de uma força eletromotriz por uma fonte externa de energia. O fornecimento de tensão e corrente é feito através de eletrodos, entre os quais existe um meio condutor iônico que pode ser líquido ou sólido.

No caso de uma solução aquosa eletrolítica, quando se aplica força eletromotriz acima de um determinado potencial mínimo, que varia de acordo com a solução empregada e características físicas do eletrolisador, há passagem de corrente elétrica, que desencadeia reações eletroquímicas, e que, por sua vez, produzem gás hidrogênio no catodo (redução) e gás oxigênio no anodo (oxidação). Para um meio condutor básico, as reações básicas do processo são:

-No catodo:



-No anodo:



-Global:



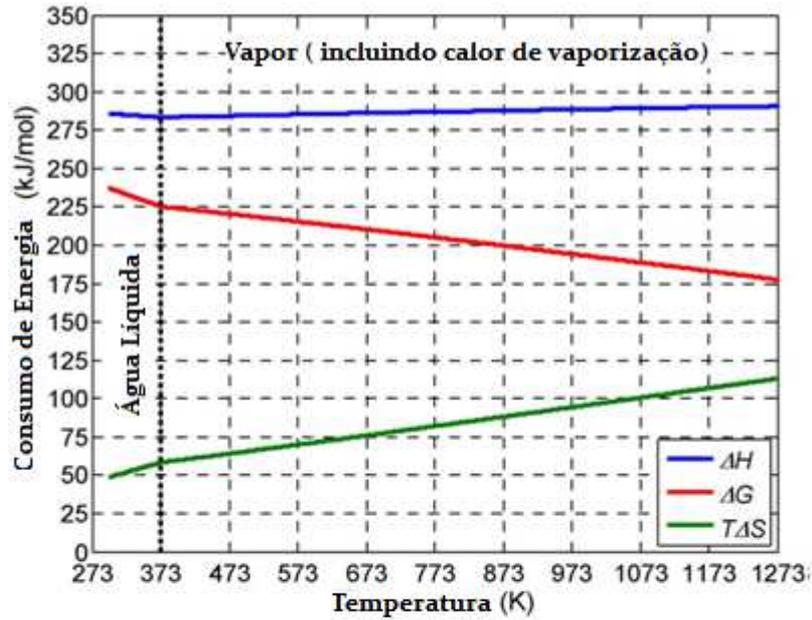
Considerando-se um processo ideal, a energia mínima requerida, para que as reações acima ocorram, é dada pela variação da entalpia do sistema ( $\Delta H^\circ$ ), composta pela soma da Energia livre de Gibb's ( $\Delta G^\circ$ ) e da Energia Térmica (Q), requerida pelo processo, que é dada, por sua vez, pelo produto da temperatura em que a reação ocorre T e a variação de Entropia da reação ( $\Delta S$ ) (URSUA, et al., 2012).

A relação entre tais grandezas é mostrada na seguinte equação:

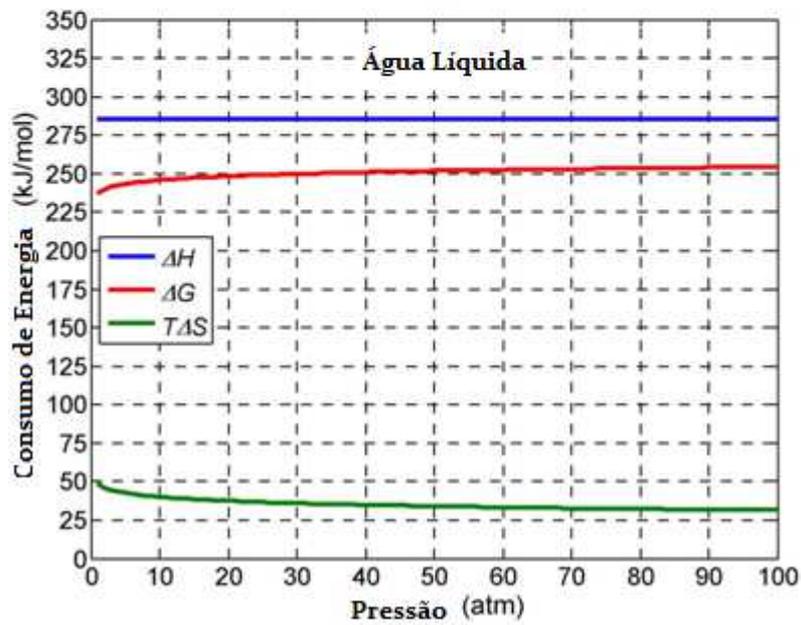
$$\Delta H^\circ = \Delta G^\circ + Q = \Delta G^\circ + T \cdot \Delta S \quad (4)$$

Para condições normais de pressão e temperatura (298,15 K e 1 atm), tem-se:  $\Delta H^\circ = 285,84 \text{ kJ/mol}$ ,  $\Delta G^\circ = 237,12 \text{ kJ/mol}$  e  $\Delta S^\circ = 0,1631 \text{ kJ/(mol.K)}$  (SANCHIS, et al., 2009).

O comportamento da reação de eletrólise está intimamente ligado às condições de temperatura e pressão a que é submetido o processo. A Figura 2, a seguir, mostra o consumo de energia em função de temperatura e pressão para duas situações: a) quando a pressão é mantida constante, e a temperatura do processo sofre variação, evidenciando situações com água em estado líquido e gasoso, e b) quando a temperatura é mantida constante a 25°C (mantendo estado líquido), e a pressão sofre variação. É possível observar, na Figura 2, que, para temperaturas maiores de operação a parcela de energia térmica entregue ao processo é maior, diminuindo a parcela referente à energia elétrica necessária para que a reação ocorra.



(a)



(b)

Figura 2: Evolução do consumo de energia em um processo de eletrólise ideal (a) como função da temperatura à pressão normal (1 atm) (b) como função da pressão à temperatura normal (298,15 K). Fonte: traduzido de (URSUA, et al., 2012)

O comportamento de uma célula eletrolítica quanto à tensão e corrente elétrica varia em função de sua temperatura de operação.

Figura 3 representa a curva característica  $V \times I$  (tensão e corrente de operação) de um eletrolisador operando à pressão constante de 20 [bar]. Para cada valor de tensão aplicada, tem-se como efeito um diferente fluxo de corrente elétrica. O fluxo de corrente elétrica é representado na figura abaixo por valores de densidade de corrente. Observa-se que, para temperaturas mais elevadas, considerando um mesmo nível de tensão aplicada, tem-se, como efeito maior, densidade de corrente circulando pela solução eletrolítica.

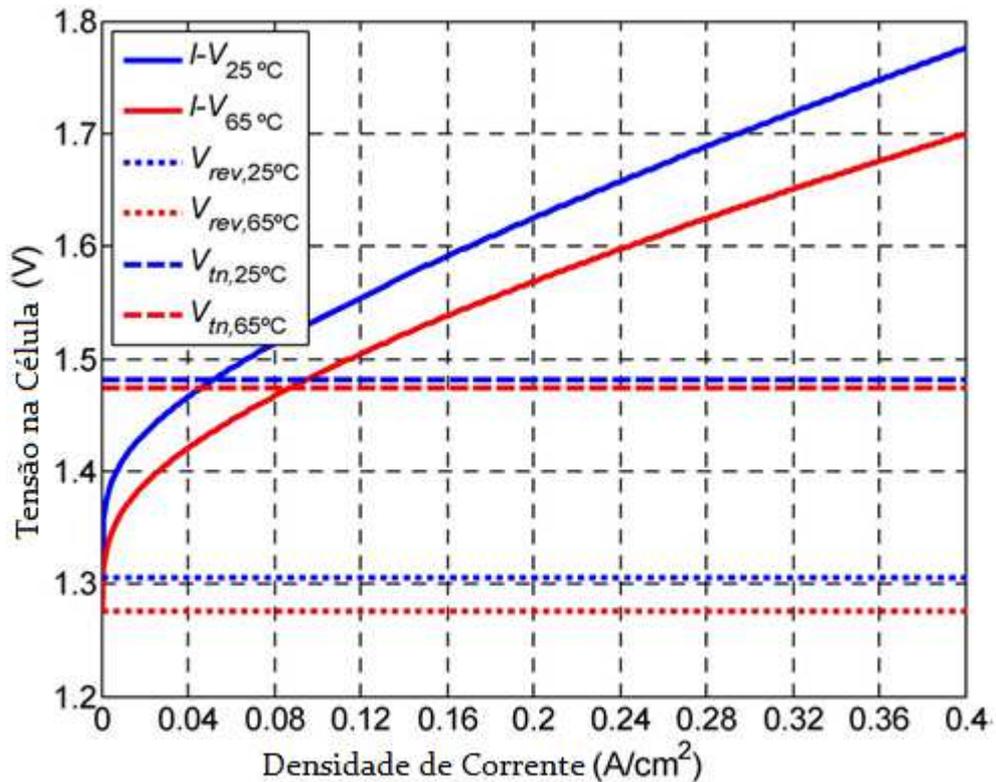


Figura 3: Curva característica I-V de uma célula de eletrólise alcalina para temperaturas de 25° C e 65° C a uma pressão de 20 bar. Fonte: traduzido de (URSUA, et al., 2012)

Ainda referente à Figura 3, tem-se que, para diferentes temperaturas, há também alteração nos valores de tensão reversível e tensão termo-neutra do processo de eletrólise. Tensão reversível ( $V_{rev}$ ) é a tensão mínima necessária para que a eletrólise aconteça idealmente, considerando-se apenas a parcela exigida pela reação química e que, no processo real, não proporciona passagem de corrente. A tensão termo-neutra

( $V_{tn}$ ) é a tensão ideal para que o processo de eletrólise ocorra pela passagem de corrente elétrica.

## 2.1.2 Eletrolisadores

Os dispositivos utilizados comercialmente para realizar a eletrólise da água são denominados eletrolisadores e podem ser, de maneira geral, de dois tipos: unipolar (também conhecido como tanque) e bipolar (também denominado filtro-prensa). Os módulos de eletrólise (conjuntos de células eletrolíticas ou superfícies de reação) podem ser configurados de diversas formas, sendo que as duas formas mais comuns de configuração (série / paralelo), encontradas na literatura do assunto estão representadas na Figura 4.

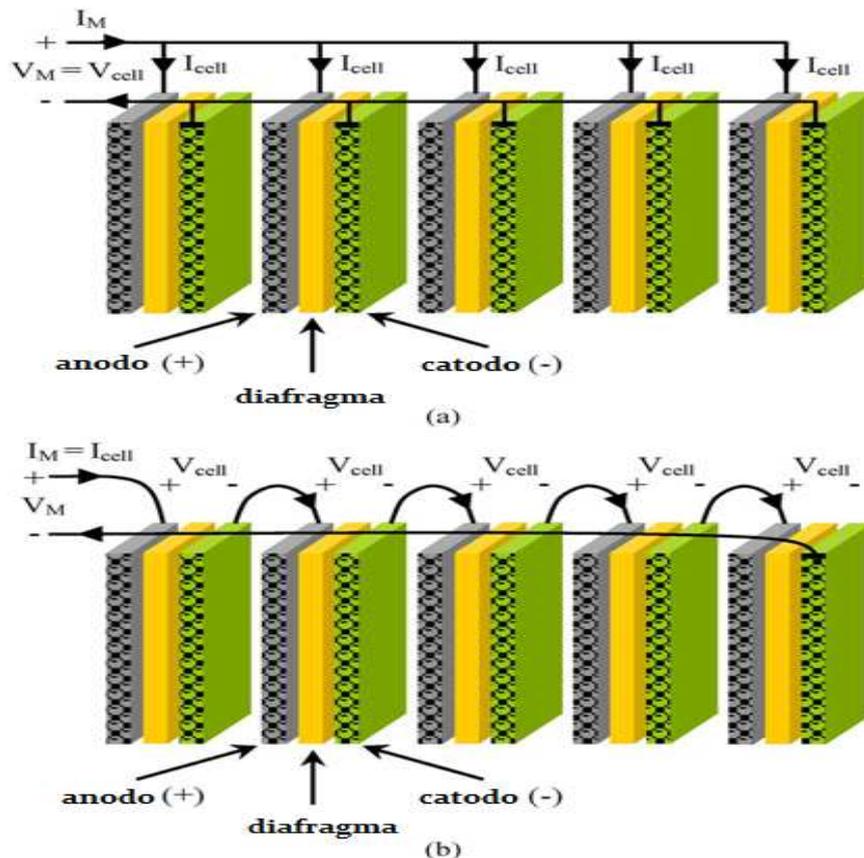


Figura 4: Configuração de um módulo de eletrólise (a) módulo unipolar ou conexão paralela de células (b) módulo bipolar ou conexão série de células. Fonte: traduzido de (URSUA, et al., 2012)

A presença de diafragma em eletrolisadores alcalinos justifica-se pela necessidade de separação dos gases produtos de eletrólise ao final do processo, cujo objetivo é a obtenção e armazenamento de hidrogênio em seu estado gasoso e bi-atômico com mais alto grau de pureza possível de ser alcançado. O diafragma também é responsável pela circulação dos ânions  $\text{OH}^-$  que circulam devido ao campo elétrico presente. A Figura 5 ilustra o princípio de operação de um eletrolisador alcalino.

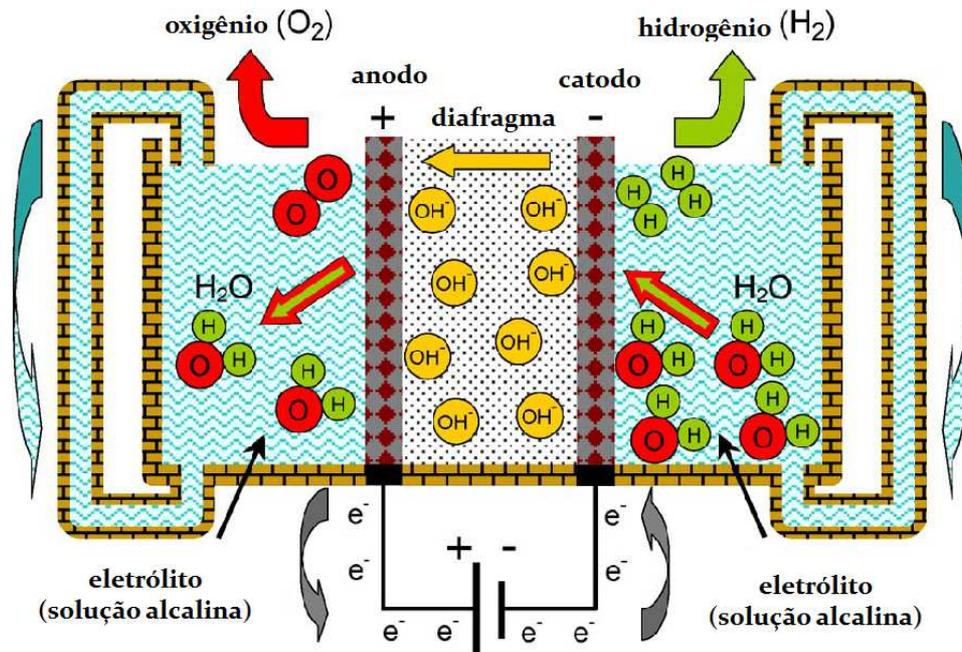


Figura 5: Esquema do princípio operacional de uma célula de eletrólise alcalina com separação dos gases. Fonte: traduzido de (URSUA, et al., 2012)

Em eletrolisadores unipolares, cada eletrodo possui apenas uma polaridade que é conectada diretamente à fonte de energia elétrica. Já em eletrolisadores bipolares, os eletrodos são conectados em série e apresentam duas polaridades, uma em cada face da placa, o que é facilmente entendível pelo fato de a mesma placa participar de duas células eletrolíticas.

Para maximização da condutividade iônica da solução eletrolítica, concentrações mássicas de eletrólito, na faixa de 15% a 30%, são utilizadas. O principal eletrólito empregado é KOH (Potassa Cáustica ou Hidróxido de Potássio), devido a seu pequeno efeito corrosivo nos eletrodos, se comparado a outros eletrólitos menos

utilizados como NaOH, (Hidróxido de Sódio ou Soda Cáustica), por exemplo (TOLMASQUIM, 2003).

A eficiência em eletrolisadores alcalinos comerciais varia normalmente de 47% a 82% (SOUZA, 1998) e pode ser calculada a partir da quantidade de gás produzida e energia elétrica consumida. O poder calorífico superior do hidrogênio é utilizado como base de cálculo para determinação da eficiência do processo, assim temos para a eficiência do eletrolisador:

$$\eta_e = \frac{PCI_{H_2}}{C_e} \quad (5)$$

Onde:

$\eta_e$  – Eficiência Geral do Sistema Eletrolisador

$PCI_{H_2}$  – Poder Calorífico Inferior do Hidrogênio (kJ / Nm<sup>3</sup>).

$C_e$  – Consumo Específico de Energia do Sistema Eletrolisador (kJ / Nm<sup>3</sup>).

Para obtenção do consumo específico, basta-se medir o fluxo de produção de hidrogênio em relação ao tempo e às grandezas elétricas envolvidas durante o processo. Dessa forma podemos escrever que:

$$C_e = \frac{V_e \cdot I_e \cdot \Delta t}{Vol_{H_2}} \quad (6)$$

Onde:

$C_e$  – Consumo Específico de Energia do Sistema Eletrolisador (kJ / Nm<sup>3</sup>).

$V_e$  – Tensão de Alimentação do Eletrolisador (Volts).

$I_e$  – Corrente Exigida pelo Eletrolisador (Ampéres).

$\Delta t$  – Tempo transcorrido durante medição de volume produzido (segundos).

$Vol_{H_2}$  – Volume de hidrogênio produzido ( $Nm^3$ ).

A Tabela 1 mostra dados técnicos de alguns eletrolisadores comercialmente disponíveis no mercado.

Tabela 1: Dados técnicos de eletrolisadores comerciais. Fonte: (SOUZA, 1998).

Fabricante	Electrolyser Co.	Norsk Hydro	De Nora Permelec	Lurgi-Bamag	Teledyne Energy Systems
<b>Eletrolisador</b>	EI-250	Padrão	Padrão	Pressurizado	Tipo-EC
<b>Tipo de célula</b>	tipo tanque	filtro prensa	filtro prensa	filtro prensa	filtro prensa
<b>Pressão de operação</b>	150 mm H <sub>2</sub> O	100-300 mm H <sub>2</sub> O	200 mm H <sub>2</sub> O	30 bar	4,2-9,1 kg/cm <sup>2</sup>
<b>Temperatura de operação</b>	70°C	75-80 °C	75 °C	--	--
<b>Densidade de corrente</b>	2.500 A/m <sup>2</sup>	--	2.000 A/m <sup>2</sup>	--	--
<b>Voltagem da célula</b>	1,85 V	--	1,9 V	--	--
<b>Eficiência da célula</b>	81%	--	--	--	--
<b>Consumo de energia</b>	4,4 kWh/Nm <sup>3</sup>	4,1 (± 0,1) kWh/Nm <sup>3</sup>	4,7 kWh/Nm <sup>3</sup>	4,3-4,6 kWh/Nm <sup>3</sup>	6,4 kWh/Nm <sup>3</sup>
<b>Consumo de água</b>	1,0 l/Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub>	0,90 l/Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub>	0,85 l/Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub>	0,85 l/Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub>	--
<b>Grau de pureza do hidrogênio</b>	99,9%	99,5%	99,8%	99,8%	99,9993%
<b>Eletrólito</b>	30% KOH	25% KOH	29% KOH	25% KOH	25% KOH

Fonte: TELEDYNE (1995); ELECTROLYSER (1995); NORSK HYDRO (1993); LURGI BAMAG (1993); DE NORA, (1992)

## 2.1.2 Influências da Alimentação Elétrica Aplicada ao Eletrolisador

Uma vez que a dinâmica do processo de eletrólise tem comportamento variável, o estudo do controle da energia elétrica a ser aplicada a um eletrolisador proporciona diversas alternativas em busca de melhoria de eficiência do processo. Além disso, dependendo da aplicação, diferentes são as necessidades envolvidas para êxito dos resultados.

Em busca de maior eficiência, diferentes sistemas podem ser utilizados para alimentação elétrica do processo de eletrólise. A utilização de princípios de Modulação por Largura de Pulsos (frequentemente citada como PWM – Pulse Width Modulation) pode ser empregada a fim de se criar pulsos de tensão com duração variada a partir de uma alimentação fixa DC (corrente contínua). Dessa forma varia-se a tensão média aplicada à carga e controla-se a transferência de potência elétrica para o eletrolisador. A Figura 6 ilustra diferentes ajustes da modulação PWM para 20%, 50%, 80% de transferência de potência entre a fonte e carga (ciclo ativo). Observa-se que, para diferentes valores de ciclo ativo, ainda se tem o mesmo período e, por consequência, mesma frequência de operação.

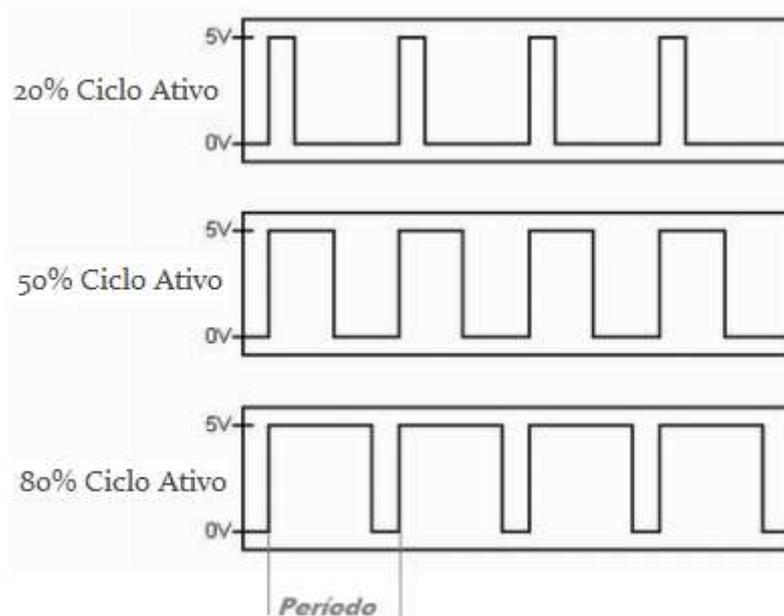


Figura 6: Exemplo de modulação PWM

Um sistema de controle de tensão e corrente aplicadas a um eletrolisador , baseado em modulação por largura de pulsos, foi desenvolvido e testado na Universidade de Çukurova, Turquia, conseguindo níveis aceitáveis de eficiência de produção e inserção de GPE. O controle foi usado para diminuir a transferência de potência para o eletrolisador quando o motor operasse com rotação menor que 1750 RPM, pois se identificou que excesso de combustível suplementar, produzido e

inserido, em baixa rotação, depreciava os resultados. Neste estudo, uma redução de 14% no consumo de Diesel e um aumento de 19% na medição de torque foram alcançados. Além disso, uma redução média de emissões de 13,5% referentes à CO e 5% referentes à HC indicam o sucesso da aplicação (YILMAZ, et al., 2012).

A aplicação de pulsos ultra-curtos como alimentação do processo de eletrólise provoca comportamento distinto, se comparada ao uso de convencional eletrólise DC. Grupos de pesquisa no Japão têm desenvolvido trabalhos a respeito e conseguido avanços na identificação de situações com eficiências maiores de produção comparando-se a energia elétrica fornecida ao processo. A Figura 7 ilustra exemplo de pico de tensão aplicado com período menor que 300 ns e a corrente resultante:

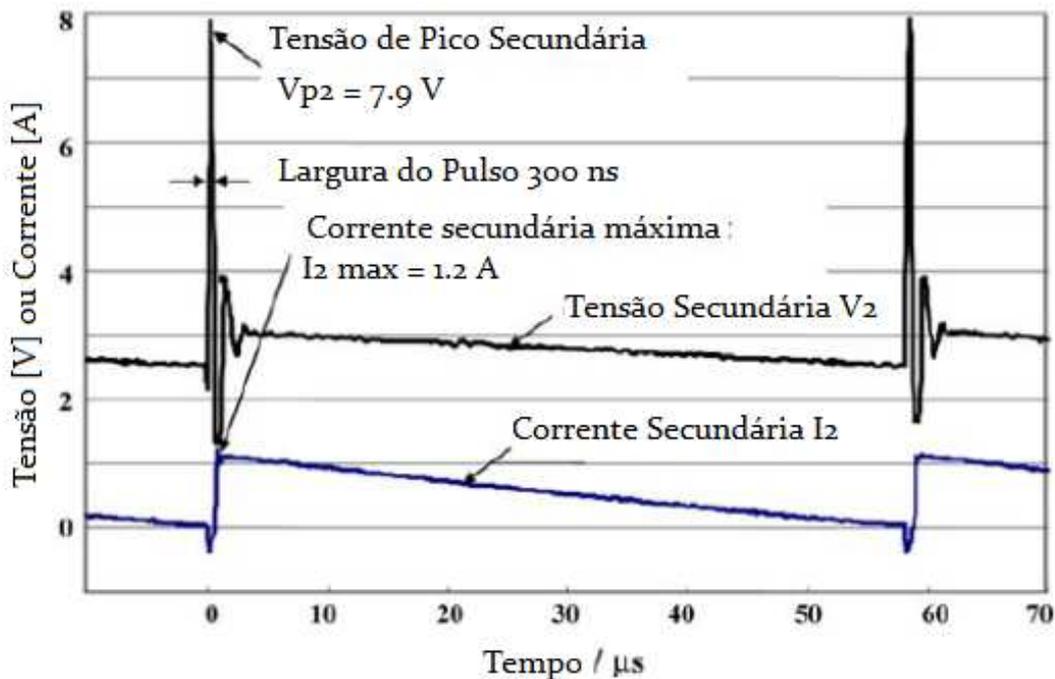


Figura 7: Forma de onda de picos ultra-curtos. Fonte: traduzido de (SHIMIZO, et al., 2006)

A Figura 8 mostra a eficiência do processo de eletrólise em função da potência de alimentação para diferentes situações de aplicação de pulsos de 300 ns. Diferentes tensões e correntes de pico caracterizaram cada situação, onde a frequência foi então variada. Observa-se que, para potências de 1 Watt, a frequência que

apresentou melhor desempenho foi a de 17 kHz, com pulsos de 7,9 V e 1,2 A. Dessa forma, superando a eficiência da eletrólise com corrente contínua convencional. Além disso, verificou-se que, para cada caso, determinados valores de pico de tensão, período do pulso ou frequência de operação podem causar ressonância na operação e proporcionar ganhos de eficiência de produção (SHIMIZO, et al., 2006).

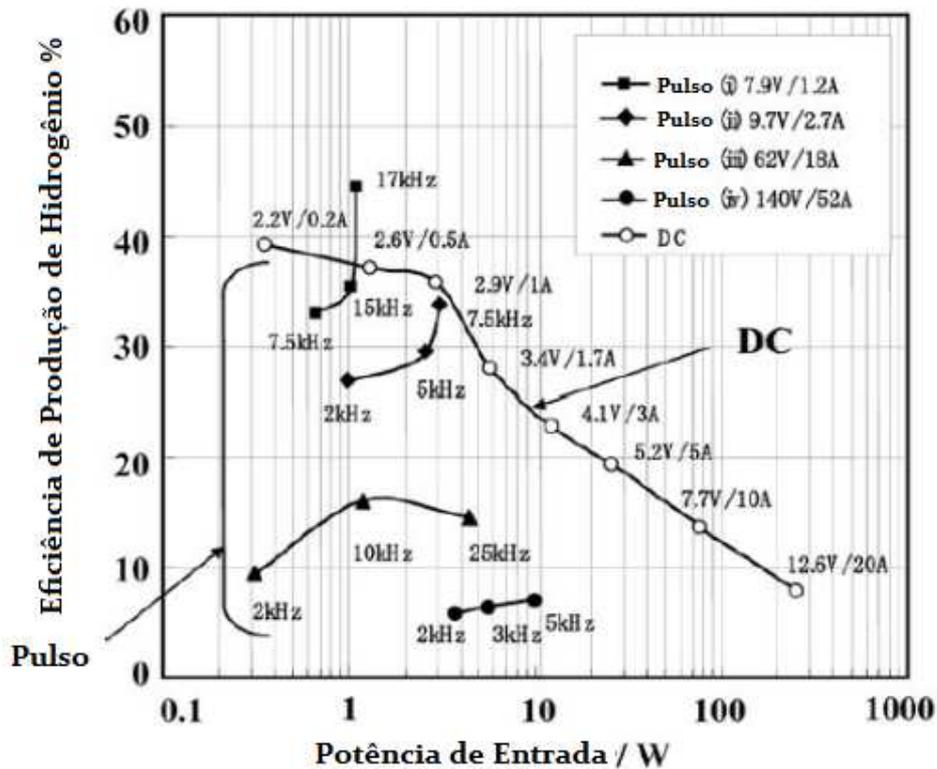


Figura 8: Eficiência na geração de hidrogênio como função de potência de alimentação.

Fonte: traduzido de (SHIMIZO, et al., 2006)

Segundo Sanchis (2009), diferentes topologias de fontes de tensão apresentam variações na eficiência do sistema eletrolisador. As Figura 9 e Figura 10 ilustram diferenças básicas das formas de onda aplicadas em eletrolisadores comerciais:

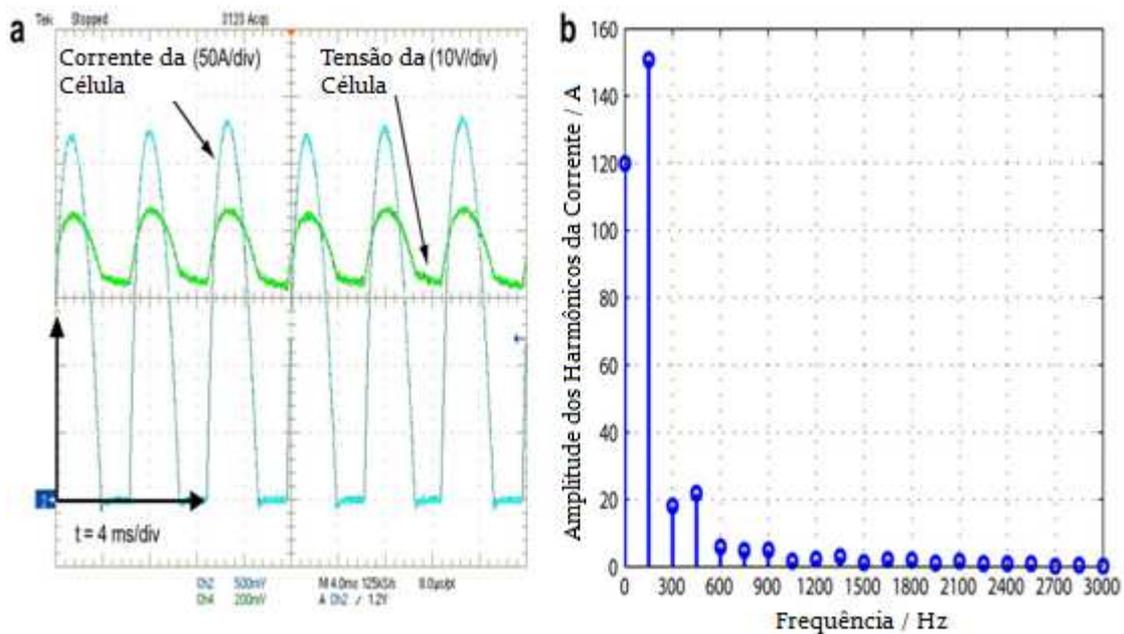


Figura 9: Formas de onda em uma célula de eletrólise alcalina comercial – Alimentação com uso de **Tiristores** – (a) Corrente e tensão aplicados e (b) distribuição harmônica de corrente no eletrolisador. (SANCHIS, et al., 2009)

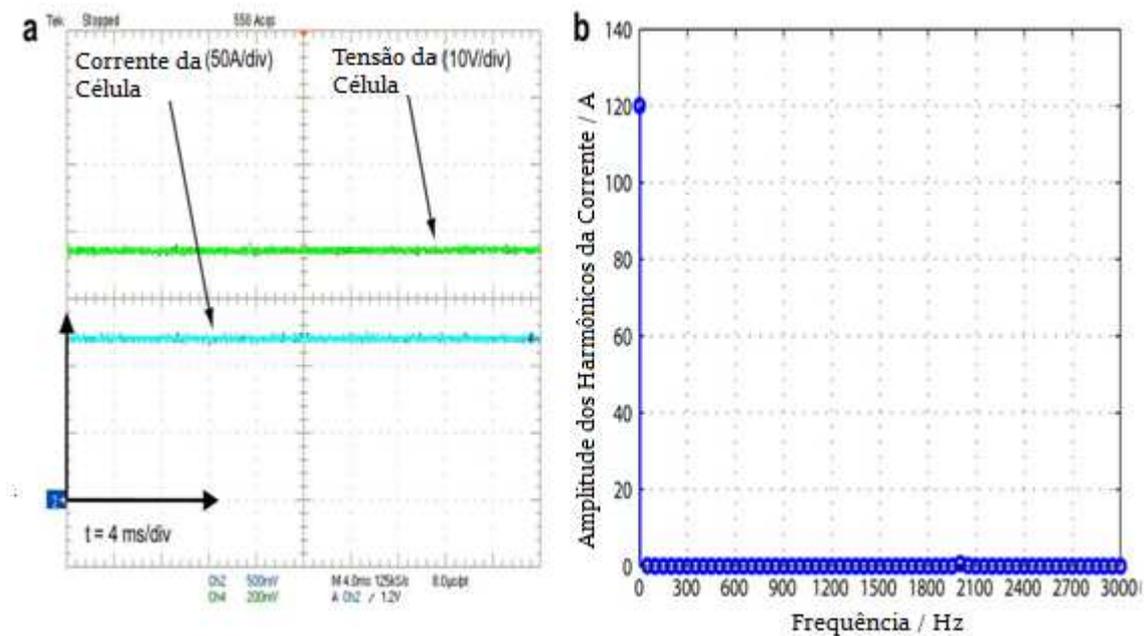


Figura 10: Formas de onda em uma célula de eletrólise alcalina comercial – Alimentação com uso de **Transistores** – (a) Corrente e tensão aplicados e (b) distribuição harmônica de corrente no eletrolisador (SANCHIS, et al., 2009).

Os resultados obtidos mostram que, para esse determinado caso, a alimentação com uso de transistores (TrPS) permitiu uma melhor eficiência de produção se comparada ao uso de tiristores (ThPS) . A Figura 11 ilustra energia consumida pelo eletrolisador em questão e sua eficiência para as duas topologias empregadas.

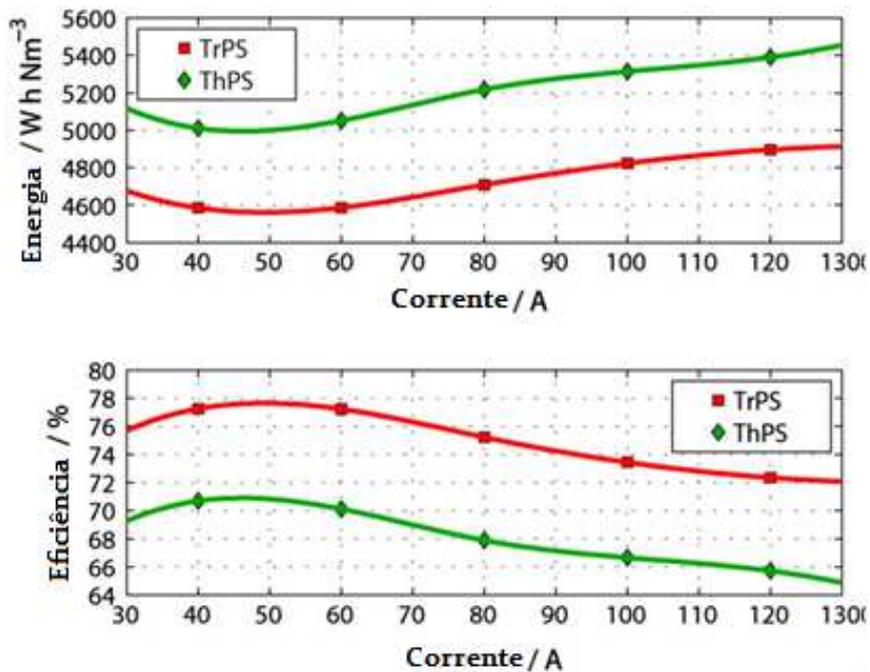


Figura 11: Consumo de Energia e eficiência referida ao PCS do H<sub>2</sub> (condições de operação 20 bar e 65 °C. Fonte: traduzido de (SANCHIS, et al., 2009).

Segundo Goldman (2010), diferentes estudos realizados no Japão, Índia e Estados Unidos demonstram que, para pulsos de tensão superiores a 100 V, uma camada de plasma aparece em regiões próximas à superfície das placas eletrodo, permitindo um comportamento da eletrólise diferente daquele descrito por Faraday. Uma das razões seria o forte campo elétrico que aparece entre as placas devido a altas tensões de operação e, assim, a formação de produtos gasosos aconteceria a certa distância das superfícies de reação. Além disso, a produção convencional (chamada de produção de Faraday) ocorreria nas superfícies de reação como esperado. Dessa forma,

um acréscimo de produção aconteceria para o mesmo consumo de energia. Tal técnica é chamada “Contact Glow Discharge Electrolisys”.

A Figura 12 ilustra o mecanismo de produção de gases através das reações eletrolíticas, sendo elas próximas às superfícies de reação (produção de Faraday), e a certa distância dessas superfícies, porém dentro da camada de plasma criada. A figura também ilustra a direção do campo elétrico criado pela tensão aplicada.

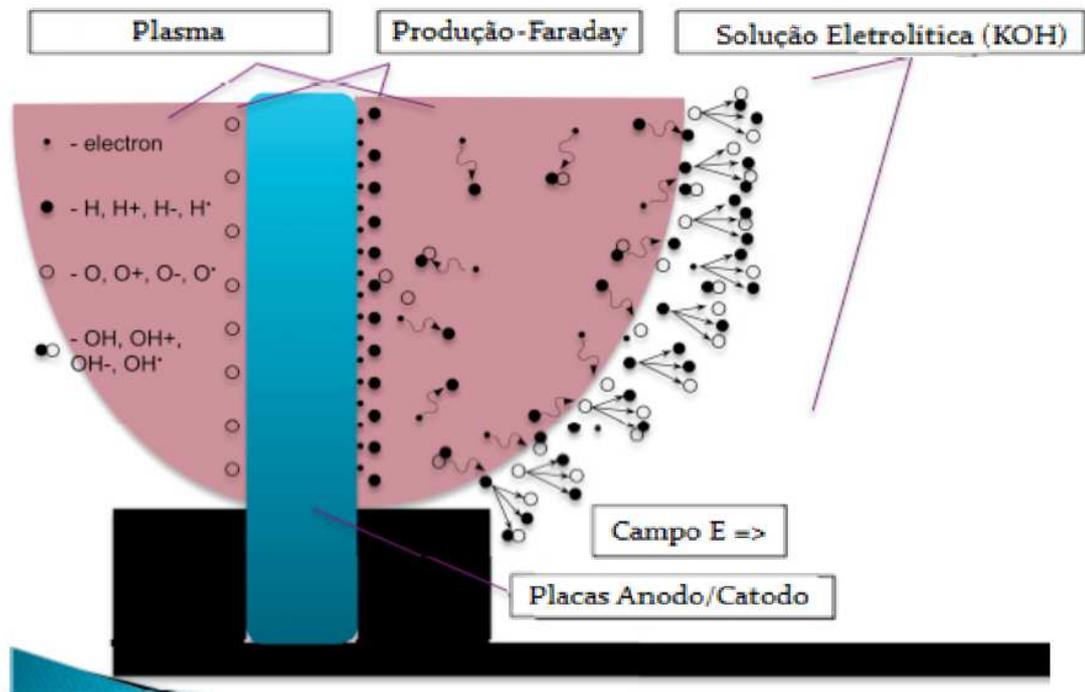


Figura 12: Mecanismos da eletrólise por plasma ao redor de placas anodo e catodo. Fonte: traduzido de (GOLDMAN, et al., 2010).

Poucos são os trabalhos realizados e publicados neste âmbito ao redor do mundo, porém importantes observações e grandes avanços já foram realizados a fim de se aumentar a eficiência do processo de eletrólise da água através da adequação de formas de onda aplicadas a cada tipo de eletrolisador.

## 2.2 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Esta seção visa fazer revisão sucinta da extensa literatura disponível sobre motores de combustão, apontando funcionamento básico, conceitos envolvidos e características técnicas importantes para o presente trabalho.

### 2.2.1 Generalidades

Segundo Flores (2004), os motores de combustão interna se classificam por:

- Quanto ao Gás de admissão:
  - Ar (ciclo Diesel)
  - Ar/combustível (ciclo Otto)
- Quanto à ignição:
  - Ignição por centelha (ICE): usada nos motores ciclo Otto. Utilização de sistema elétrico para produzir centelha nas velas em momento oportuno, iniciando a queima de uma mistura ar-combustível no interior dos cilindros.
  - Ignição por Compressão (ICO): Usada nos motores Diesel, em que uma bomba injetora pulveriza o combustível no interior dos cilindros com ar aquecido e pressurizado, em condições que permitem a inflamação do diesel, obtendo-se, assim, o início da combustão.
- Quanto ao ciclo de trabalho (mecânico):
  - Motor 4 tempos: Utilizado na maioria dos motores de combustão interna.

- Motor 2 tempos: Utilizado em pequenos motores de aplicação agrícola e motocicletas.
- Quanto ao número de cilindros:
  - Monocilíndricos
  - Policilíndricos

O entendimento de tais classificações é importante ao presente trabalho, pois diferentes ajustes podem ser necessários, nos diferentes arranjos possíveis da aplicação sugerida para motores de combustão interna. Inúmeras outras classificações podem ser usadas em motores, porém as acima citadas satisfazem as necessidades da proposta deste estudo.

## **2.2.2 Princípios de Funcionamento**

Para melhor entendimento do funcionamento básico de um motor, faz-se necessária a análise dos elementos comuns de motores alternativos, que são aqueles cujo movimento de pistão é linear dentro de cilindros. A Figura 13 mostra os elementos comuns dos MCI, onde a presença de uma vela de ignição caracteriza tal motor como possuidor de um sistema de ignição por centelha, sendo este utilizado nos motores de ciclo Otto.

O mecanismo de biela-virabrequim tem por finalidade converter o movimento alternativo (linear) do pistão em movimento rotativo para transferência ao eixo principal do motor através da árvore de manivelas apresentada na Figura 14.

Os motores a quatro tempos têm seu ciclo completado em duas voltas da árvore de manivelas, ou em 4 cursos do êmbolo (pistão), de onde vem a denominação de “4 tempos”.

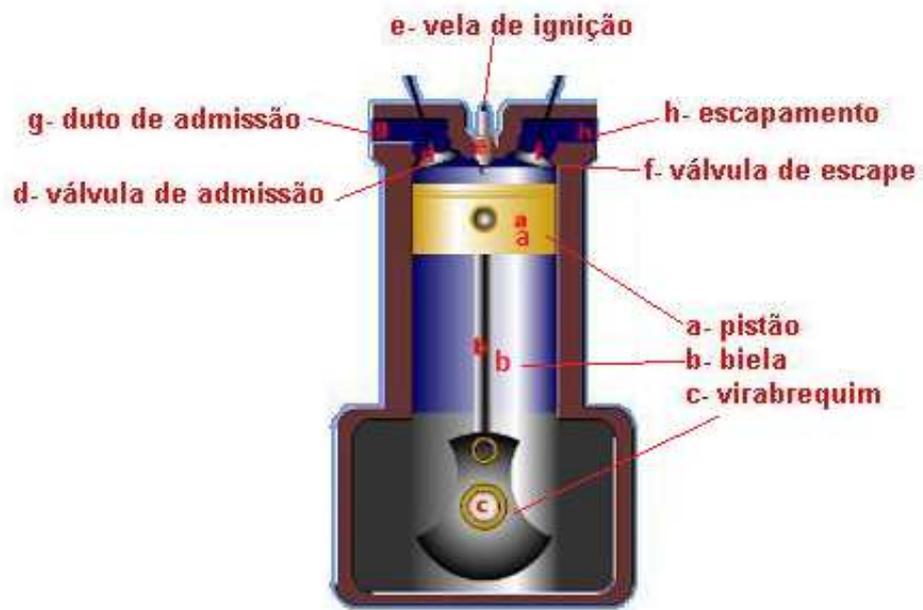


Figura 13: Elementos comuns aos motores alternativos. Fonte: <http://www.if.ufrgs.br/~leila/motor.htm>; acesso: 15/09/13

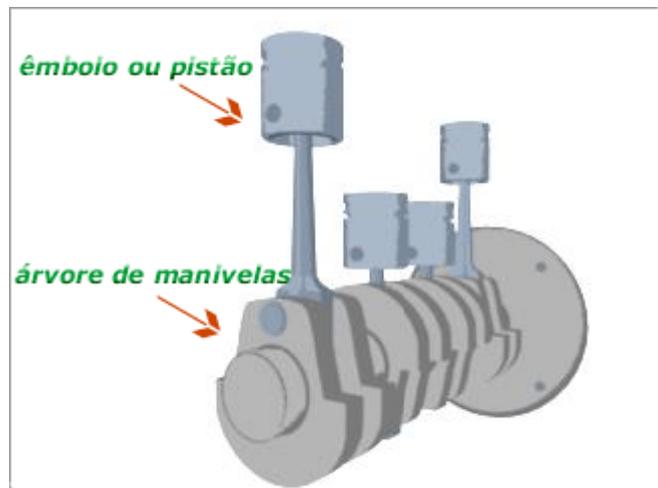


Figura 14: Árvore de Manivelas. Fonte: <http://rowalcentroautomotivo.com.br>; acesso: 15/09/13.

Os quatro tempos ou cursos podem ser divididos em:

- 1º Tempo – Curso de Admissão: No início do curso de admissão, o pistão encontra-se na posição mais alta, ou seja, próximo das válvulas, posição esta conhecida como Ponto Morto Superior (PMS). Ao descer, o êmbolo aspira a mistura ar/combustível para o interior do cilindro através da válvula de admissão por todo o seu curso até atingir o Ponto Morto Inferior, quando a válvula de admissão se fecha. Esse curso ocorre com meia-volta do eixo de manivelas (180°).
- 2º Tempo – Curso de Compressão: Com ambas as válvulas fechadas, o pistão se desloca subindo, comprimindo as cargas do cilindro (mistura ar/combustível) aumentando assim sua temperatura, até a posição de Ponto Morto Superior completando o primeiro giro (360°).
- 3º Tempo- Curso de Combustão e Expansão: Pouco antes do pistão atingir o Ponto Morto Superior no 2º Tempo – curso de Compressão, uma centelha na vela de ignição acontece dando início à queima da mistura ar/combustível. A energia liberada nessa combustão dá origem a uma força no êmbolo que o desloca do PMS ao PMI. Essa força é, então, transmitida à árvore de manivelas através dos elementos observados nas Figura 13 e Figura 14 (biela e virabrequim). Observe que ambas as válvulas continuam fechadas durante este tempo ou curso de Combustão e expansão que dura mais meia-volta ou 180°.
- 4º Tempo – Curso de Escape ou Descarga: O pistão se desloca do PMI ao PMS, expulsando os gases produtos da combustão através da válvula de escape. A válvula de admissão permanece fechada nessa etapa e a válvula de escape fecha quando o pistão chega ao PMS completando 720° ou duas voltas da árvore de manivelas. Dessa forma, o ciclo se completa e um novo ciclo se inicia (FLORES, 2004).

A Figura 15 ilustra as quatro etapas acima descritas:

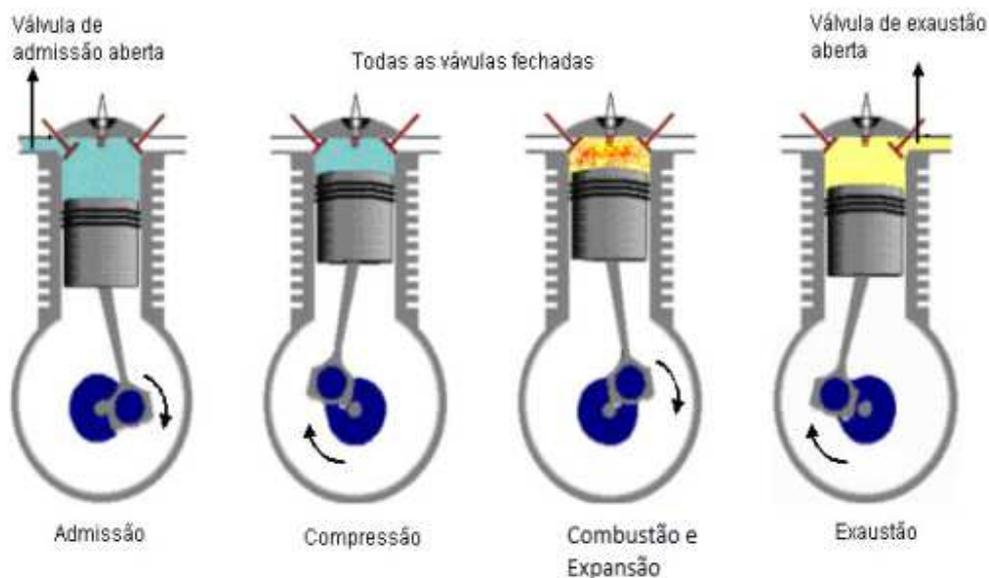


Figura 15: As 4 etapas de um motor de 4 tempos. (<http://rowalcentroautomotivo.com.br>; 15/09/2013).

Vale salientar que a produção de energia mecânica acontece somente durante o curso de combustão e expansão. Os outros três cursos são passivos, ou seja, absorvem energia.

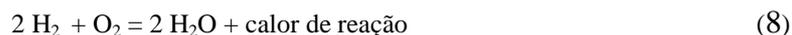
O ciclo básico descrito acima vale tanto para o motor ciclo “Otto” quanto para o motor ciclo “Diesel”. As diferenças básicas são a forma de se introduzir o combustível e a ignição da combustão. No caso do Diesel, a admissão é feita com aspiração de ar somente e, então, no momento oportuno, o diesel é injetado na câmara de combustão causando auto-ignição da mistura devido às elevadas temperaturas no interior do cilindro no fim do ciclo de admissão. Já no ciclo “Otto”, ocorre a admissão de uma mistura ar/combustível, que então é detonada através da ignição por centelha. A Tabela 2 resume tais diferenças:

Tabela 2: Diferenças Básicas entre motores Ciclo “Otto” e Ciclo “Diesel” (FLORES, 2004).

	Ciclo Otto	Ciclo Diesel
Tempo 1	Aspiração da mistura ar/combustível	Aspiração de ar
Tempo 2	Compressão da mistura	Compressão do ar
Tempo 3	Ignição da mistura por meio de faísca elétrica proveniente de uma vela; Expansão dos Gases	Injeção de combustível e auto-ignição da mistura
Tempo 4	Descarga dos produtos da combustão	Descarga dos produtos da combustão

### 2.2.3 O Processo de Combustão

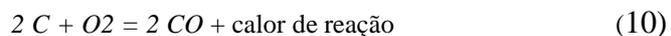
A combustão do combustível utilizado pode ser completa ou incompleta. A combustão completa tem lugar quando, na câmara de combustão, há o oxigênio do ar na quantidade suficiente para oxidação completa de todos os elementos combustíveis do combustível. No caso de combustíveis líquidos e de combustão completa, os elementos químicos combustíveis do combustível (carbono - *C*; hidrogênio - *H*; enxofre - *S*) reagem com o oxigênio do ar formando os produtos de combustão completa segundo as reações químicas seguintes (VLASSOV, 2008):



As equações acima são as equações de balanço material. O balanço material das reações químicas estabelece que a quantidade de reagentes seja igual à quantidade dos produtos de reação. Partindo do balanço material, calculam-se massas de reagentes e de produtos de reação. Da equação (7), temos que uma molécula do carbono reage com uma molécula do oxigênio (uma molécula do oxigênio  $O_2$  tem dois átomos) formando uma molécula do dióxido de carbono (uma molécula do dióxido do carbono  $CO_2$  tem três átomos).

Sendo assim, se existir o ar teoricamente necessário em uma combustão, esta será dita completa e teremos nos produtos da combustão somente  $CO_2$  (dióxido do carbono),  $H_2O$  (vapor da água),  $SO_2$  (dióxido do enxofre) e  $N_2$  (nitrogênio) que, nesse caso, é considerado um gás inerte e que não participa das reações químicas de combustão. Se tivermos na câmara de combustão ar em excesso, os produtos de combustão irão conter  $O_2$  (oxigênio). Dessa maneira, o excesso do ar na câmara de combustão pode ser determinado pela presença do oxigênio em produtos de combustão (em gases de escape). Em motores contemporâneos, no coletor de escape, é montada uma sonda  $\lambda$  (letra grega lambda) que determina, em gases de escape, a presença do oxigênio e, dessa forma, permite a correção da qualidade da mistura combustível se necessário.

Se for fornecida à câmara de combustão uma quantidade menor de ar do que a necessária, a combustão será dita incompleta. Considera-se que o hidrogênio e o enxofre são elementos mais ativos que o carbono e a falta de ar influem geralmente sobre a reação da queima do carbono. Assim, aparecerá, nos produtos de combustão, o CO (monóxido de carbono) seguindo à reação (VLASSOV, 2008):



O monóxido de carbono CO é um gás combustível, pois, reagindo com o oxigênio do ar, ele libera o calor, por isso, no caso de combustão incompleta, o aproveitamento do combustível e o rendimento do motor irão diminuir. Soma-se a esse aspecto negativo, o fato de o monóxido do carbono ser um gás tóxico e provocar a poluição do ambiente, colocando em risco a saúde das pessoas.. Na prática, quando o

motor funciona regularmente, na câmara de combustão, sempre existe ar em excesso para garantir a combustão completa de todos os elementos combustíveis. O regime de funcionamento do motor que gera maior quantidade de monóxido de carbono é a marcha lenta.

De forma prática, para queimar completamente um combustível, é necessário fornecer à câmara de combustão uma quantidade de ar maior que a teoricamente necessária (estequiométrica). Isso porque, caso seja admitido na câmara de combustão somente o volume de ar teórico, certos locais do volume da câmara de combustão apresentarão ar em falta, causando queima incompleta nesses locais.

Se na câmara de combustão houver grande excesso de ar (como no motor Diesel), teremos combustão completa, mas essa quantidade de ar em excesso diminuirá a temperatura na câmara de combustão, o que diminui o rendimento térmico do motor. O excesso de ar é caracterizado pelo coeficiente de excesso do ar –  $\lambda$ , e pode ser calculado pela seguinte fórmula (MARTINS, 2013):

$$\lambda = \frac{V_{ar}}{V_{ar}^{\circ}} \quad (11)$$

Onde:

$\lambda$  – Coeficiente de excesso de ar.

$V_{ar}$  – Volume real de ar, em  $\text{Nm}^3/\text{kg}$  para combustíveis líquidos ou  $\text{Nm}^3/\text{Nm}^3$  para combustíveis gasosos.

$V_{ar}^{\circ}$  - Volume mínimo de ar, em  $\text{Nm}^3$ , necessário para combustão completa (ar estequiométrico) .

Para cálculo de  $V_{ar}^{\circ}$ , podemos utilizar a equação (MARTINS, 2013):

$$V_{ar}^{\circ} = 106,7 \left( \frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right) \text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (12)$$

Onde as letras C, H, S e O indicam a porcentagem de cada elemento na composição do combustível e o sinal negativo para oxigênio mostra que quanto mais oxigênio estiver presente na composição, menos oxigênio do ar será necessário para realizar a mistura.

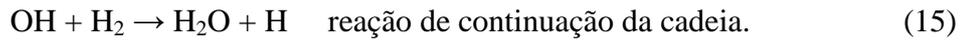
É válido lembrar a importância das reações cinéticas e de cadeia que acontecem no processo de combustão. Pode-se chamá-las de reações intermediárias, uma vez que as reações de balanço material se concretizam assim que tais reações se completam. As reações cinéticas ocorrem devido às colisões de partículas. Como exemplo, tem-se a colisão entre CO e H<sub>2</sub>O que, como produto, resulta em CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>. Porém a colisão de tais produtos pode voltar a formar as substâncias iniciais da reação CO e H<sub>2</sub>O, portanto escrevemos a reação da seguinte forma (VLASSOV, 2008):



O símbolo  $\leftrightarrow$  indica que reações inversas e diretas ocorrem simultaneamente. Da mesma forma, a concentração de produtos finais depende da temperatura final da reação e, quanto menor for a temperatura final, tanto menor será a concentração de substâncias iniciais.

Outras reações intermediárias são as reações de cadeia, mais rápidas que as cinéticas. Tais reações ocorrem com a presença de partículas (centros) ativas (os) e são geralmente bimoleculares com baixa energia de ativação. As partículas ativas são átomos de elemento (H ou O, por exemplo) ou substâncias instáveis recém-formadas como os radicais OH e HO<sub>2</sub>, além do peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Essas partículas ativas são detectadas através de análise espectral em chamas, e as altas concentrações desses centros são determinadas por formação de ramificações de cadeias de reações. Experimentalmente já se observou que, pelas reações de cadeia, queima-se CO e H<sub>2</sub> no meio de oxigênio. Para queima de H<sub>2</sub>, tem-se as seguintes reações intermediárias (VLASSOV, 2008):





A ruptura das cadeias ocorre próxima à parede relativamente fria dos cilindros, onde os radicais livres cedem energia e entram num estado estável, produzindo  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$  e  $\text{O}_2$  (VLASSOV, 2008).

Fica evidente que o processo de combustão que ocorre no interior de um MCI é complexo, e a adição de um gás combustível suplementar pode alterar não só a quantidade de energia química disponível a ser queimada mas também o modo como as reações intermediárias ocorrem.

## **2.3 A EVOLUÇÃO DO USO DE HIDROGÊNIO NO PROCESSO DE COMBUSTÃO**

Estudos a respeito da utilização dos gases oriundos de eletrólise em motores de combustão interna vêm sendo realizados desde 1918 quando Charles H. Frazer recebeu a primeira patente para um “hydro-oxygen generator” (FRAZER, 1918).

Essa tecnologia passou a ser mais conhecida na comunidade científica a partir de 1974, quando o artigo “On-Board Hydrogen Generator for a Partial Hydrogen Injection Internal Combustion Engine” publicado pela Sociedade de Engenheiros Automotivos dos EUA (Society of Automotive Engineers) (HOUSEMAN, et al., 1974), afirmou que a adição de hidrogênio, proveniente do processo de eletrólise, com geração em demanda, em motores de combustão interna é eficaz com qualquer combustível fóssil

(diesel, gasolina, propano, gás natural, etc.) ou com biocombustíveis (biodiesel, etanol, etc.).

Uma nota técnica da NASA (CASSIDY, 1977), produzida pelo Lewis Research Center, apresentou excelentes resultados sobre o desempenho de motor funcionando com mistura hidrogênio-gasolina como combustível. Tal estudo defende a idéia de que, entre outros efeitos mais sutis, a presença de hidrogênio altera os estágios iniciais da sucessão dinâmica de eventos na combustão, alterando o processo químico cinético que se segue. Ou seja, a presença do hidrogênio altera o comportamento das reações de cadeia durante o processo de combustão, e o resultado final é o aumento da eficiência adiabática do motor, que, por sua vez, resulta na diminuição do consumo de combustível, diminuição das emissões, melhores resultados de potência e torque, como também menores gastos de manutenção devido à limpeza de resíduos de hidrocarbonetos no interior da câmara de combustão.

Ainda no ano de 1977 e em 1978, Yull Brown conseguiu publicações de patentes referentes ao uso de gás produto de eletrólise em uma tocha para fins de solda (BROWN, et al., 1978), (BROWN, 1977). Com a utilização desse aparato, propriedades caloríficas distintas das encontradas na queima da mistura hidrogênio-oxigênio foram observadas. Inicia-se, assim, o debate a respeito das diferentes características apresentadas pela mistura de hidrogênio e oxigênio e pelo Gás Produto de Eletrólise (GPE), sem prévia separação dos produtos. Segundo Brown, a temperatura de chama atinge valores não esperados, sendo capaz de derreter tungstênio e de soldar materiais sem uso de fluxo ou qualquer substância auxiliar. Porém, a temperatura medida da chama queimando livremente na atmosfera é de aproximadamente 150 graus Celsius apenas. A partir de então, alguns trabalhos científicos citam esse gás como “Brown’s gas” em homenagem ao inventor.

No fim da década de 90 e nos primeiros anos do século XXI, trabalhos realizados paralelamente ao meio acadêmico começaram a circular na internet incentivando inventores do mundo inteiro a analisarem as possibilidades de economia de combustível em automóveis através do uso de gases ricos em Hidrogênio, produzidos

através de sistemas eletrolisadores. Nomes como “hydrogen generator”, “hydroxy booster”, “hho”, “Brown’s gas”, “gás rico em hidrogênio” e “gás de alta energia” encabeçam a lista de documentação paralela a respeito desse assunto. Desde então, vasta experimentação prática está disponível, porém de forma não unificada e não oficial.

Nesse período, estudos relacionados à adição de hidrogênio no processo de combustão em motores alimentados com combustível fóssil foram publicados (CONTE, et al., 2004; DULGER, et al., 2000; HACOEN, et al., 1989; BAUER, et al., 2001a; D'ANDREAA, et al., 2004; AKANSU, et al., 2004; DAS, 1996). A maioria desses estudos constatou aumento de eficiência adiabática e redução nos níveis de emissões de gases de efeito estufa com adição de hidrogênio à mistura combustível.

Em adição, diversos estudos analisaram diferentes regimes de operação com adição de gás combustível suplementar. Dentre os principais objetos de estudo, destacam-se: variação de rotação, variação de razão de excesso de ar, variação de tempo de ignição de centelha e diferentes taxas de gás suplementar adicionado ao combustível primário (MA, et al., 2008; WANG, et al., 2010a; JI, et al., 2009b; BARI, et al., 2012; JI, et al., 2009a; SOBERANIS, et al., 2012). Sendo assim, torna-se evidente que um ajuste adequado dos índices de ar, hidrogênio e hidrocarbonetos na mistura, assim como um ajuste do tempo de ignição da centelha devem ser observados para um bom aproveitamento da aplicação.

Santilli (2006), cita o termo “HHO”, pela primeira vez, em publicações dentro da comunidade acadêmica e traz um novo modelo de arranjo molecular proposto para explicar as propriedades inusitadas apresentadas. Com o mesmo intuito, Eckman (2010) trata de experimentações realizadas com a queima do gás produto de eletrólise, referenciado por ele como Brown’s Gas, apontando características que diferem da queima de uma mistura estequiométrica de hidrogênio e oxigênio provenientes de sistemas de armazenamento.

Além disso, o uso da chama de GPE obteve sucesso em aplicações referentes ao tratamento de resíduos de asbestos, vitrificando-os e inibindo a suspensão no ar de micropartículas nocivas à saúde humana (MIN, et al., 2008).

Inúmeras publicações recentes apontam os benefícios possíveis da aplicação de GPE em motores de combustão interna, tanto veiculares quanto estacionários, para diversos tipos de combustíveis (AL-ROUSAN, 2010; YILMAZ, et al., 2012; LEE, et al., 2010; GOLDMAN, et al., 2010; ZANG, et al., 2010; SOPENA, et al., 2010). A ideia de produção em demanda, “on board”, e sem separação dos produtos da eletrólise, elimina importantes barreiras de desenvolvimento recorrentes ao difícil armazenamento do hidrogênio e gastos energéticos da produção centralizada.

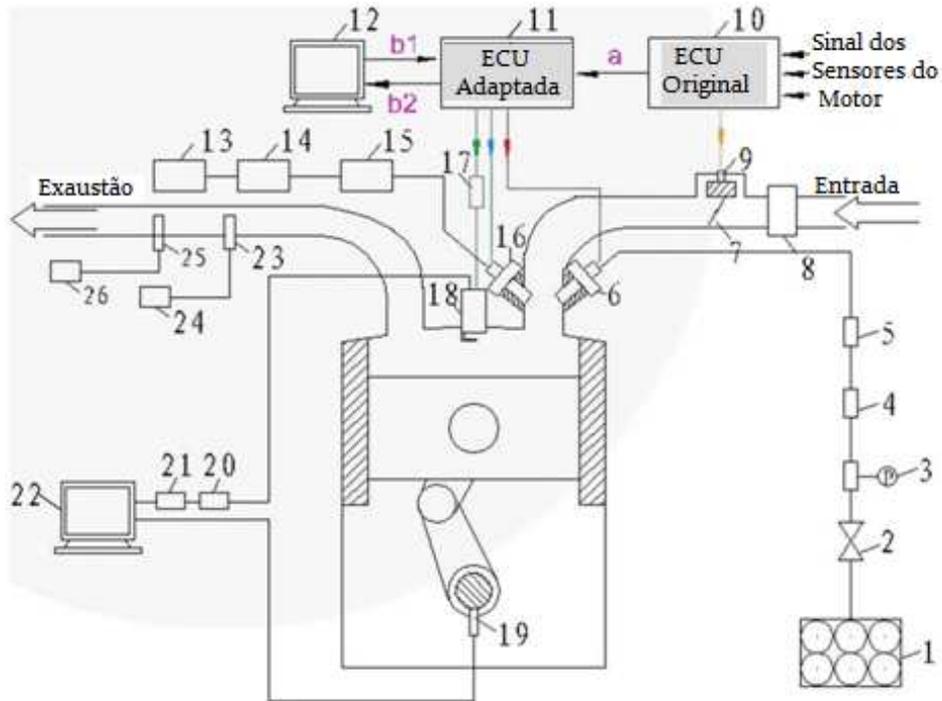
O hidrogênio possui algumas características particulares que beneficiam a eficiência do motor e a performance de emissões. Seu coeficiente de difusão no ar é aproximadamente seis vezes maior que o da gasolina, o que melhora o processo de mistura combustível-ar, dessa forma melhorando também a homogeneidade da mistura. Além disso, o seu amplo limite de inflamabilidade no ar (4,1 – 75%) , muito superior ao da gasolina, permite uma operação eficiente do motor com altas razões de excesso de ar. A estratégia de motores, se propriamente controlados, operando em regime de alta razão de excesso de ar mostra-se eficaz no aumento de eficiência térmica do motor (JI, et al., 2009a).

O termo “queima pobre” refere-se a uma maior concentração de ar na mistura ar-combustível do que a razão estequiométrica. O aumento desse limite de operação verifica-se como método efetivo de melhora de eficiência térmica, uma vez que a presença de hidrogênio no processo permite a combustão completa em um espectro mais amplo de possibilidades referentes ao excesso de ar na mistura.

O objetivo comum das análises foi injetar hidrogênio na câmara de combustão juntamente com o combustível principal, porém diferentes metodologias foram aplicadas em uma série de estudos realizados referentes à adição de hidrogênio no processo de combustão, o que torna difícil a padronização dos resultados. As diferenças principais entre elas se dão no processo de disponibilização do hidrogênio para uso, e no método utilizado para se levar o combustível suplementar à câmara de combustão (hidrogênio injetado direto na câmara de combustão ou induzido junto com o ar).

### 2.3.1 Hidrogênio Proveniente de Sistemas de Armazenamento

Na Figura 16, pode-se observar um exemplo de arranjo esquemático para experimentação com adição de hidrogênio em MCI:



1. Cilindros de hidrogênio 2. Válvula de ajuste de pressão do hidrogenio 3. Medidor de pressão do hidrogenio 4. Medidor de fluxo de massa de hidrogênio 5. Dispositivo de segurança corta-chama 6. Injetor de hidrogênio 7. Válvula reguladora 8. Medidor de fluxo de massa de ar 9. Válvula de ponto morto 10. Unidade de Controle Eletrônico (ECU) Original 11. ECU Desenvolvido na aplicação 12. Computador de calibração 13. Tanque de combustível 14. Medidor de massa de combustível 15. Bomba de combustível 16. Injetor de combustível 17. Módulo de ignição 18. Transdutor de pressão e vela 19. Sensor Óptico 20. Amplificador de carga 21. Conversor A/D 22. Analisador de combustão 23. Sensor de O2 24. Analisador Ar-combustível 25. Amostra de emissões 26. MEXA-7100 – analisador de emissões.

Figura 16: Diagrama esquemático de inserção de hidrogênio como combustível suplementar.

Fonte: traduzido de (WANG, et al., 2010a)

Sistemas de injeção de hidrogênio com alimentação proveniente de cilindros pressurizados podem ser acoplados à câmara de combustão, permitindo o controle dos níveis de adição do gás suplementar.

Esse tipo de modificação permite a adição de quatro injetores de hidrogênio colocados próximos à valvula de admissão. Dessa forma, o hidrogênio pôde ser injetado de maneira rápida à camara de combustão, evitando assim o fenômeno de retorno de chama. O desenvolvimento de um circuito eletrônico de controle (ECU), a fim de se ajustar o tempo de injeção de hidrogênio, faz-se necessário para estudo dos diferentes níveis de injeção de hidrogênio e do controle da razão de excesso de ar.

### Pressão Média Efetiva e Eficiência Térmica

**Bmep** (Brake mean effective pressure), ou pressão média efetiva, é um parâmetro amplamente utilizado na comparação de desempenho de motores. Indica a pressão média que, se imposta aos pistões uniformemente ao longo de todo deslocamento destes, produziria a potência mecânica de saída medida. As perdas referentes ao atrito e bombeamento já estão inclusas por sua definição. A Figura 17 ilustra resultados obtidos através de experimento realizado por Ji, et al (2009a):

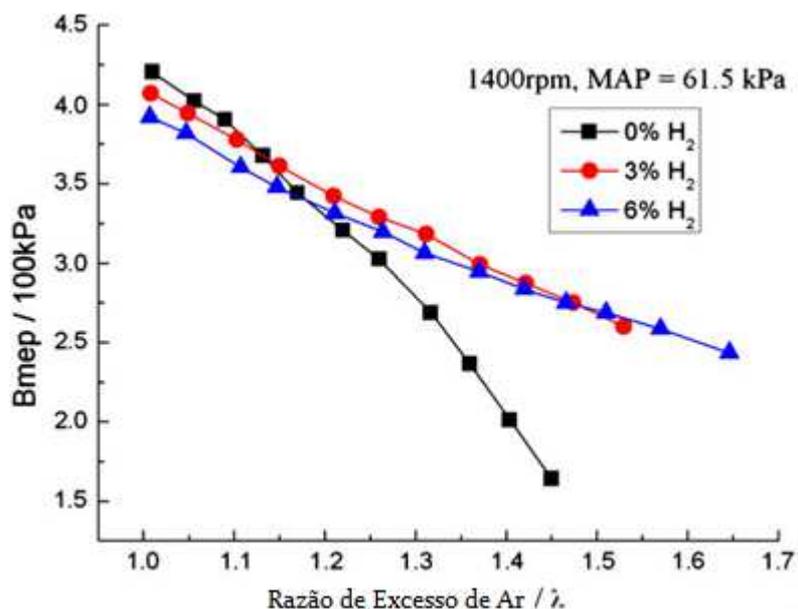


Figura 17: Pressão média efetiva vs razão de excesso de ar para diferentes concentrações de hidrogênio na mistura. Fonte: traduzido de (JI, et al., 2009a)

Nesse experimento foi utilizado um motor Hyudai gasolina, 1.6L, 80 cv, quatro cilindros operando a 1400 rpm. A duração de injeção de hidrogênio foi ajustada de acordo com o fluxo de admissão de ar para variar a razão volumétrica de hidrogênio entre 0%, 3% e 6% do total de gases admitidos ( $H_2 + ar$ ). Para cada razão volumétrica de hidrogênio, a admissão de gasolina foi gradualmente diminuída a fim de operar o motor com maiores valores de excesso de ar, trabalhando, assim, em regime de alta razão de excesso de ar. Nenhuma modificação referente ao tempo de ignição de centelha foi efetuado nesse teste, sendo assim mantido o valor de  $22^\circ$  antes do Ponto Morto Superior.

Observa-se que a *Bmep* cai quando se adiciona hidrogênio com o motor operando próximo às condições estequiométricas, porém uma melhor resposta acontece quando o motor opera em regime de queima pobre. A queda se deve ao fato de que menos ar está presente na mistura, uma vez que o volume total de gás succionado para a câmara de combustão se mantém fixo, e hidrogênio é então adicionado, tornando a mistura mais rica do que deveria no ponto de operação próximo ao estequiométrico (JI, et al., 2009a).

Outra causa provável da queda da *Bmep* é o tempo de ignição da centelha impróprio, pois a velocidade de propagação da chama de hidrogênio, como mostrado na Tabela 3, é aproximadamente cinco vezes maior do que a da gasolina, sendo então necessário o retardo da ignição para se conseguir um melhor aproveitamento (ZANG, et al., 2010).

Tabela 3: Propriedades: Hidrogênio e gasolina. Traduzido de (ZANG, et al., 2010)

Propriedades	Gasolina	Hidrogênio
Temperatura de auto-ignição (K)	533-733	858
Energia mínima de ignição (mJ)	0.24	0.02
Limites de flamabilidade (% volume no ar)	1.4-7.6	4.0-75
Razão estequiométrica ar-combustível (base mássica)	14.6	34.3
Velocidade de chama (cm/s)	37-43	265-325
Difusibilidade no ar (cm <sup>2</sup> /s)	0.08	0.63

Entretanto, para condições de operação com alta razão de excesso de ar, a adição de hidrogênio se faz justificável. Em vez da abrupta queda de **Bmep** para razão

de excesso de ar superiores, como ocorre em operação com gasolina pura, um extendimento da capacidade de operação em regime de queima pobre se verifica. Tal comportamento pode ser explicado pelas propriedades do hidrogênio como maior velocidade de chama e seu amplo limite de flamabilidade no ar.

A eficiência térmica é crucial na avaliação do desempenho do motor e pode ser otimizada através de uma melhora do sistema de combustão ou das propriedades do combustível. A Figura 18 mostra a eficiência térmica do motor.

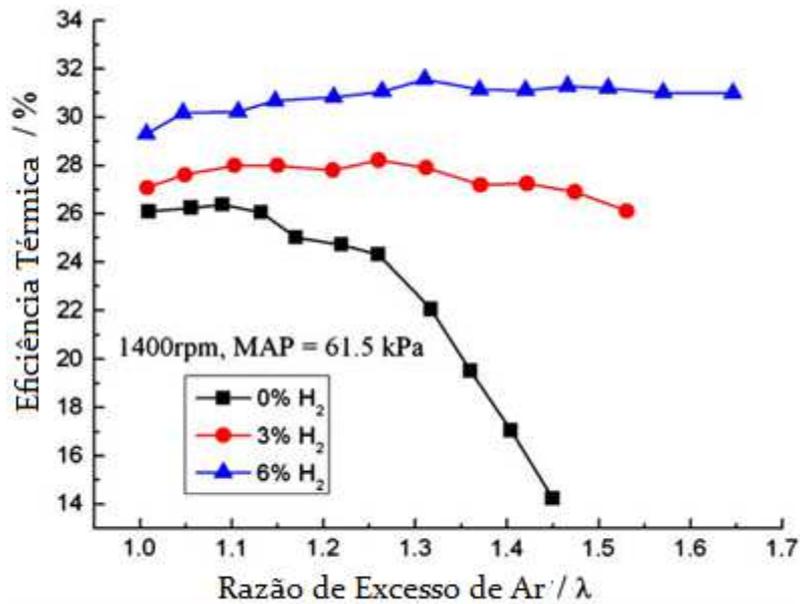


Figura 18: Eficiência Térmica do motor vs razão de excesso de ar para diferentes concentrações de hidrogênio na mistura. Fonte: traduzido de (JI, et al., 2009a)

Observa-se que a eficiência é maior com a adição de hidrogênio, especialmente em condições de queima pobre. A queda abrupta de eficiência térmica devido ao aumento da razão ar-combustível é evitada com a presença de hidrogênio, demonstrando assim um aumento efetivo da capacidade de operação em regime de queima pobre do motor. O valor de pico atingido para o motor original foi de 26.4% com  $\lambda=1.09$ , 28.2% com  $\lambda=1.26$  para adição de 3% hidrogênio e 31.6% com  $\lambda=1.31$  para 6% de adição de hidrogênio.

Como resultado, motores alimentados com enriquecimento de hidrogênio podem produzir uma eficiência térmica quase constante em um amplo espectro de razões

de excesso de ar, se comparados a àqueles alimentados com combustível puro. A ampla flamabilidade no ar e a queima rápida do hidrogênio são os fatores que contribuem para uma queima mais completa e rápida da mistura ar-combustível-hidrogênio, mesmo em regime de queima pobre.

Para um motor alimentado convencionalmente, uma alta eficiência da combustão acontece próximo aos valores estequiométricos numa limitada variação de excesso de ar. Assim, com o aumento da razão de excesso de ar, a combustão rapidamente se torna incompleta, produzindo menos potência e menor eficiência térmica. Para motores enriquecidos com hidrogênio, um aumento da capacidade de queima pobre do motor permite uma ampla variação do excesso de ar, muito mais ampla do que a em regime de alimentação convencional.

#### Pressões internas de cilindro, desenvolvimento e propagação de chama

Pode-se analisar a alteração de comportamento do processo de combustão através das pressões internas de cilindro para todo o deslocamento deste. Para a determinação de instantes durante a queima dos gases, a referência normalmente utilizada é o ângulo de eixo de manivelas.

A Figura 19 ilustra resultados obtidos por Ji et al, (2009):

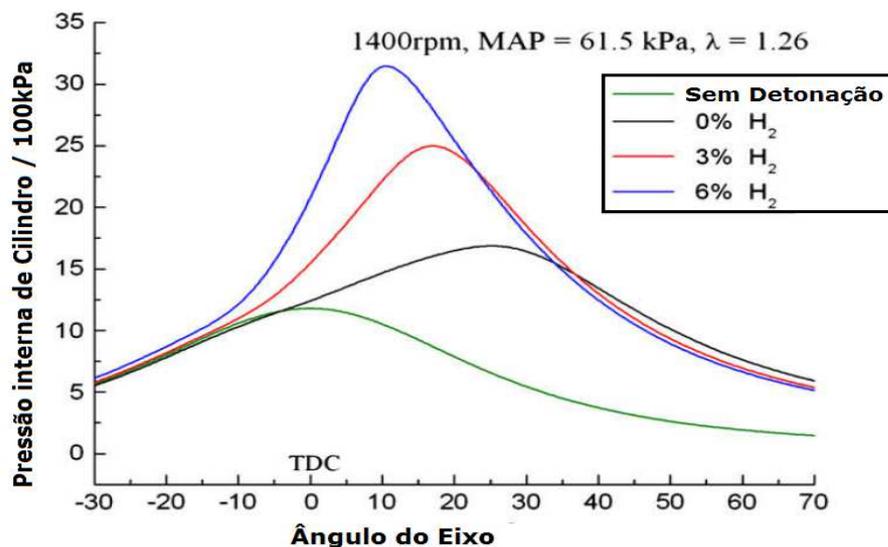


Figura 19: Pressão Interna de Cilindro versus Deslocamento do pistão. Fonte: traduzido de (JI, et al., 2009a)

Observa-se, na Figura 19, que devido à alta temperatura e velocidade de chama do hidrogênio, a pressão de pico do cilindro aumenta à medida que se adiciona mais combustível suplementar. Adicionalmente, após o pico, a pressão interna cai de forma mais rápida indicando um menor tempo de pós-combustão. Dessa forma, uma menor quantidade de perdas de exaustão ocorre devido ao reduzido volume de combustível queimando no ciclo de expansão.

Desenvolvimento e propagação de chama são dois fatores de importante relevância para a eficiência térmica de um motor a combustão interna. A duração do desenvolvimento de chama (nos gráficos referenciado como CA 0-10/°CA) é definida como a duração do ângulo de manivela, desde o momento da centelha de ignição até a liberação dos primeiros 10% de calor proveniente da mistura a ser queimada. A duração de propagação de chama (CA 10-90/°CA) é definida como a duração do ângulo do eixo de manivelas para liberação de 10 a 90% do total de calor da mistura a ser queimada.

A Figura 20 ilustra duração de desenvolvimento de chama em função da razão volumétrica de hidrogênio adicionado, definida como (WANG, et al., 2010a):

$$\alpha_{H_2} = V_{H_2} / (V_{H_2} + V_{ar}) \times 100\% \quad (18)$$

Onde:

$\alpha_{H_2}$  – Razão Volumétrica de Hidrogênio.

$V_{H_2}$  – Volume de hidrogênio adicionado (m<sup>3</sup>).

$V_{ar}$  – Volume de ar aspirado (m<sup>3</sup>).

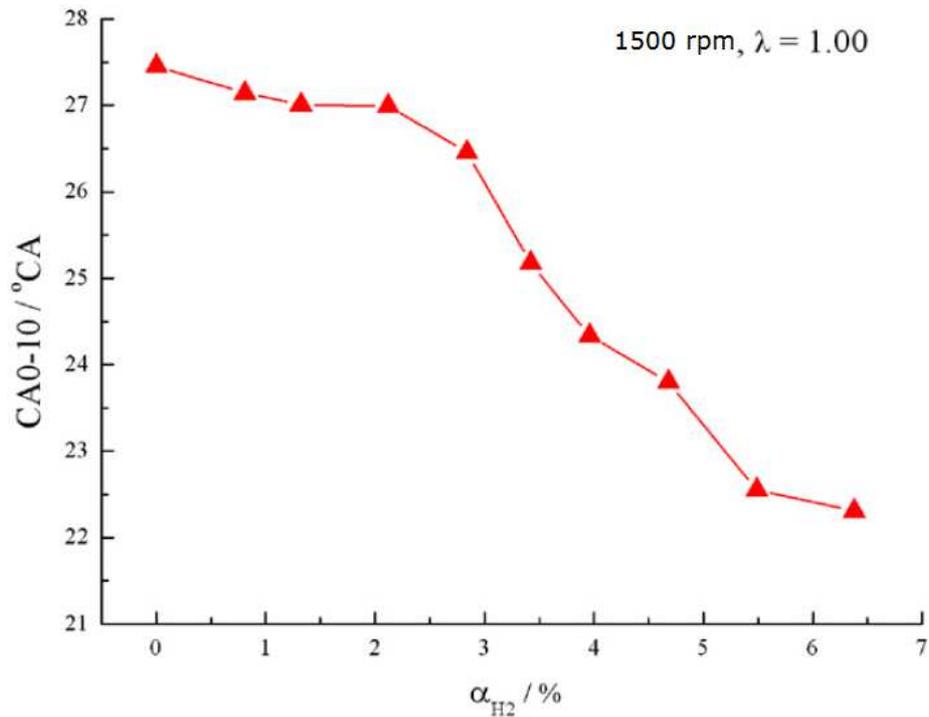


Figura 20: Desenvolvimento de chama X Razão volumétrica de hidrogênio adicionado  $\alpha_{H_2}$ . Fonte: (WANG, et al., 2010a).

O desenvolvimento de chama diminui rapidamente com o aumento de adição de hidrogênio, significando que o tempo de ignição da mistura é significativamente reduzido e que a alimentação enriquecida de hidrogênio possibilita uma queima mais rápida e fácil da mistura, beneficiando assim uma combustão mais rápida e completa do processo. Além disso, a baixa energia de ignição do hidrogênio possibilita uma ignição mais fácil da mistura hidrogênio-combustível-ar, resultando em valores menores de desenvolvimento de chama (CA 0-10/°CA) a medida que se insere hidrogênio na mistura.

A Figura 21 ilustra a duração de *desenvolvimento* de chama em função da quantidade de hidrogênio adicionado para diferentes rotações próximas à rotação de marcha lenta:

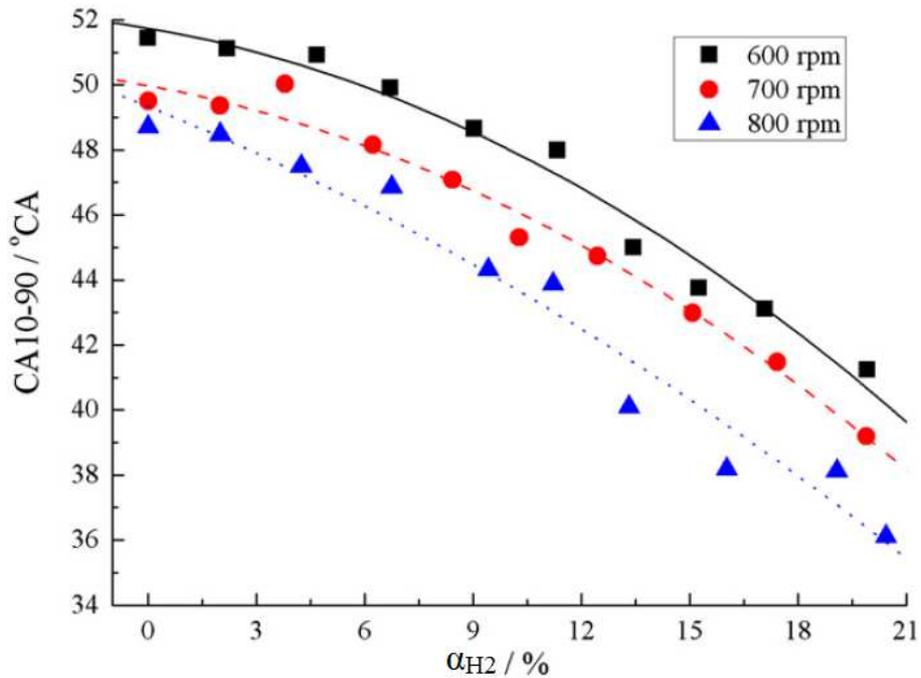


Figura 21: Propagação de chama X Razão volumétrica de hidrogênio adicionado  $\alpha_{H_2}$ .

Fonte: (WANG, et al., 2010b).

A duração da *propagação* de chama é diminuída com o crescimento da razão volumétrica de hidrogênio na mistura para todas rotações referidas. Desse modo, a menor duração de propagação também colabora para que menos combustível seja queimado durante o ciclo de expansão do cilindro, reduzindo ainda mais significativamente as perdas no processo de exaustão.

Outros estudos também mostram que a adição de hidrogênio ajuda na formação de radicais OH e H no cilindro, o que melhora a cadeia de reações da combustão, reduzindo o tempo de desenvolvimento e de propagação de chama (CONTE, et al., 2004).

Uma vez que a adição de hidrogênio altera as durações de desenvolvimento e propagação de chama, o tempo de ignição de centelha terá grande influência no ajuste da operação adequada do motor com adição de combustível suplementar.

A Figura 22 mostra a influência do tempo de ignição de centelha, referenciada como ângulo do eixo de manivelas anterior ao ponto morto superior (°CA

APMS) na eficiência térmica ao se adicionar hidrogênio no processo de combustão de um MCI a gasolina para diferentes razões de excesso de ar.

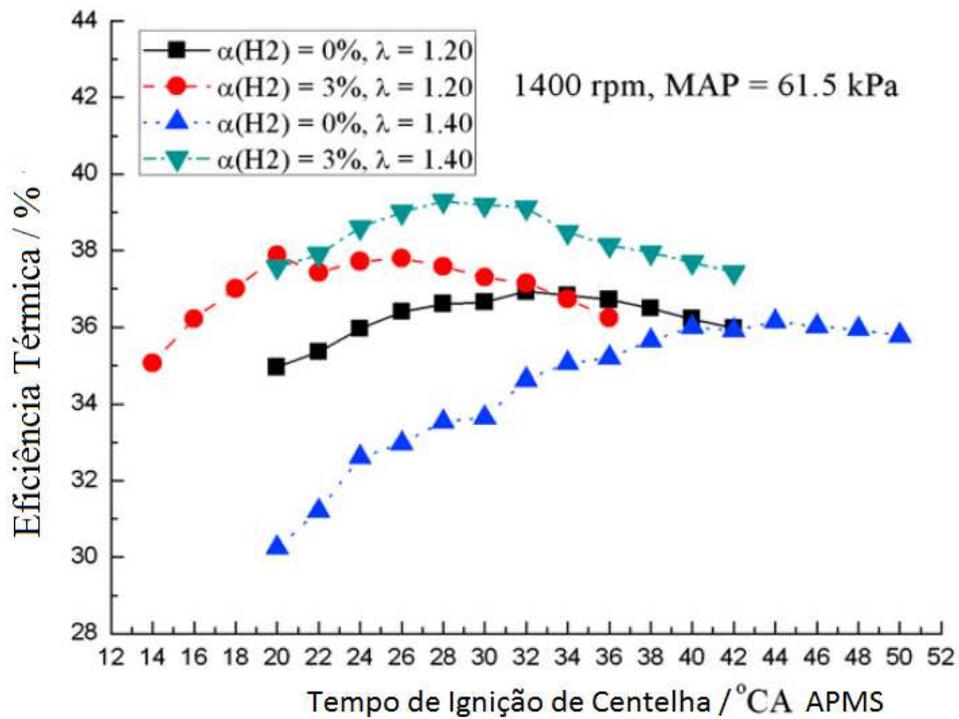


Figura 22: Influência de tempo de ignição de centelha. Fonte: Traduzido de (ZANG, et al., 2010).

Observa-se que, para operações com mesma razão de excesso de ar, ao se inserir hidrogênio, o ponto de ignição para melhor eficiência térmica está adiantado (mais próximo do PMS) em relação à operação sem combustível suplementar, e que, nenhuma mudança de ponto de ignição ao se adicionar hidrogênio pode significar queda de eficiência. Adicionalmente, uma maior razão de excesso de ar possibilita melhor eficiência para operação com uso de hidrogênio.

### Concentração de gases de exaustão

CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e HC (sobra de hidrocarbonetos provenientes de combustão incompleta) são os principais gases analisados no que diz respeito a poluentes provenientes do processo de combustão interna.

A Figura 23 mostra a concentração de HC nos gases de exaustão em função da razão de excesso de ar:

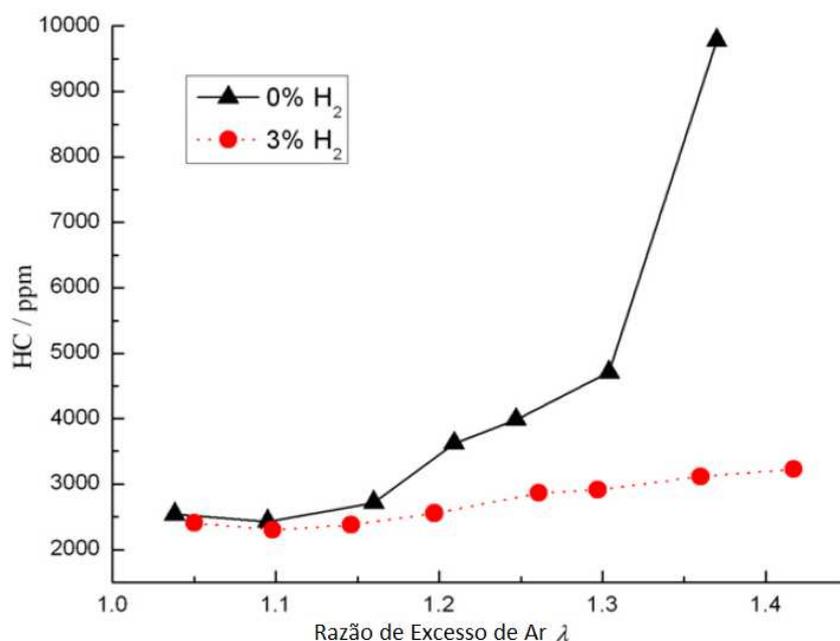


Figura 23: Concentração de HC X Razão de excesso de ar. Fonte: traduzido de (JI, et al., 2009b)

Observa-se, na Figura 23, que com uma razão de excesso de ar de aproximadamente 1.3, no caso de motor operando somente a gasolina, um aumento agudo de emissões de HC ocorre por conta da incapacidade da mistura de proporcionar combustão completa devido à grande quantidade de ar. Com o acréscimo de hidrogênio, a possibilidade de uma queima completa, mesmo em regime de razão de excesso de ar superior, acarreta menores níveis de HC na exaustão. A ampla faixa de inflamabilidade do hidrogênio auxilia na queima, permitindo que a queima completa ocorra mesmo com um alto índice de ar na mistura.

Os níveis de CO e CO<sub>2</sub>, como observados nas Figura 24 e Figura 25, diminuem com o aumento da concentração de hidrogênio na mistura ar-combustível. A razão para tal é que o hidrogênio é um combustível livre de carbono, e, assim, sua combustão não emite partículas de carbono oxidado como produto. Além disso, à medida que se aumenta a concentração de ar da mistura, menores níveis de carbono são introduzidos na câmara de combustão e menores níveis do mesmo na exaustão são encontrados.

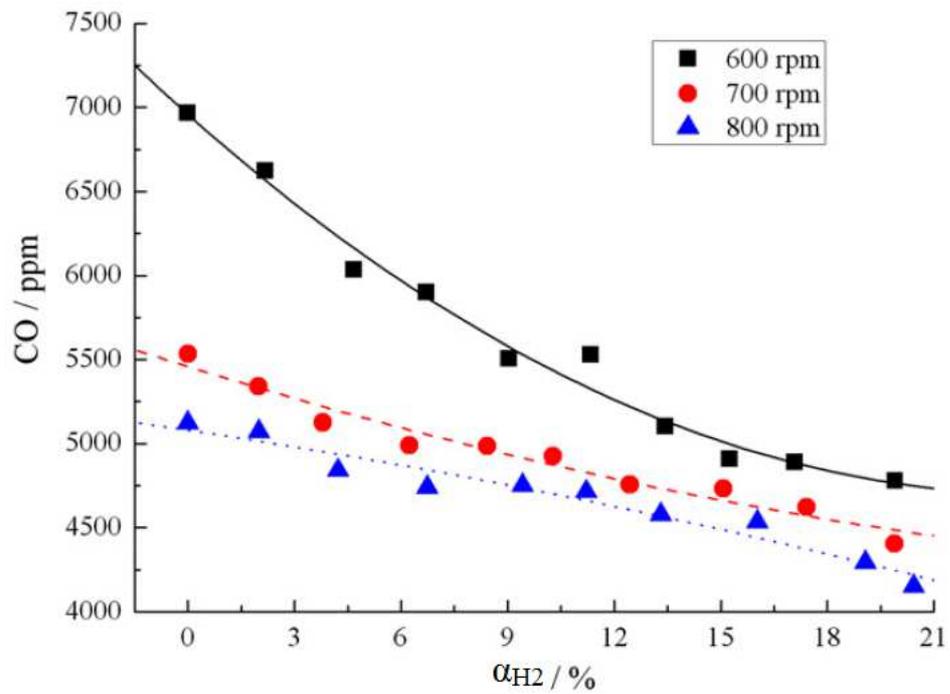


Figura 24: Concentração de CO X Razão volumétrica de hidrogênio adicionado  $\alpha_{H_2}$ . Fonte: (WANG, et al., 2010b).

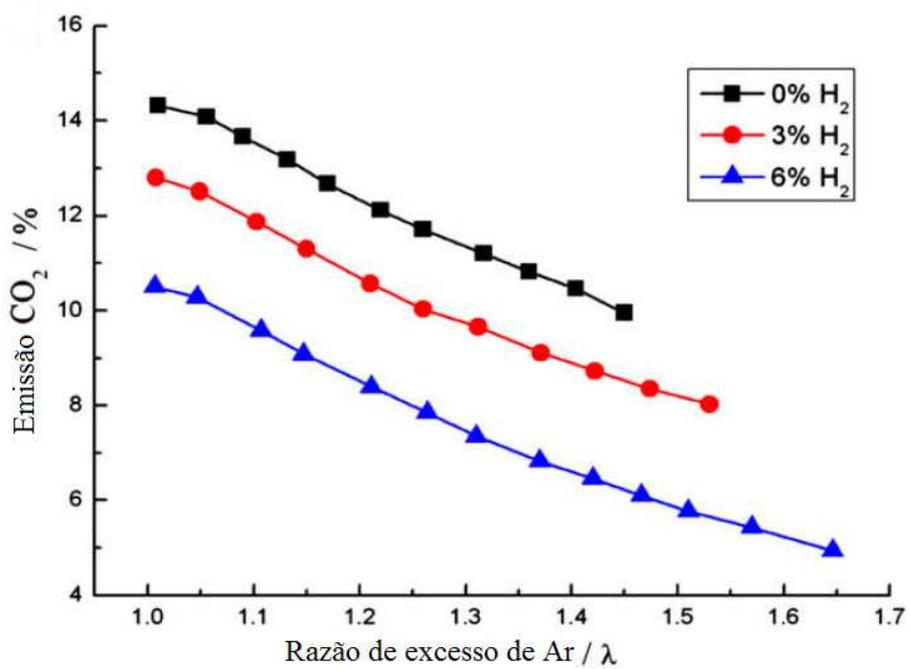


Figura 25: Emissões de  $CO_2$ . Fonte: traduzido de (JI, et al., 2009a)

Emissões de NO<sub>x</sub> dependem da concentração de oxigênio e da temperatura nos cilindros. Com maiores níveis de adição de hidrogênio, verifica-se que um aumento nos níveis de NO<sub>x</sub> acontecem próximo ao ponto estequiométrico de operação. A maior temperatura devido à grande concentração de hidrogênio na mistura se mostra como fator provável da oxidação exagerada de nitrogênio. Apesar disso, níveis aceitáveis de NO<sub>x</sub> são encontrados para  $\lambda > 1.4$  (razão ar combustível), demonstrando mais uma vez que a adição de hidrogênio possibilita uma operação do motor em regime de queima pobre, o que possibilita um nível aceitável de emissões de NO<sub>x</sub> (CASSIDY, 1977).

É importante frisar que o ponto de ignição da centelha tem grande influência no comportamento da combustão para diferentes níveis de adição de hidrogênio. Devido à diferente velocidade de propagação de chama de hidrogênio, um ajuste fino do tempo de ignição pode trazer relevantes mudanças no desempenho e emissões do motor. O devido ajuste para o tempo ótimo de ignição após adição de hidrogênio, que varia de acordo com a quantidade de combustível suplementar injetada, resulta em menor emissão de NO<sub>x</sub> do que o motor operando somente a gasolina e regulado para esse fim (ZANG, et al., 2010).

A Figura 26 ilustra influência do tempo de ignição em relação à concentração de NO<sub>x</sub> na exaustão:

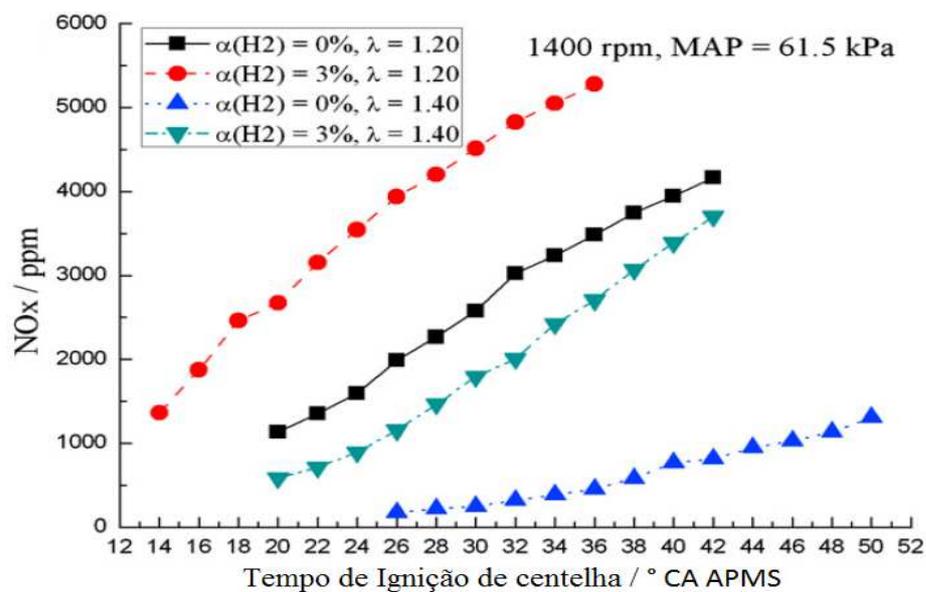


Figura 26: Concentração de NO<sub>x</sub> X Tempo de ignição de centelha Fonte: Traduzido de (ZANG, et al., 2010).

Estudos sobre adição de pequenos volumes de hidrogênio na combustão em motores alimentados por diferentes combustíveis indicam resultados semelhantes em aumento de eficiência, assim como na redução de emissão de poluentes. Os principais combustíveis analisados em publicações encontradas foram: Metano (AKANSU, et al., 2007; BAUER, et al., 2001a; BAUER, et al., 2001b); Gás Natural (AKANSU, et al., 2004; HUANG, et al., 2007 MA, et al., 2008; OZCAN, 2012); e Diesel (LILIK, et al., 2010; SARAVENAN, et al., 2008).

### **2.3.2 Uso Gás Combustível Suplementar Imediatamente após sua Produção**

O uso de hidrogênio puro possibilitou realização de estudos do comportamento da combustão com diferentes níveis de adição de combustível suplementar, permitindo assim uma base teórica para os benefícios da presença de hidrogênio na combustão. Porém, as dificuldades práticas referentes ao armazenamento e transporte tornam atraente o estudo do uso de gás rico em hidrogênio como combustível suplementar logo após sua produção.

No caso da eletrólise, a energia elétrica é necessária como entrada para o processo de geração do gás rico em hidrogênio que, quando inserido no processo de combustão, gera economia de combustível fóssil e redução nos níveis de emissões poluentes. Essa substituição de insumos energéticos entregues ao processo de combustão se faz amplamente justificável no cenário de matriz energética elétrica limpa como o encontrado no Brasil. Porém níveis aceitáveis de eficiência energética no processo de eletrólise devem ser alcançados.

Uma grande discussão na comunidade científica vem acontecendo a respeito do processo de eletrólise. Níveis superiores a aqueles definidos por Faraday com relação à produção de gases combustíveis provenientes do processo vêm sendo alcançados. Através de diferentes arranjos entre solução aquosa de eletrólito e eletrodos, assim como eficiente manipulação da energia elétrica entregue ao processo, se torna possível atingir níveis até sete vezes maiores que aqueles mencionados por Faraday (GOLDMAN, et al., 2010).

Diferentes arranjos de eletrolisadores, com variedade de conexões entre células eletrolíticas, podem resultar em diferentes rendimentos energéticos referentes ao processo de eletrólise.

As Figura 27 e Figura 28 ilustram as células e arranjos utilizados em experimento na Universidade da Jordânia, (AL-ROUSAN, 2010). Para a construção da célula “B”, foram utilizadas placas de um metro quadrado de aço inoxidável. Para a célula “C”, as dimensões foram diminuídas pela metade e interessantes resultados foram obtidos:

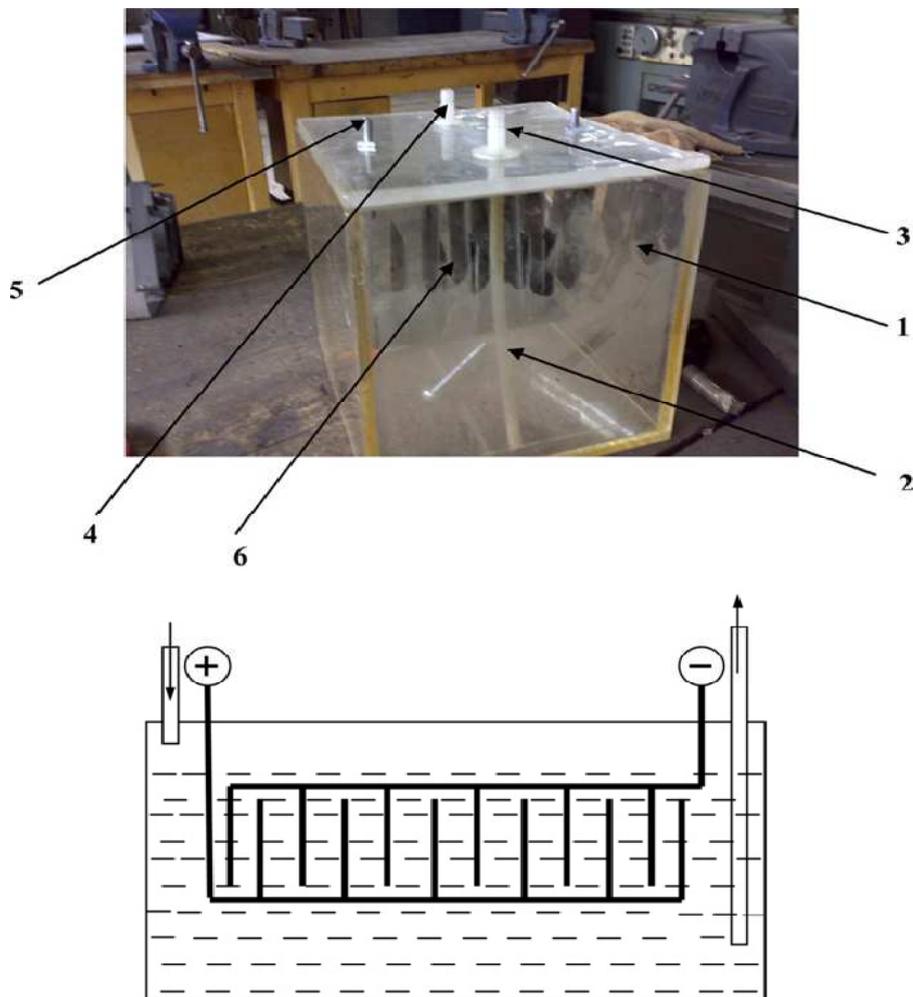


Figura 27: Foto e arranjo da Célula “B” – (1. Caixa de fibra de vidro; 2. Tubo para entrada de ar; 3. Válvula de entrada; 4. Válvula de saída; 5. conexão de eletrodo; 6. Placas de aço) (AL-ROUSAN, 2010).



Figura 28: Foto da célula “C” (AL-ROUSAN, 2010).

Figura 29 e Figura 30 mostram, respectivamente, o consumo específico de gasolina do motor HONDA G200 (197 cm<sup>3</sup>) utilizado na aplicação e a eficiência Térmica levantada com auxílio de ensaio realizado um alternador acoplado ao motor (AL-ROUSAN, 2010).

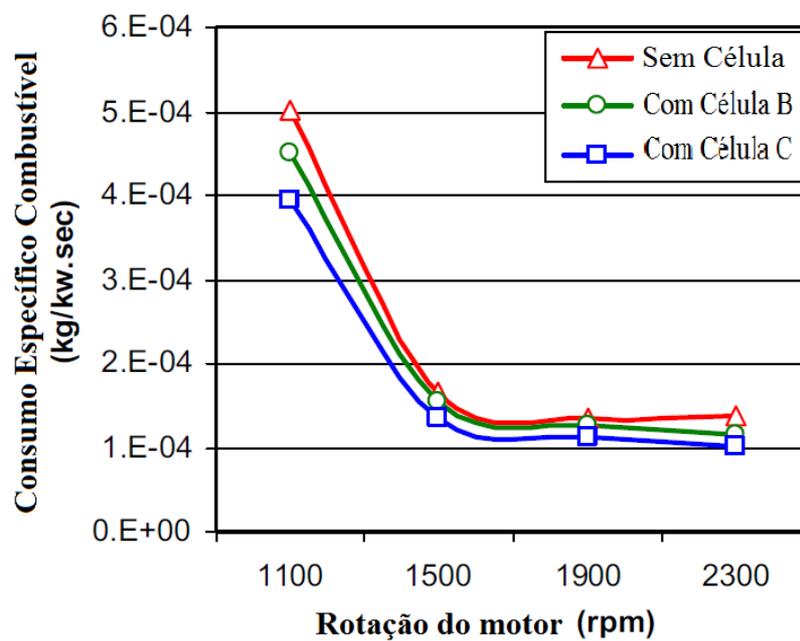


Figura 29: Consumo Epecífico de gasolina do motor Honda G200. Fonte: traduzido de (AL-ROUSAN, 2010).

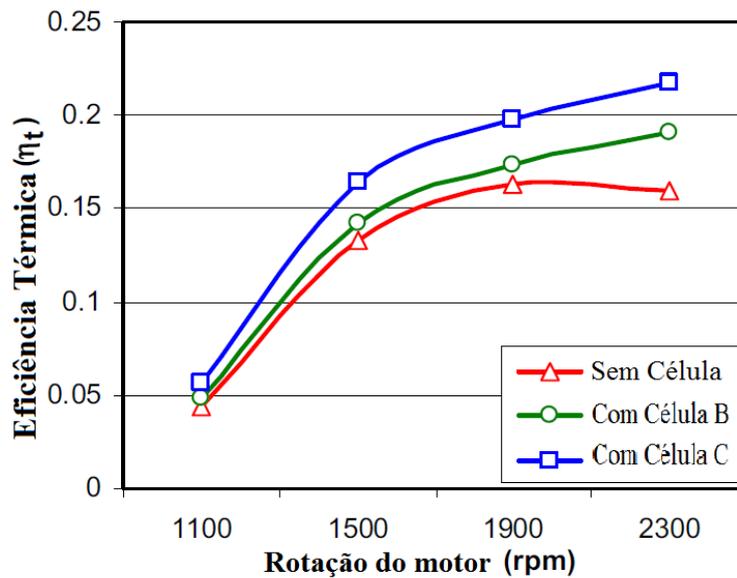


Figura 30: Eficiência Térmica do motor Honda G200. Fonte: traduzido de (AL-ROUSAN, 2010).

Com a mesma potência elétrica entregue às duas diferentes células (aproximadamente 600 W), através de uma fonte de alimentação (20 V; DC), os resultados obtidos se apresentam melhores para o arranjo de menores dimensões, fato relevante na busca de um sistema portátil.

Redução de concentração de poluentes na exaustão também foi encontrada com variações de 20% para gás carbônico e quase 50% para óxidos de nitrogênio em motores a gasolina, quando alimentados com combustível suplementar rico em hidrogênio (MUSMAR, et al., 2011).

Em motores Diesel, resultados semelhantes foram encontrados tanto para aumento de eficiência térmica quanto para redução dos níveis de poluentes emitidos (BIRTAS, et al., 2011) (BARI, et al., 2012) (YILMAZ, et al., 2012).

A Figura 31 mostra comportamento das emissões de CO<sub>2</sub> em função da quantidade de GPE introduzido, referenciado pela porcentagem energética de substituição. Foi utilizado motor Diesel de 50 kW de potência 4 cilindros com capacidade total de 3759 cm<sup>3</sup> e taxa de compressão de 17,5:

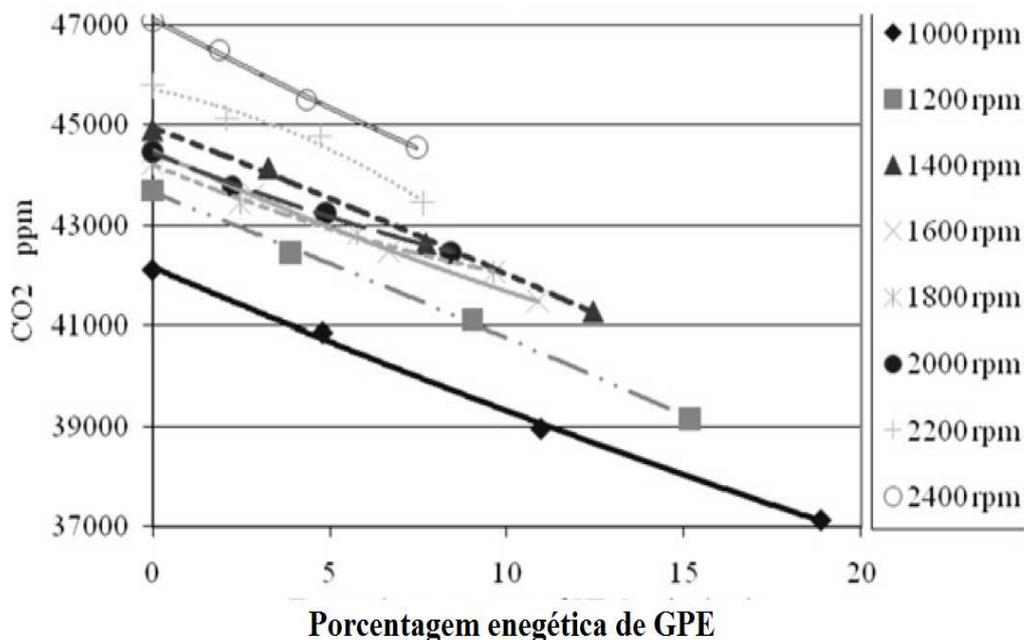


Figura 31: Comportamento de emissões de CO<sub>2</sub> com adição de GPE em motor Diesel.

Fonte: (BIRTAS, et al., 2011)

Reduções de consumo de combustível da ordem de 25 a 43% também foram encontradas na literatura para adaptações de veículos para utilização de gás rico em hidrogênio produzido “on-board” (DULGER, et al., 2000).

## 2.4 A DIFERENÇA ENTRE GÁS HIDROGÊNIO E O GÁS PRODUTO DE ELETRÓLISE

Além da questão quantitativa dos limites de eficiência energética do processo de eletrólise, uma discussão qualitativa do gás resultado do processo foi trazida a tona devido às propriedades da chama proveniente da queima do gás produto de eletrólise (GPE) em demanda. Chris Eckman e Santilli, realizaram experimentos com o GPE, referenciados por eles como Brown’s Gas e HHO (ECKMAN, 2010) e (SANTILLI, 2006). Os resultados apontam para um gás com maior massa específica e com mais densidade energética por volume do que a mistura de H<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>. A explicação seria a formação de aglomerados moleculares, chamados por Eckman de “Rydberg Clusters”,

onde uma mistura heterogênea de vapor d'água, elétrons livres, hidrogênio monoatômico e diatômico e oxigênio monoatômico e diatômico, além de todos possíveis produtos e subprodutos do processo de eletrólise criam um ambiente temporariamente estável para a formação de um novo arranjo molecular, ou isômero da água. Nesse estado, onde o formato em “V” da molécula  $H_2O$  se torna “linear”, elétrons se ligam à molécula agregando mais energia a ela (ECKMAN, 2010).

As Figura 32 e Figura 33 ilustram os formatos da molécula de água e os aglomerados moleculares acima citados. As cores roxo e verde indicam o gradiente de potencial elétrico dos arranjos moleculares ilustrados.

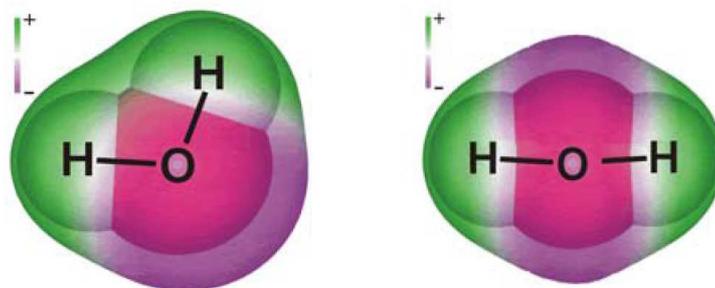


Figura 32: Molécula de  $H_2O$  – Normal e Linear (ECKMAN, 2010).

Tais aglomerados moleculares, então, ajudam a manter a estabilidade da água linear até o momento de uso do gás, que, nos casos referidos, é a ignição de uma tocha. Importantes características foram observadas por Santilli (2006), como a baixa pressão, da ordem de 150 psi, necessária para o gás retornar a forma líquida da água. Outra característica, que inclui o gás em uma nova classe, é a sua ampla variação de conteúdo térmico, que se estende da chama relativamente fria com 150 °C queimando livremente na atmosfera até os exorbitantes 9000 °C suficientes para derreter tijolos (SANTILLI, 2006).

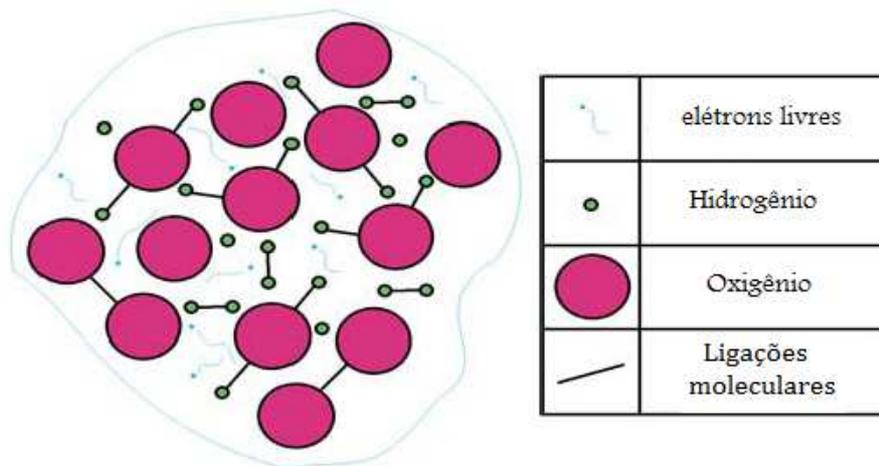


Figura 33: Rydberg Clusters. Traduzido de (ECKMAN, 2010).

A Figura 34 ilustra esquematicamente diferenças entre os gases produzidos pela eletrólise com e sem a separação de seus produtos:

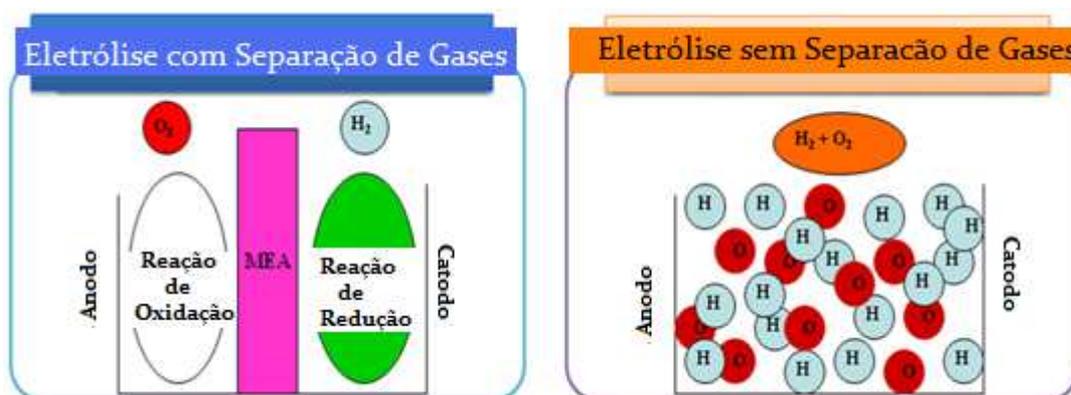


Figura 34: Diferenças na eletrólise com e sem separação dos gases. Fonte: traduzido de (KIM, et al., 2011)

Dessa forma, fica evidente a necessidade de extensa pesquisa na área a fim de levantar dados práticos suficientes para o desenvolvimento de uma teoria coesa que explique os fenômenos encontrados. Uma metodologia clara deve ser estabelecida rumo ao estudo e entendimento do gás, ou mistura de gases, proveniente da eletrólise da água e utilizado logo após sua produção, pois, dos gases produtos de eletrólise, pode-se obter hidrogênio e oxigênio, se devidamente separados e armazenados, porém

a utilização imediata dos gases produzidos cria um cenário que deve ser examinado com cautela.

O produto obtido (GPE), assim como suas propriedades, depende de variáveis como design do eletrolisador, material utilizado, distanciamento entre placas, tipo e concentração de eletrólito, escoamento dos gases e a forma de utilização da energia elétrica. Diferentes concentrações desses produtos certamente levam a um produto qualitativamente diferente. Diferentes arranjos desses sistemas podem gerar diferentes concentrações de gases produto na mistura que, se adicionada no processo de combustão, produzirá uma sequência de eventos diferente daquela produzida pela adição de hidrogênio puro (MAZLOOMI, et al., 2012) (NAGAI, et al., 2003).

Por isso, é importante a diferenciação entre GPE (Gás Produto de Eletrólise) e hidrogênio. Além disso, o fato de inúmeras partículas instáveis com diversas cargas elétricas presentes no gás faz com que ele seja altamente influenciável por campos de origem eletromagnética, criando um cenário que vai além da termodinâmica convencional para entendimento completo da situação e indicando que uma queima ainda mais rápida que a do hidrogênio ocorre na combustão de tal gás devido as suas características particulares (KIM, et al., 2011).

## Capítulo 3

# USO DE GÁS PRODUTO DE ELETRÓLISE EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

O número de pesquisas científicas a respeito do comportamento e aplicação de eletrolisadores sem separação de seus produtos, ou seja, sistema de produção de GPE, é ainda bastante reduzido e de pequeno volume na academia. Dessa forma, experimentações a respeito de tal tecnologia se fazem necessárias para o entendimento prático das possibilidades e das dificuldades envolvidas no desenvolvimento de tais sistemas e suas potenciais aplicações.

A consideração de que o gás produto de eletrólise sem separação de seus produtos apresenta uma mistura estequiométrica de hidrogênio e oxigênio é amplamente utilizada na maioria dos trabalhos recentemente publicados em jornais acadêmicos. Porém, como discutido anteriormente na seção “2.4 Diferença entre Gás Hidrogênio e o Gás Produto de Eletrólise”, o GPE pode apresentar características bastante diferentes de outros combustíveis, principalmente quando comparado ao gás hidrogênio puro. O único meio de avançar na pesquisa a respeito das características do GPE e expandir o conhecimento científico de suas aplicações é a realização de experimentação prática, em que se faz possível a observação de fenômenos e comportamentos e dessa maneira seja possível a geração de indicativos das respostas do sistema sob diferentes condições de operação.

O presente capítulo visa organizar informações para desenvolvimento de sistemas de produção e inserção de gás rico em hidrogênio proveniente da eletrólise da

água e utilizado em demanda em motores de combustão interna, assim como descrever experimentação prática realizada.

### **3.1. VISÃO GERAL DA APLICAÇÃO**

A introdução de um combustível suplementar atuando como elemento catalisador do processo de combustão em MCI pode proporcionar melhoras na eficiência do processo, além de permitir uma operação em regime de alta razão de excesso de ar, superior à razão estequiométrica. Dessa forma, o motor pode desenvolver mesmo trabalho mecânico operando com menor consumo específico de combustível primário (Diesel, gasolina, etanol ou gás natural).

Os grandes obstáculos enfrentados por essa solução sempre foram relacionados à quantidade de energia elétrica necessária para se produzir hidrogênio a partir da eletrólise da água. A quantidade de energia disponibilizada pelo hidrogênio em sua queima é inferior à energia elétrica necessária para produzi-lo com a tecnologia disponível hoje. Assim a quantidade de hidrogênio necessária para ser combustível primário do processo nunca poderia ser gerada a partir da eletricidade produzida pelo alternador ou gerador acoplado ao próprio motor e, da mesma forma, a quantidade de energia química disponível numa mistura de gases provenientes da eletrólise não pode ser maior que a energia elétrica usada para sua produção. Isso se considerarmos o GPE como uma mistura estequiométrica dos gases  $H_2$  e  $O_2$  e que a queima desse gás tem o mesmo comportamento que a dessa mistura estequiométrica.

Porém a utilização de um gás combustível suplementar, em pequenas quantidades, que proporcione um efeito catalítico no processo de combustão, devido à presença de hidrogênio, oxigênio e radicais que participam de reações intermediárias da combustão, e que possa ser gerado a partir da energia elétrica disponibilizada pelo sistema alternador/gerador/bateria sem que haja sobrecarga, cria um panorama de estudo energético diferente. A simples hipótese do gás não ter energia química armazenada superior a energia elétrica utilizada para sua produção é não suficiente

para indicar que a eficiência geral do processo irá diminuir ou aumentar devido a complexidade e interligação dos processos e variáveis envolvidas.

A Figura 35 ilustra fluxos básicos de energia para análise da adaptação proposta.

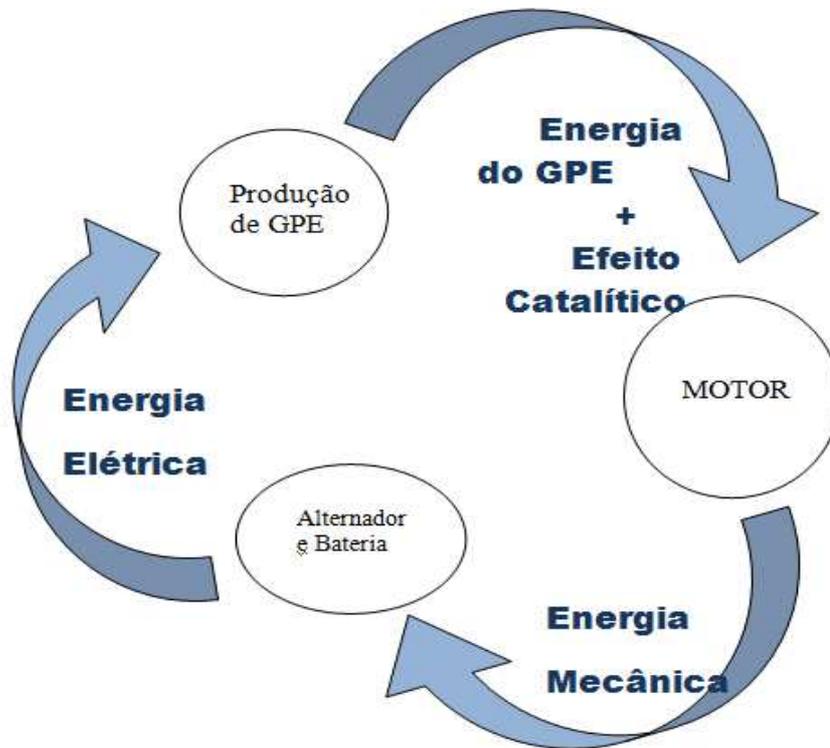


Figura 35: Fluxos básicos de energia para aplicação de GPE em um veículo.

O processo termodinâmico da combustão e transferência de energia para um eixo rotativo, o processo eletromagnético envolvido na geração de energia elétrica, o controle eletrônico de potência para alimentação de sistemas elétricos e recarga de bateria, assim como o processo eletroquímico da eletrólise da água são os principais processos influenciados pela aplicação proposta. Vale ainda lembrar que ocorre um processo eletroquímico de armazenamento de energia elétrica na bateria, que é determinantemente influenciado pelas condições de operação de todo sistema elétrico. Não é válida a melhoria de eficiência de um veículo se não houver energia suficiente para a próxima partida do motor.

Podemos observar as principais entradas e saídas do processo de combustão na Figura 36.

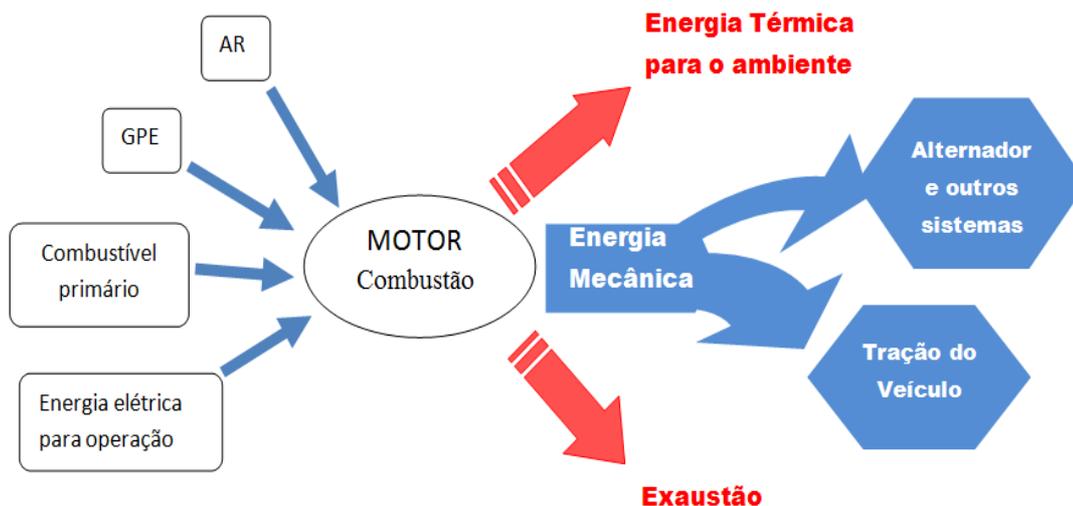


Figura 36: Entradas e saídas do processo de combustão

Para a combustão em si, a energia elétrica necessária aciona a ignição das centelhas nas velas e outros sistemas para o devido funcionamento do motor. As outras três entradas são referentes à mistura ar-combustíveis a ser detonada na câmara de combustão.

O tanque de combustível primário armazena energia em sua composição química que passa por um processo de preparação (mistura ar-combustível), através do carburador ou de bicos injetores na câmara de combustão. A mistura, então, sofre ignição por centelha elétrica para motores ciclo Otto, ou por compressão em motores ciclo Diesel. Assim se libera energia térmica da combustão, onde parte se transforma em energia mecânica entregue ao eixo do motor, e o resto se perde nos gases de exaustão e outras perdas do sistema. Para um melhor entendimento do sistema energético global, a Figura 37 ilustra exemplo de diagrama de Sankey com armazenamentos de energia conectados a cada processo, assim como os devidos fluxos de energia envolvidos no estudo de um motor a gasolina baseado em valores encontrados na literatura pertinente (MARTINS, 2013):

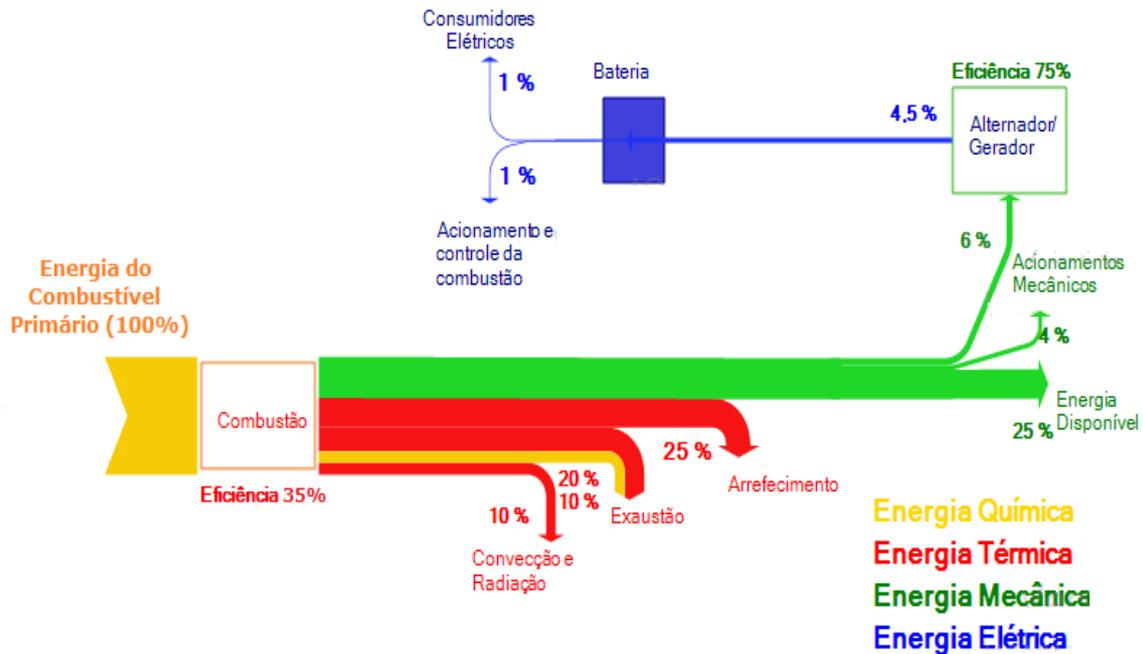


Figura 37: Processos e fluxos de energia envolvidos na combustão.

Para que a aplicação tenha bons resultados, a energia extra disponibilizada pelo motor, por conta do aumento de eficiência do processo de combustão, tem que ser maior que a energia utilizada pelo gerador para produzir o combustível suplementar. Em outras palavras, a corrente elétrica suprida pelo gerador para o processo de eletrólise gera uma força, ou “gasto energético” no eixo do motor. Se essa influência na operação do motor for maior que o ganho de rendimento proporcionado pela inserção do gás no processo, a aplicação resultará em ganhos poucos significativos, ou até mesmo em perda de eficiência geral e os resultados serão piores que aqueles obtidos com operação convencional.

A Figura 38 ilustra diagrama com a adição de GPE no processo de combustão para situação hipotética, em que energia elétrica é utilizada para produzir o gás combustível suplementar a ser adicionado no processo de combustão com o intuito de aumentar sua eficiência.

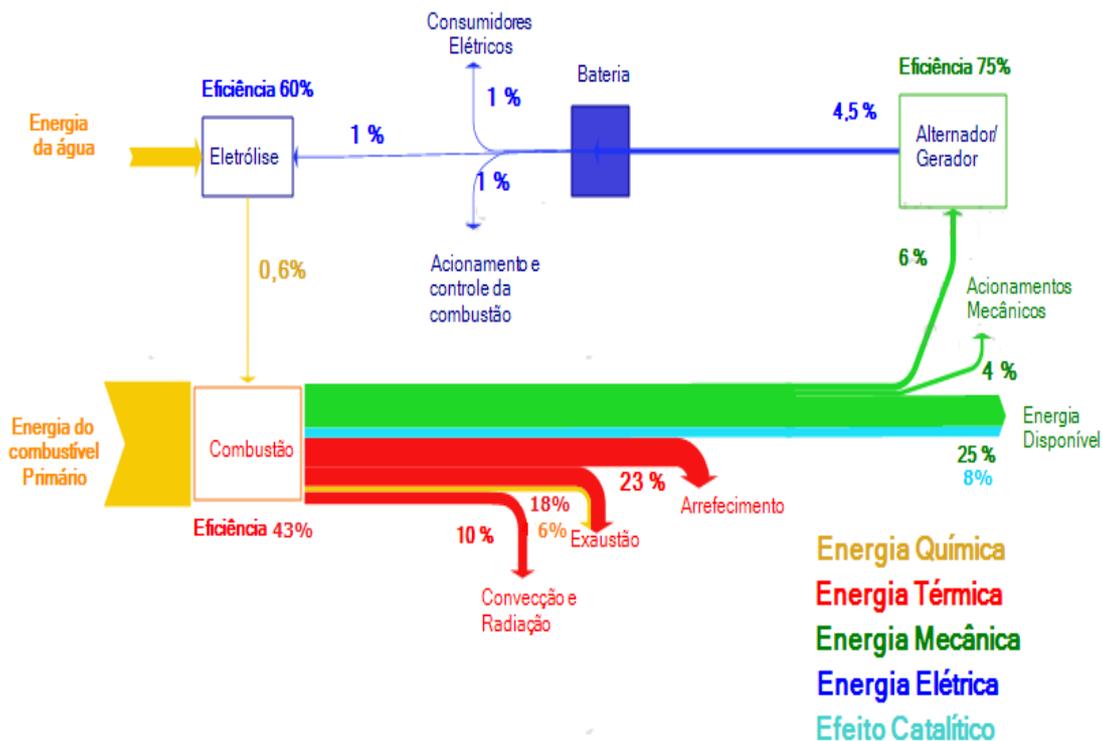


Figura 38: Processos energéticos interligados

Um dos efeitos da melhora do processo de combustão é a redução de emissão de HC (hidrocarbonetos não queimados) assim como diminuição da temperatura na abertura de válvula de escape (MUSMAR, et al., 2011). Dessa forma, parte da energia que era antes jogada fora na exaustão é aproveitada na melhor queima da mistura combustível primário, combustível suplementar e ar. Além disso, a energia térmica é dissipada para o ambiente através do bloco do motor, sistema de arrefecimento e sistemas acoplados. Se um processo mais rápido ocorrer devido ao acréscimo das velocidades de reações, propagação e desenvolvimento de chama, menos energia será perdida dessa forma.

A adição de GPE no processo possibilita a operação do motor em regimes diferentes dos encontrados convencionalmente. As principais características levantadas na revisão da literatura indicam uma possível operação com a razão de excesso de ar elevada, o que na prática exige ajustes e monitoramento. Com uma taxa constante de inserção de combustível suplementar, podemos então diminuir a taxa de utilização de combustível primário, o que aumenta a relação ar utilizado/combustível primário. Regulagens finas de entrada de ar podem ser ajustadas em alguns sistemas carburados,

porém a solução geral é diminuir a quantidade de combustível primário para se chegar a maiores razões de excesso de ar. Vale lembrar que, após instalado o sistema alvo de estudo, onde antes no motor entrava ar, tem-se a entrada de ar + GPE, que contém oxigênio na sua composição. Assim a quantidade de ar que entra na câmara diminui, porém uma parcela do conteúdo do GPE colabora para manutenção dos níveis de oxigênio, pois, na composição do GPE, temos mais concentração de oxigênio do que no ar. Ou seja, a simples disponibilização de GPE no sistema de admissão de ar já provoca uma operação do motor com razão de excesso de ar levemente mais elevada que a operação convencional.

Outra variável importante para sucesso da aplicação é o ajuste do tempo de ignição da mistura na câmara de combustão. Uma vez que a adição de GPE rico em hidrogênio diminui, a duração do desenvolvimento e propagação de chama se torna necessário um ajuste do tempo de ignição para melhor aproveitamento dos possíveis benefícios de tal aplicação em motores de combustão interna.

Adicionalmente, o ponto de inserção do GPE no sistema de admissão pode fazer diferença, por exemplo com relação à pulverização da mistura. Certamente os efeitos serão diferentes se a inserção for feita em diferentes pontos do sistema de admissão.

Fica assim evidente que diversas são as variáveis que influenciam na tentativa de aumento da eficiência do processo de combustão com a utilização do sistema exposto neste trabalho e das principais podemos citar:

- As taxas de produção e inserção de combustível suplementar
- A eficiência de Produção de Combustível suplementar
- A qualidade do gás produzido
- O ajuste das proporções da mistura combustível primário, combustível secundário e ar para operação com razão de excesso de ar superior ao convencional
- O ajuste do tempo de ignição da mistura combustível

## 3.2 A ADAPTAÇÃO DO SISTEMA EM MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA

O GPE é gerado em eletrolisador compacto, composto por células eletrolíticas, que utiliza eletricidade e solução de água destilada e eletrólito para produzir o gás rico em Hidrogênio através do processo de eletrólise.

A introdução do GPE no processo de combustão se dá através do sistema de admissão de ar do motor. Desse modo, a mistura de ar e o gás produto da eletrólise entram na câmara de combustão através das válvulas de admissão, seja em sistemas carburados ou não. É possível adaptação de sistemas de bicos injetores dedicados ao GPE, porém, pela dificuldade técnica, essa opção não é do escopo do trabalho.

O esquemático da Figura 39 ilustra a aplicação referente à produção e adição de GPE no processo de combustão de um motor a combustão.

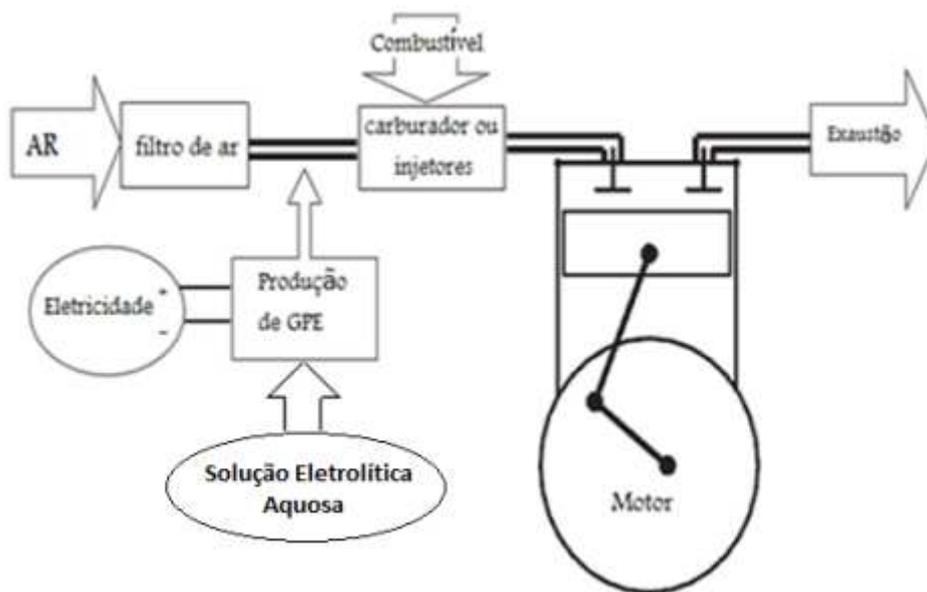


Figura 39: Esquemático da adição de GPE em motor a combustão. Traduzido e adaptado de (WANG, et al., 2010b).

É relevante citar a importância de válvulas de segurança tipo corta-chama, a fim de se prevenir a possível propagação da chama no sentido do sistema de geração de GPE. A alta velocidade de propagação de chama e a baixa energia de ativação

necessária para ignição do gás pode causar a explosão antes de completo fechamento das válvulas de admissão, principalmente se adiantamentos de tempos de ignição de centelha foram experimentados (DAS, 1996).

De maneira geral, o eletrolisador deve ser instalado em local onde haja ventilação suficiente e longe de qualquer superfície que ultrapasse a temperatura de 90° C. Nunca se deve montar um eletrolisador próximo aos dutos de escape ou em local que atrapalhe fluxo de ar do radiador quando for o caso. A mangueira que leva o gás produzido até o ponto de inserção no sistema de admissão de ar também deve estar protegida de regiões muito quentes e deve não ter dobras muito agudas que possibilitem futuras obstruções e/ou perdas de carga diminuindo, indevidamente, a taxa de inserção de GPE.

### **3.2.1 Eletrolisadores Compactos sem Separação de Gases**

A praticidade e tamanho de modelos compactos são fatores importantes para instalação em veículos automotores e motores de forma geral. O objetivo de sistemas compactos de produção de gás rico em hidrogênio é disponibilizar gás combustível suplementar para seu uso imediato. Assim, o armazenamento de solução aquosa eletrolítica se faz muito mais simples e segura do que o armazenamento de hidrogênio em reservatórios especiais e pressurizados.

Sistemas de monitoramento de pressão são ainda indicados para evitar que obstruções causem aumento excessivo de pressão onde houver GPE, fazendo com que qualquer explosão tenha danos incomparavelmente menores que a explosão de um tanque pressurizado de armazenamento de hidrogênio. A quantidade de solução a ser armazenada é pequena devido à enorme taxa de expansão do volume no processo de produção do gás e assim pequena taxa de consumo de água pelo processo.

Diferentes são as possibilidades de se utilizar do processo eletrolítico para produção do combustível suplementar e, a seguir, são ilustradas algumas tecnologias disponíveis no mercado formal e informal.

### 3.2.1.1 Célula de arames helicoidais

Uma das primeiras células eletrolíticas a aparecer no mercado eletrônico americano foi inicialmente comercializada pela “WATER4GAS.com”. Livros em formato eletrônicos e manuais DIY (Do It Yourself – faça você mesmo), escritos por Ozzie Freedom, e colaboradores descrevem a sua fabricação e as adaptações necessárias para utilização do sistema. Apesar de abordagem pouco científica e bastante comercial, essa tecnologia incentivou experimentadores rumo a busca de soluções referentes à eficiência energética ao redor do mundo.

A célula eletrolítica de arames helicoidais é composta por dois eletrodos de mesmo material, usualmente encontrado no mercado, com arames de aço inox 316, mergulhados em solução eletrolítica. Um eletrodo faz o papel de anodo (+) e o outro de catodo (-). Dessa forma, podemos classificar tais eletrolisadores como unipolares.

A Figura 40 ilustra esses eletrodos.



Figura 40: Arames helicoidais - Eletrodos (FREEDOM, 2008)

Uma entrada ajustável de ar é conseguida através de orifício com rosca situado na tampa do eletrolisador. A transparência da célula, que é feita de potes de vidro, permite o ajuste visual da quantidade de ar que entra de acordo com a sucção de ar realizada pelo motor cujo sistema descrito é instalado. O ajuste é realizado através de uma tampa roscada em um orifício na tampa do dispositivo conectado a uma mangueira. A Figura 41 mostra o detalhe da entrada de ar descrita.



Figura 41: Eletrolisador de arames helicoidais – Detalhe de entrada de ar.

O sistema gerador de HHO (como descrito pela water4gas), pode ser composto por várias células eletrolíticas ligadas em série ou paralelo. A Figura 42 ilustra duas células desse tipo ligadas em série.

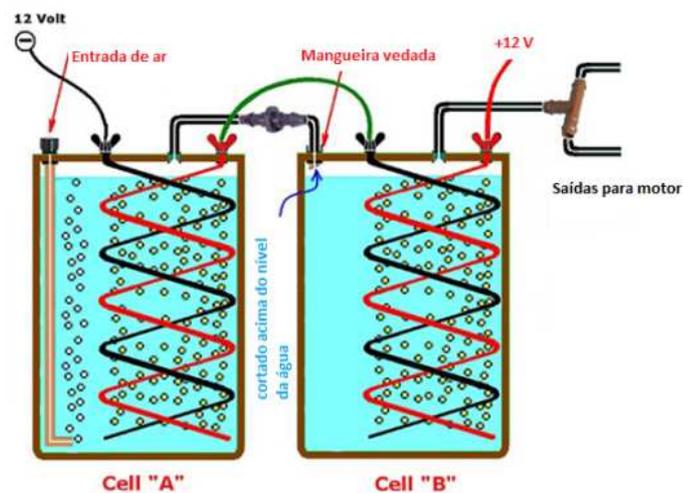


Figura 42: Eletrolisador Water4Gas – Ligação Série. Traduzido de (FREEDOM, 2008).

A ligação em série possibilita uma divisão de tensão entre as unidades, o que diminui as perdas por aquecimento e melhora a eficiência da produção de Gás rico em hidrogênio.

A baixa complexidade de montagem da célula aliada à promessa de economia de combustível fez com que a “water4gás” divulgasse a tecnologia pela internet de forma intensa. Vários depoimentos de economia de combustível

começaram a aparecer em fóruns de pesquisa relacionados ao assunto. Os manuais descrevem o processo eletrolítico realizado com solução de água destilada com bicarbonato de sódio, substância não corrosiva e de manuseio “amigável”.

O fato de ser feito em vidro possibilita a visualização da reação acontecendo além do devido ajuste visual de entrada de ar no recipiente a fim de evitar uma pressão negativa intensa no interior do reservatório que facilitaria a sua quebra. A possibilidade de acompanhamento visual do processo possibilita uma importante ferramenta de pesquisa e estudo. Porém a instalação de maneira permanente de um sistema desses em um veículo apresenta grande risco de quebra, mesmo sendo um vidro resistente.

Outro fator limitante de tal eletrolisador é a baixa eficiência de produção de gás rico em hidrogênio devido à diminuída área de contato entre eletrodos e solução eletrolítica, assim como elevados níveis de “correntes parasitas”, que circulam pelo reservatório.

### **3.2.1.2 Célula eletrolítica de placas paralelas**

As células eletrolíticas de placas paralelas, como o próprio nome diz, são compostas por placas de metal alocadas próximas umas das outras, a fim de se proporcionar uma maior área de contato entre as superfícies de reação e solução eletrolítica. Diversos arranjos de tais placas podem ser encontrados em diferentes modelos de eletrolisadores comercializados mundo afora. Evidentemente cada detalhe de montagem e arranjo dos eletrolisadores influencia em sua eficiência de produção de gás, e muitos são os arranjos possíveis, porém algumas considerações importantes podem ser feitas a respeito e, assim, foram escolhidos três tipos de arranjos a serem comentados.

### **3.2.1.3 Célula de placas submersas**

Este arranjo é feito de um reservatório, geralmente de material plástico onde placas paralelas metálicas são fixadas e submersas em solução eletrolítica. Sendo assim as placas onde as reações eletrolíticas irão ocorrer ficam submersas em solução como um tanque.



Figura 43: Células de placas paralelas submersas. (Panacea University, 2012)

A forma compacta do arranjo e materiais utilizados proporciona melhor adequação às situações adversas apresentadas ao redor do motor de um carro se comparada à célula de arames helicoidais descrita anteriormente. Geralmente é composta por pares de placas ligadas em série, sendo assim, apenas uma placa é ligada ao positivo da alimentação elétrica e também uma placa é ligada ao negativo da alimentação, sendo que o restante das placas, chamadas placas neutras, estão conectadas entre si criando um eletrolisador bipolar. O inconveniente encontrado em células desse tipo se dá pela elevada corrente que percorre um caminho direto entre as placas eletrodos, sem proporcionar geração de gás nas superfícies de reação caracterizadas pelas placas neutras. Vale lembrar que cada placa neutra tem uma face anódica e outra catódica, caracterizando assim sua função bipolar.

Dessa forma uma parcela considerável da energia elétrica que circula pelo eletrolisador não produz gás e simplesmente aquece a célula, reduzindo a eficiência de produção. Observa-se ainda na Figura 44 que apenas duas placas, chamadas placas eletrodos, estão conectadas à bateria. As outras, chamadas placas neutras, permitem a divisão da tensão aplicada entre os pares de placas proporcionando mais superfície de reação.

A Figura 44 mostra o fluxo das chamadas correntes parasitas:

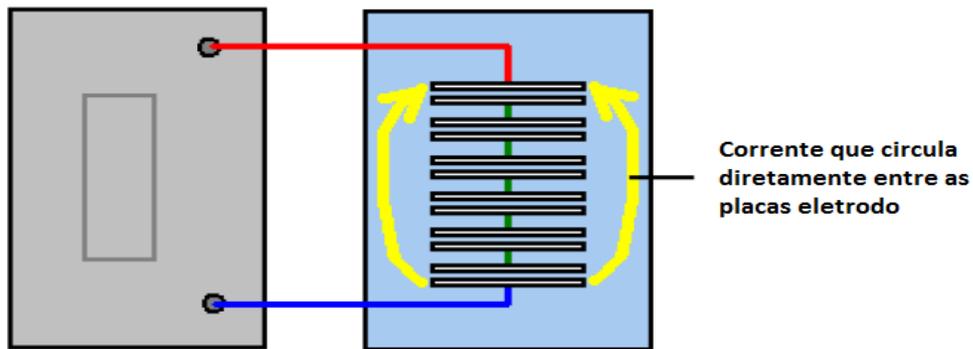


Figura 44: Fuga de corrente em placas submersas.

### 3.2.1.4 Célula tipo “seca”

As células “dry cell” como descritas no mercado virtual possuem um reservatório de solução separado do local onde a reação acontece. O objetivo desse arranjo é diminuir a influência de correntes que circulam pela célula sem produzir gás rico em hidrogênio. Desse modo, o arranjo da célula “seca” é feito de forma que isoladores de borracha são colocados entre as placas e posteriormente pressionados por uma placa externa, geralmente feita de acrílico ou material semelhante, que deve ser isolante elétrico e resistente a variações de temperatura.

As placas devem possuir perfurações a fim de permitir a passagem de água e gás entre os compartimentos. Vale a pena ressaltar que tais perfurações também contribuem para a passagem de corrente elétrica que não produz gás e, influenciam na eficiência do eletrolisador, mas, ainda assim, tal arranjo possui menos perdas por correntes indesejáveis, se comparado ao de placas submersas. A necessidade de um reservatório de solução aumenta o espaço requerido para a instalação do sistema.

A Figura 45 mostra um exemplo de célula eletrolítica de placas paralelas tipo “dry cell”.

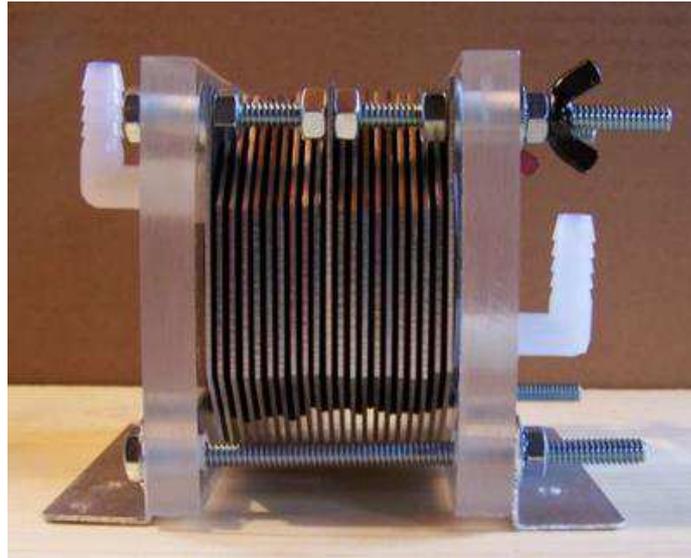


Figura 45: Exemplo de Célula tipo “seca”.

A Figura 46 ilustra detalhe de perfurações de placas de uma célula eletrolítica de placas paralelas:

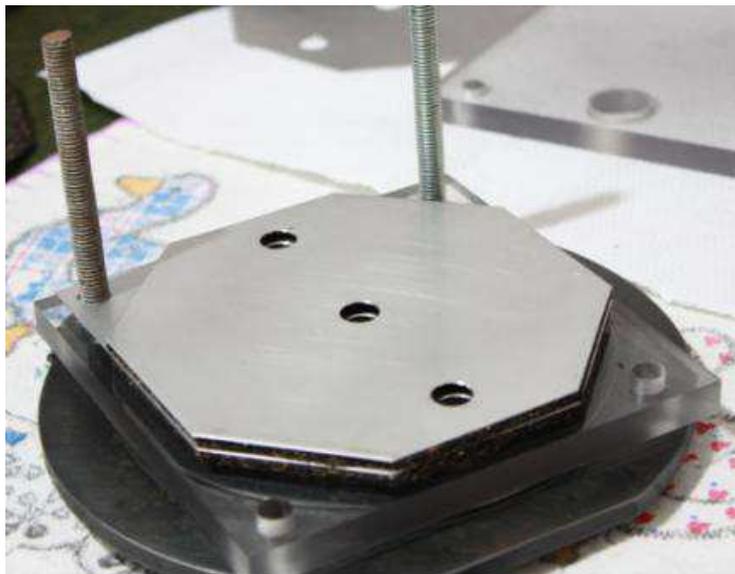


Figura 46: Detalhe de Perfurações das placas em célula de placas paralelas confeccionada durante a pesquisa.

O aumento de componentes no sistema causa uma maior chance de vazamentos em qualquer conexão. Além disso, a baixa quantidade de água ao redor das placas causa um maior aquecimento da célula, requisitando um melhor controle da energia elétrica entregue ao eletrolisador a fim de aperfeiçoar seu desempenho. Outro

fator limitante da topologia “dry cell” é que, como o uso de qualquer cola adesiva entre borracha e placa pode causar contaminação da solução eletrolítica arruinando o processo, a tensão de aperto das placas de acrílico externas é alta e dessa forma rachaduras e trincas são passíveis de acontecer dependendo das situações submetidas. Durante o trabalho, experiências com adesivos que ajudassem na estruturação da célula foram tentadas, permitindo muitas vezes a realização de experimentos, porém a contaminação da solução se fez visível com o tempo.

A Figura 47 ilustra a conexão entre célula seca e reservatório.



Figura 47: Ilustração de uma “dry cell” ligada ao reservatório (água + eletrólito)

### 3.2.1.5 Célula tipo “Mista” - *Mighty Mite*

Um arranjo que parece unir as vantagens das topologias anteriores é o que foi chamado aqui de célula mista. Comercializado com o nome de “mighty-mite” em sites americanos, fabricado pela empresa D&N engineering, esse arranjo consegue eliminar o uso de reservatório separado da célula e evitar que grandes correntes de

fuga aconteçam. Para isso ele é montado em formato de T invertido, e as placas são colocadas na parte inferior e tem diâmetro igual ao tubo onde é montada. Separadores de PVC são utilizados para isolar uma placa da outra. A distância entre placas é bem maior do que outros arranjos de placas paralelas. Para tanto, são utilizadas duas células ligadas em paralelo, onde as placas eletrodo positivas (anodo) de ambas estão conectadas no centro do eletrolisador, e as placas eletrodo negativas (catodo) estão conectadas nas pontas do eletrolisador. Portanto, podemos dizer que duas células eletrolíticas são montadas no interior do tubo, em paralelo, formando o eletrolisador em questão. A Figura 48 ilustra o “mighty-mite” e os seus terminais elétricos.



Figura 48: Célula “Mista” - Mighty-Mite

O tubo transparente vertical possibilita a visualização da operação da célula assim como o nível de solução eletrolítica ainda presente no eletrolisador. Acima do tubo, podemos observar a conexão para a mangueira que conduzirá o gás e uma tampa roscada que permite fácil realimentação de solução.

Além da versão disponibilizada em T, vendida como um “kit” para montagem do próprio comprador, o que possibilita o entendimento completo de sua montagem, o fabricante disponibiliza uma versão já montada em Y, que supera a produção da versão em T (“Y tee Mite”). A montagem em Y facilitaria a saída do gás

produzido permitindo assim uma melhor circulação no interior da célula. Outro detalhe do modelo disponibilizado em Y é uma tela de aço inox soldada sobre as placas.

Tal versão só é disponibilizada com todos os itens necessários para adaptação em carros com sistema de injeção eletrônica e inclui controlador CCPWM para controle da produção de gás e um sistema eletrônico, que é conectado a diversos sensores do sistema de injeção a fim de adaptar o sistema de injeção eletrônica para a adaptação proposta. A Figura 49, a seguir, mostra o kit “Y tee Mite” e detalhe de suas placas adaptadas.



Figura 49: Kit “Y tee MITE” comercializado pela D&N Engineering e detalhe de suas placas adaptadas. Fonte: (D&N engineering, 2013)

### 3.2.1.6 Célula de tubos

Outro arranjo encontrado é o de tubos que podem ser concêntricos ou arranjos em pares. Como o seu layout contém detalhes que dificultam a montagem, essa topologia é pouco referenciada e poucos são os experimentadores desse tipo de arranjo. O arranjo tomou proporções maiores quando um documentário sobre o inventor e cientista americano Stanley Meyer foi exibido pelo Discovery Channel, onde demonstrações de sua tecnologia mostravam uma célula de tubos arranjos em

pares cuja produção de gás era bastante elevada. Stanley Meyer trabalhava com um sistema pulsado de eletrólise, em que a ressonância elétrica era fator importante no processo para obter eficiências surpreendentes de produção de gás rico em hidrogênio. Além de se utilizar de ressonância para melhor eficiência, Stanley Meyer também utilizava um dispositivo que ionizava o gás produzido antes de inseri-lo no motor. O tratamento eletromagnético do gás parece viável devido as suas características “elétricas” por conter íons e elétrons livres (MEYER, 1989).

De maneira geral, a escolha de eletrolisadores compactos deve levar em conta principalmente o espaço necessário para instalação adequada do sistema, a eficiência do sistema eletrolisador e a robustez do equipamento, uma vez que o ambiente em que ele será instalado pode ser agressivo.

A escolha do eletrólito a ser utilizado e a sua concentração mássica deve ser feita de acordo com as prioridades estabelecidas pelo experimentador. Soluções com bicarbonato de sódio possuem baixa eficiência, porém não apresentam riscos inerentes às substâncias altamente cáusticas como KOH (hidróxido de Potássio) ou NaOH (hidróxido de Sódio). O KOH proporciona menor resistividade da solução eletrolítica e tem menores efeitos corrosivos ao equipamento se comparado ao NaOH. A soda cáustica, porém, parece obter melhores resultados de produção operando como único eletrólito e apresenta menor aquecimento do eletrolisador operando sem controle dinâmico de energia elétrica fornecida ao eletrolisador. Concentrações mássicas de até 10% de NaOH ou KOH geralmente podem ser utilizadas sem controle da energia elétrica entregue com eficiências razoáveis, porém com menores taxas de produção de GPE. Para aumento de eficiência do eletrolisador, assim como sua taxa de produção, podem ser usadas concentrações mássicas de 15% a 25%, porém existe a necessidade do controle de transferência de potência elétrica ao eletrolisador a fim de se evitar o superaquecimento do eletrolisador. Recentemente diferentes misturas de eletrólitos estão sendo testadas e usadas em diferentes eletrolisadores. Uma opção é a utilização de KOH juntamente com NaOH na tentativa de equilibrar os benefícios e contrapartidas de cada eletrólito. Outras substâncias como uréia podem ser usados para conter a formação de espuma para operações com alta densidade de corrente. Misturas podem ser utilizadas como eletrólito e bons resultados foram obtidos em testes

realizados pelo grupo de pesquisa com uma mistura eletrólito aqui referenciados como E-22 (PINESCHI, 2013).

A água utilizada para preparação da solução deve ser destilada com maior grau de pureza possível a fim de se evitar decomposição de materiais indesejados no interior do eletrolisador e proporcionar melhor controle e eficiência do sistema.

Tratamentos e preparações das placas também podem ser feitos para melhorar a vida útil do equipamento, assim como sua produtividade e eficiência, porém tais procedimentos não foram explorados neste trabalho.

### **3.2.2 Sistemas de Segurança para Adição de GPE em Motores**

O uso de sistemas que possam interromper a propagação de uma explosão dentro da mangueira, que leva o GPE até o motor, é de suma importância na proteção do sistema eletrolisador e do próprio veículo. Válvulas corta-fogo projetadas e testadas para utilização específica de gás rico em hidrogênio devem ser empregadas visto que a propagação da chama em um meio rico em hidrogênio e oxigênio é muito rápida. Diversos tipos de tecnologia corta-fogo são comercializados no mercado virtual, porém a cautela na escolha de tais válvulas faz-se necessária devido à importância de sua função. Depois de entrar em contato com alguns fornecedores no Brasil e no exterior, o sistema de válvulas que mais chamou atenção foi o comercializado pela “HHO Gas Technology LLC”. Testes de suas válvulas corta-fogo podem ser visualizados em vídeos em seu “website” (<http://www.hhogastechnology.com/>; acesso em 27/08/2013).

A Figura 50 ilustra um frame retirado de um vídeo que mostra o teste, onde a válvula testada está indicada pela seta vermelha:



Figura 50: Teste realizado em válvula corta-fogo pela “HHO Gas Technology”.

No teste da figura anterior, foram utilizados dois sistemas eletrolisadores estacionários ligados em paralelo para produção de gás rico em hidrogênio, onde a saída de gás foi interrompida durante certo tempo para aumento da pressão na mangueira. Uma chama, então, foi utilizada para ignição do gás no interior da mangueira. O momento registrado acima mostra a ignição praticamente instantânea do gás até a válvula em cor verde indicada na figura com uma seta vermelha. Dois tamanhos de válvulas foram adquiridos e testados de forma satisfatória durante a realização deste trabalho. Na Figura 51, vê-se, à esquerda, a opção para vazão de até 10 litros por minuto e, à direita, a opção para até 3 litros por minuto.



Figura 51: Válvulas de proteção contra explosões utilizadas.

De maneira geral, a instalação demanda que o ponto de alimentação de gás suplementar para o motor dê-se em um ponto de admissão de ar. De acordo com as experiências realizadas e opiniões de diversos experimentadores, um ponto adequado é o filtro de ar, de modo que a mangueira proveniente do sistema de produção de GPE seja alocada firmemente e que o gás produzido tenha que circular forçadamente pelo filtro de ar. Dessa forma, realiza-se proteção contra explosões e ainda uma limpeza do gás a ser utilizado. Adicionais proteções como válvula corta-fogo e borbulhador podem ser utilizadas, porém faz-se necessária a verificação dos níveis de gás suplementar que chega até o motor, pois, em um sistema compacto, as perdas de carga que ocorrem em válvulas e borbulhador podem comprometer o fluxo do gás combustível suplementar até o motor. A opção mais utilizada em teste em veículos foi com válvula corta-fogo para vazão máxima de 3 litros por minuto e adaptação de mangueira em filtro de ar com fluxo de GPE através do filtro. A instalação de pelo menos 50 cm de mangueira para ambos os lados da válvula é a recomendação do fabricante.

### **3.2.3 Adaptação em Motores com Injeção Eletrônica**

Os sistemas de injeção eletrônica utilizam-se de curvas de funcionamento do motor e de suas respostas para realizar uma operação próxima ao ponto ótimo de eficiência térmica, definido por curvas levantadas em laboratório com o motor operando somente com combustível primário. Para atingir tal objetivo, o sistema de injeção eletrônica utiliza sensores instalados em diversas partes do processo para obter informações, processá-las comparativamente ao banco de dados, onde as curvas de funcionamento estão registradas, e então atuar em dispositivos a fim de se otimizar o processo para cada situação circunstancial de operação.

Medições de pressão interna da câmara, massa e volume de ar admitido, concentrações de oxigênio na exaustão, posição de borboleta de aceleração, rotação de operação e temperaturas de ar de admissão e líquido de arrefecimento são exemplos de dados coletados através de sensores para serem processados pela unidade de controle eletrônico (UCE). Assim sendo, a UCE envia sinal a atuadores a fim de se ajustar níveis de combustível e ar a serem misturados para queima e tempo de ignição das centelhas.

Como a adição do combustível suplementar altera características do processo de combustão e da exaustão, e o banco de dados do sistema possui informações a respeito da operação do motor com combustível primário somente, certamente valores diferentes das faixas esperadas serão medidos pelos sensores e um possível erro de julgamento das quantidades necessárias de combustível e ar deverá acontecer. Uma das alterações não previstas pelo sistema de injeção eletrônica é o aumento dos níveis de oxigênio na exaustão. Tal mudança, captada pelo sensor de oxigênio localizado no sistema de exaustão, faz com que a UCE atue nos bicos injetores para aumentar os níveis de combustível na mistura por entender que a mistura está pobre.

Na operação convencional, a presença de oxigênio extra na exaustão acusaria uma operação com razão de excesso de ar elevada, o que determina queda de eficiência térmica para operações apenas com combustível primário. Na realidade, a presença extra de oxigênio se deve à inserção de oxigênio presente no gás combustível suplementar e na diminuição dos níveis de CO e CO<sub>2</sub> decorrentes da melhor queima da mistura combustível. Dessa maneira, a nova mistura utilizada (GPE+ar+gasolina) possibilita a operação com altos níveis de razão de excesso de ar sem brusca queda de eficiência, caracterizando uma queima com pouca eficiência, mas sim utilização de menores quantidades de combustível primário.

O levantamento de curvas de operação do motor com amplos limites de operação em alta razão de excesso de ar (com adição de GPE) permitiria determinação de faixas de valores das grandezas a serem medidas pelos sensores. Seria a base adequada de dados para o desenvolvimento de um sistema de injeção eletrônica que controlasse níveis ótimos de ar, combustível primário e combustível secundário suplementar na mistura final a ser queimada. Porém os sistemas de injeção eletrônica presentes no mercado não possibilitam fáceis ajustes no programa, nem alteração nos bancos de dados utilizados como base. Assim a solução técnica ideal seria criação de nova unidade de controle com programação diferente e banco de dados adaptado para operação bi-combustível. Empresas como Link, Accel DFI e MegaSquirt trabalham com essa opção e podem providenciar controle ilimitado de todos aspectos de operação de motor através de um módulo UCE a ser substituído pelo anterior. Porém todo um

mapeamento de misturas “combustíveis” e tempos de ignição deve ser realizado para entendimento completo da operação e verificação das situações de ótimo desempenho.

Para se testar a adaptação em carros com injeção eletrônica sem se reprogramar a unidade central, ou alterar o banco de dados base para cálculos de operação, se faz necessário o tratamento dos sinais enviados pelos diferentes sensores até a unidade central de comando do sistema de injeção. Desse modo, pode-se obter como resultado o ajuste das proporções de mistura ar-combustível e o atraso do ponto de ignição de centelha desejado. Circuitos eletrônicos projetados para esse fim são aqui chamados de EFIE (Electronic Fuel Injection Enhancer).

A alteração dos sinais dos sensores tem como objetivo criar um cenário de grandezas envolvidas não verdadeiro para a UCE, porém que faça com que os atuadores regulem os parâmetros relevantes da forma desejada quando utilizado o combustível suplementar. A alteração desses sinais pode acarretar em perda de informações importantes de operação que podem levar o motor a avarias e mau funcionamento de origem desconhecida. Pesquisas futuras de tal adaptação podem utilizar uma sinalização em paralelo dos sensores com organização das leituras reais em módulos especiais que alertariam situações de risco ocorrendo. Dessa forma, seria possível ler os valores reais das grandezas medidas pelos sensores, identificando possíveis situações indesejadas, e depois enviar sinais tratados a UCE, a fim de se alterar funcionamento dos atuadores para viabilizar aproveitamento adequado da aplicação.

Cada sistema de injeção possui suas particularidades e os detalhes técnicos variam para cada marca, modelo e ano de fabricação, tornando uma solução simples e unificada impossível. Além disso, as grandezas medidas pelos sensores estão correlacionadas e cálculos realizados com base no sinal de alguns sensores são confirmados pelos sinais de outros sensores, possibilitando, assim, a identificação de falhas nestes dispositivos pela UCE. Assim, a alteração desses sinais deve ser feita de maneira coesa para se evitar indicações de erros e falhas pelo sistema de injeção. Falhas desse gênero causam o envio de uma quantidade segura (e elevada) de combustível para combustão com o objetivo de garantir a chegada do veículo a uma oficina para reparo.

O perfeito ajuste e a adaptação do sistema de injeção eletrônica envolvem conhecimentos profundos do sistema em questão, e o objetivo dessa seção é indicar, de maneira geral, possíveis caminhos no desenvolvimento desse tipo de aplicação e adaptação. Para organização de tais informações, foram utilizadas observações em experiências próprias, esclarecimentos com mecânicos, catálogos e consultas técnicas a empresas que comercializam tal tecnologia nos EUA, incluindo D&N Engineering. Dentre os sensores cujas adaptações influenciarão de maneira mais evidente nos parâmetros envolvidos, podemos citar:

Sensor de oxigênio ou sonda Lambda – Sensor responsável por medir os níveis de oxigênio presentes na exaustão. Geralmente atua em controle realimentado (closed-loop) com a UCE, sendo determinante no comando de aumentar ou diminuir os níveis de combustível da mistura. O elemento sensor é feito de material cerâmico de zircônio com eletrodos de platina em sua superfície. Com temperaturas da ordem de 350° C, o zircônio torna-se condutor de íons de oxigênio, e o fluxo destes pelos eletrodos de platina gera uma diferença de potencial elétrico devido à diferença de concentração de oxigênio entre os gases de escape e o ar de referência.

A Figura 52 ilustra detalhe da construção do sensor lambda (NTK, 2011).

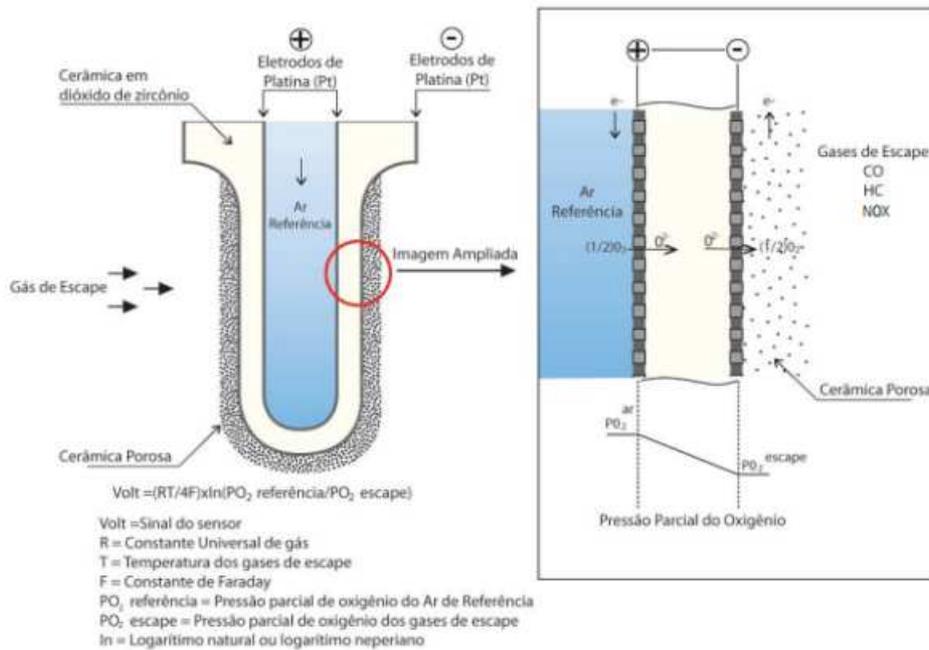


Figura 52: Detalhe de construção da sonda Lambda (NTK, 2011).

Valores de tensão entre 0 e 1 Volt são típicos, indicando altos índices de oxigênio na exaustão em zero Volts e baixos níveis de oxigênio em 1 Volt. Dessa forma, a UCE admite a razão de excesso de ar  $\lambda$  muito alta ou muito baixa de acordo com o nível de tensão que lê da sonda lambda. A Figura 53 ilustra Curva característica básica de uma sonda lambda.

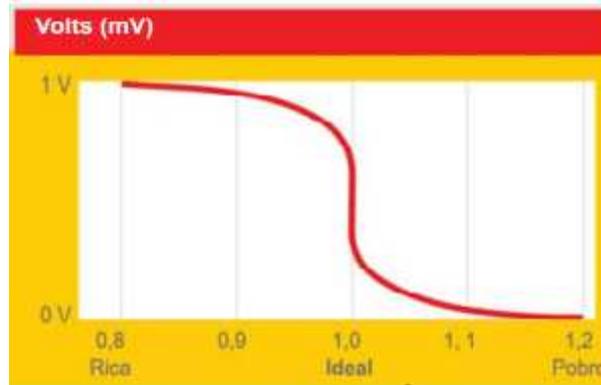


Figura 53: Curva Característica básica de uma Sonda Lâmbda (NTK, 2011).

Pode-se ainda acrescentar que o comportamento do sinal da sonda dá-se em pulsos que variam sua duração de acordo com a rotação de operação, pois a presença de oxigênio na exaustão varia durante os ciclos de admissão e exaustão do motor. Seu comportamento pode ser analisado na figura seguinte:

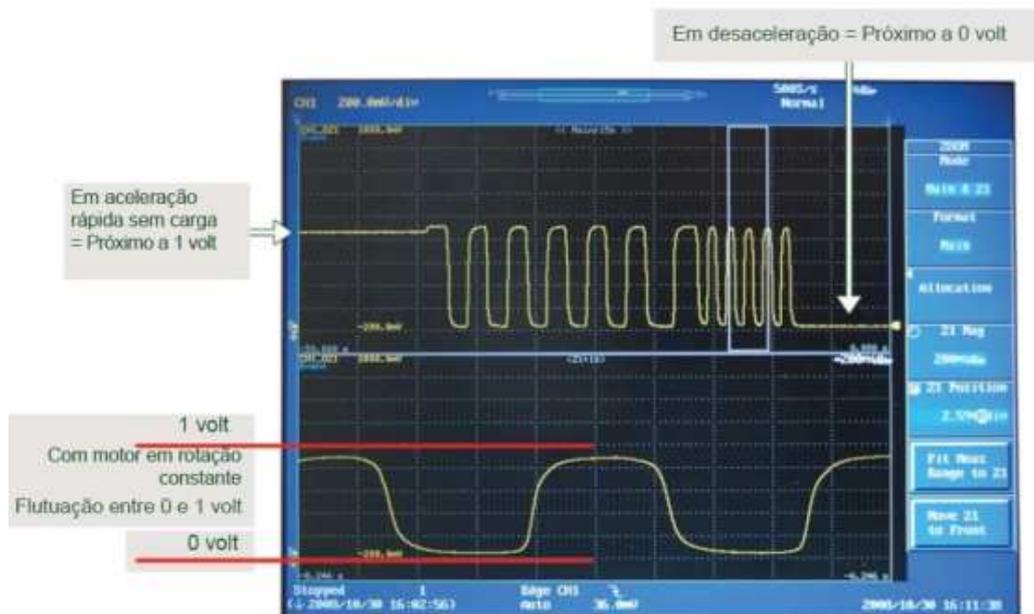


Figura 54: Sinal de operação de uma sonda lambda (NTK, 2011).

Algumas sondas lambda possuem elemento de aquecimento interno para proporcionar temperatura correta o mais rápido possível para funcionamento do dispositivo. São dois os principais tipos de sonda: Sonda tipo “saltos”, que tem seu comportamento descrito na Figura 54; e a sonda de banda larga (5fios) que funciona por corrente e que possibilita a medição de diversos níveis de oxigênio dependendo da corrente gerada indicando com mais precisão a condição dos gases de escape.

Qualquer modificação em sensores de oxigênio deve levar em consideração os princípios de funcionamento e curva característica da sonda em questão. Emuladores de sonda lambda são utilizados em adaptações de veículos para operarem com GNV, e uma solução geral para sondas tipo “saltos” é a manutenção do nível médio da tensão gerada um pouco maior que o ajuste de fábrica, fazendo com que um menor número de sinais de estado lógico “0” chegue até a UCE. Tal efeito pode ser obtido através da inserção de um “offset” no sinal da sonda obtido com dispositivo que possua bateria e nível de tensão acrescido ajustável. A Figura 55 mostra as formas de onda enviadas pelo sensor e informação assumida pela UCE para cada caso:

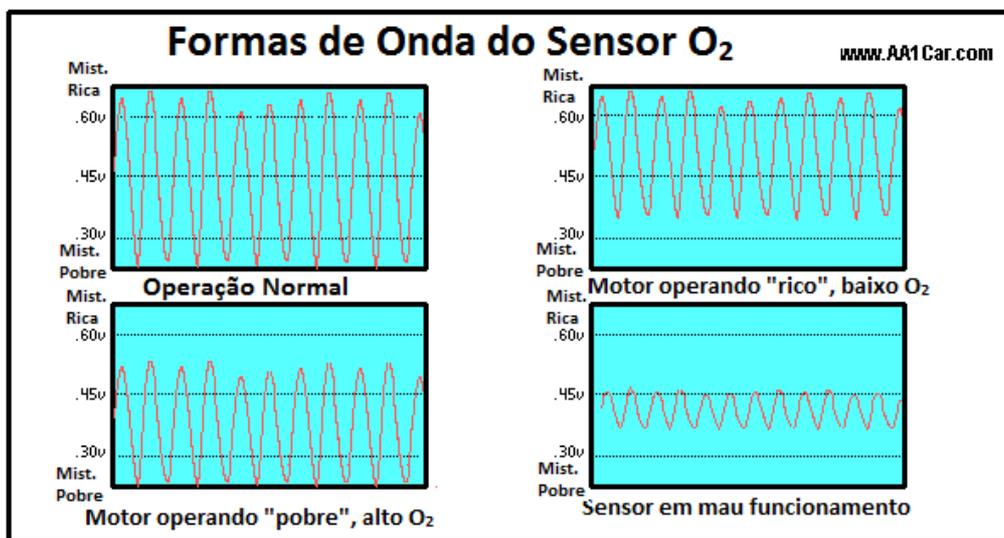


Figura 55: Formas de onda típicas de um Sensor de Oxigênio. Fonte: Traduzido de [www.AA1Car.com](http://www.AA1Car.com)

Uma limitação referente a esse método é que o aumento demasiado no nível médio pode impedir a leitura de estado lógico “0” (baixa tensão) necessário para diagnóstico de bom funcionamento do sensor efetuado pela UCE, causando assim



Assim, o comportamento do sinal enviado à UCE é o mesmo da sonda, e a posição da chave SW1 conectada ao pino 10 do CI pode ser considerada como sinal enviado igual ao sinal lido. A conexão da chave SW1 com o pino 9 permite que o sinal de “1 Volt” seja enviado à UCE quando o valor do sinal da sonda lido for maior que 450 milivolts (decréscimo de 50 milivolts), e a conexão com pino 8 altera esse valor para 400 milivolts e assim sucessivamente pelo pinos do CI até o pino 18. Como a conexão de tais pinos com a chave SW1 é feita até o pino 15, os ajustes possíveis para tensão referência para troca de estado lógico são: 500, 450, 400, 350, 300 ou 250 milivolts. Os potenciômetros VR1 e VR2 auxiliam no ajuste dos níveis de tensão referência de entrada (500 milivolts) e de saída (1 Volt) do circuito.

Como o funcionamento correto da sonda só acontece após seu aquecimento, é necessário que o EFIE mantenha o nível de tensão enviado à UCE em zero até que isso ocorra, caso contrário, ruídos na sonda durante o período de aquecimento podem fazer com que o sinal de saída do EFIE indique 1 Volt. O circuito só começa a liberar sinais de tensão diferentes de zero para a UCE quando um temporizador incorporado o permite. O nível de carga do capacitor C1 define se o sinal de saída será enviado ou mantido em zero Volt. Os resistores R1 e R2 são responsáveis pelo tempo de carga e descarga de C1 respectivamente. Um ajuste desses tempos pode ser possível em diferentes casos devido ao tempo de aquecimento e resfriamento da sonda lambda em questão. Os outros componentes são responsáveis pela proteção e modo de operação do CI, assim como adequação dos níveis de corrente em diferentes pontos do circuito. A chave de “liga e desliga” possibilita o funcionamento normal do sistema de injeção, ou seja, pode atuar como um “bypass” para o EFIE e permitir operação convencional da sonda.

Já para sensores do tipo banda larga métodos de controle de fluxo de corrente devem ser empregados e não foram abordados neste trabalho.

É importante frisar que a modificação do sinal dos sensores de oxigênio permite que um sinal alterado seja enviado à UCE. Tal sinal é utilizado para correção dos níveis de combustível injetado que foram calculados anteriormente de acordo com sinais de outros sensores. Porém a concordância com sinais de outros sensores deve ser atingida para permitir que uma diminuição maior dos níveis de combustível possa ser

alcançada de forma estável por longo tempo. A não adequação dos sinais entre si pode ocasionar perda de eficiência e indicação de falhas, devido à detecção de discordâncias de sinais de sensores.

Sensor de Pressão Absoluta de Coletor ou Sensor MAP – Este sensor possui uma membrana que se deforma à medida que a pressão no coletor se altera, identificando diferenças de pressão. São dois os tipos de sensores MAP, resistivos e capacitivos. Nos sensores resistivos, que são os mais comuns, o cabo do sinal apresenta variações de tensão (0 a 5V) e, nos capacitivos, o sinal apresenta variações de frequência (típicos 80 a 150Hz).

As variações do sinal do sensor são utilizadas pela UCE para auxílio no cálculo das quantidades da mistura e também na alteração do ponto de ignição das centelhas para diferentes rotações. Além disso, assim que se liga a chave do carro, o sensor MAP consegue realizar a leitura da pressão atmosférica local a fim de se ajustar os níveis da mistura, pois o volume de ar necessário varia devido a menores densidades do ar em altitudes elevadas.

Para sensores MAP do tipo resistivos simples, divisores de tensão com potenciômetros podem ser utilizados para se regular o sinal de tensão enviado, porém circuitos eletrônicos mais complexos devem ser utilizados para os sensores do tipo capacitivo para que se ajustem os valores de frequência do sinal. De modo geral, quando um veículo possui um sensor MAP do tipo capacitivo, ele também possui um sensor MAF do tipo resistivo e, dessa forma, o tratamento do sinal do sensor resistivo pode ser suficiente para adequação dos níveis de ajuste.

Medidor de Massa de ar ou Sensor MAF – A maioria dos medidores de massa de ar apresenta sinal com variação de tensão, sendo esta proporcional à massa de ar que flui pelo medidor. Da mesma maneira que os sensores MAP, a adaptação do sinal pode ser feita através de divisores de tensão para sensores que operam por variação de tensão. Já para sensores com frequência variável, a dificuldade é a mesma encontrada para adaptação de sensores MAP.

Os sensores MAP/MAF possibilitam a UCE de escolher uma tabela de inserção de combustível mais moderada para operações um pouco mais pobres, porém

deve ter seus valores compatíveis com os sensores de oxigênio para evitar códigos de falhas. Possuem grande influência no tempo de ignição de centelhas e, de maneira geral, podemos dizer que cargas maiores (vácuo elevado e bastante ar) demandam mais combustível e atrasa tempo de ignição de centelha. Menores cargas demandam menos combustível e adiantam tempo de ignição de centelha.

*Sensor de temperatura de líquido de arrefecimento CTS* – Este sensor é constituído por um termistor NTC (*negative temperature coefficient*), que altera seu valor de resistência elétrica de acordo com variação de temperatura do líquido de arrefecimento. O sinal do sensor corresponde à queda de tensão no elemento sensor, que deve ser alta quando o motor está frio, e tensão baixa quando motor está quente (0 a 5V). Temperaturas mais altas de operação do motor permitem que a UCE utilize menos combustível devido à alta vaporização do combustível nessas condições. Não se deve ultrapassar o valor de acréscimo de 10° C ao valor lido para evitar que a UCE entenda que o motor já está bem quente, quando na verdade está partindo frio. A adaptação pode ser feita ligando resistores em paralelo com os terminais do elemento sensor para diminuir a resistência equivalente do mesmo e assim diminuir a tensão enviada à UCE. Mudanças no sinal do sensor CTS terão pouca influência se o sinal do sensor de temperatura do ar de coletor não for alterado em conformidade com o CTS.

*Sensor de temperatura do ar de coletor IAT* – Este sensor tem o mesmo princípio de funcionamento do CTS, tendo como elemento principal um termistor NTC. Assim para altas temperaturas, o sinal de tensão é pequeno, e para baixas temperaturas, o sinal é maior. Tem influência significativa no ajuste do tempo de ignição de centelhas, que é atrasado caso a temperatura do ar de ar coletor seja alta. Dessa forma a adaptação pode ser realizada com resistores variáveis em paralelo com o devido cuidado de colocar um resistor em série com potenciômetro para evitar curto nos terminais do sensor. Importante observar que o atraso conseguido no tempo de ignição através da modificação do sinal IAT será contrabalanceado pela modificação do MAP/MAF, demandando um ajuste fino entre as alterações dos sensores caso a caso.

Para ajustes de CTS e IAT faz-se indispensável o uso de equipamento de diagnóstico para visualização dos valores de temperatura lidos pela UCE. O uso de tal

equipamento pode ajudar muito no correto ajuste dos sinais dos sensores por permitir a correta visualização das grandezas que a UCE está “lendo” a partir dos sensores. Além disso, algumas ferramentas permitem a visualização de indicadores para alguns sensores, o que facilita, e muito, o ajuste do sistema para que os valores lidos estejam em acordo.

### 3.2.4 Adaptação em Motores Ciclo Otto Carburados

Com o gás combustível suplementar adicionado ao processo de combustão através do sistema de admissão de ar, um melhor desempenho do sistema pode ser obtido através de ajustes da mistura ar, GPE e combustível primário, a fim de se tirar proveito da operação do motor em regimes de alta razão de excesso de ar. O ajuste do tempo de ignição de centelha é devido à queima mais rápida da mistura com a adição de combustível suplementar rico em hidrogênio. O ponto ótimo do ajuste do tempo de centelha é determinado pela composição da mistura.

Em sistemas carburados, o ajuste das razões da mistura ar combustível pode ser atingido através de modificações no carburador. Diversos são os tipos de carburadores disponíveis e ainda mais variados as suas opções de ajuste de razão ar-combustível. Para entendimento básico, podemos dividir o funcionamento de um carburador em dois modos: Baixa rotação e alta rotação. A Figura 57 ilustra o funcionamento de um carburador e corpo simples em baixa rotação.

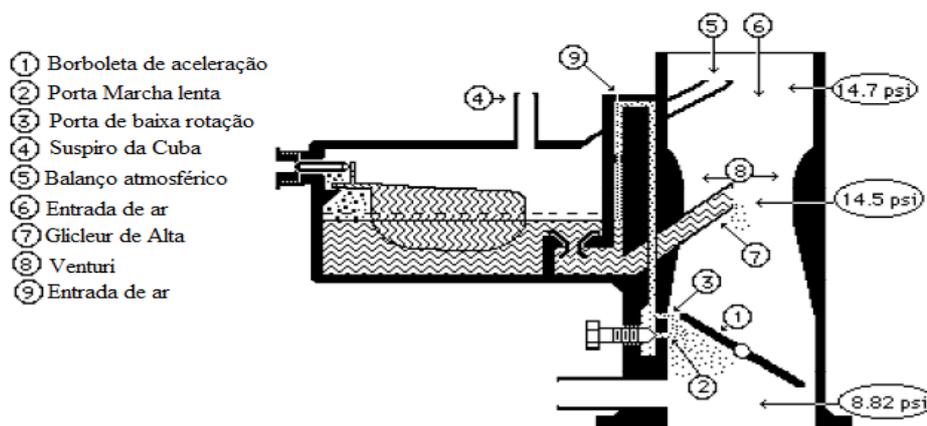


Figura 57: Funcionamento do Carburador - Baixa Rotação. Traduzido e adaptado de (WEISEMAN, 2010).

Quando o motor está em marcha lenta, a borboleta de aceleração está parcialmente fechada, e o combustível, já misturado com um pouco de ar, entra no duto principal do carburador através da porta de marcha lenta. Nesse ponto o combustível já está parcialmente misturado com ar para facilitar vaporização no duto principal, e as razões são definidas geralmente pelos “gicleurs” de ar e de combustível, ambos específicos para marcha lenta. Geralmente ainda podemos encontrar um parafuso de dosagem de marcha lenta que permite ajuste fino dessa quantidade de pré-mistura que será introduzida no duto principal do carburador. Quando a rotação sobe um pouco acima da marcha lenta, um acréscimo dessa mistura entra no duto principal através da porta de baixa rotação e combustível extra é disponibilizado. Observe que a diferença de pressão entre a cuba (14.7 Psi) e o ponto inferior abaixo da borboleta de aceleração (no exemplo 8.82 Psi) é responsável pelo fluxo de ar e combustível, assim como pela vaporização da mistura. A diferença de pressão ocorre devido ao tubo de Venturi presente em todo carburador que exige o aumento da velocidade do ar estrangulado, promovendo, assim as diferenças de pressões.

Quando a borboleta de aceleração é aberta devido ao acionamento do acelerador, o sistema de dutos internos de ar e combustível utilizado é o de alta rotação como ilustrado na Figura 58.

Dessa forma, à medida que aumenta a velocidade do ar que passa no estrangulamento (Venturi) quando o motor acelera, menor é a pressão na porta de alta e conseqüentemente mais combustível será enviado ao duto principal do carburador empurrado pela pressão atmosférica presente na cuba devido ao seu suspiro. O ajuste dessa quantidade de combustível pode ser feita através da troca dos gicleurs de ar e de combustível, ambos específicos de alta rotação.

Portanto, de maneira geral, pode-se alterar a razão de excesso de ar da mistura através da troca de “gicleurs” tanto de baixa rotação quanto de alta rotação. Muitas são as possibilidades de trocas e, para cada veículo e tipo de carburador, a opção mais adequada só será encontrada após experimentações com diversas configurações.

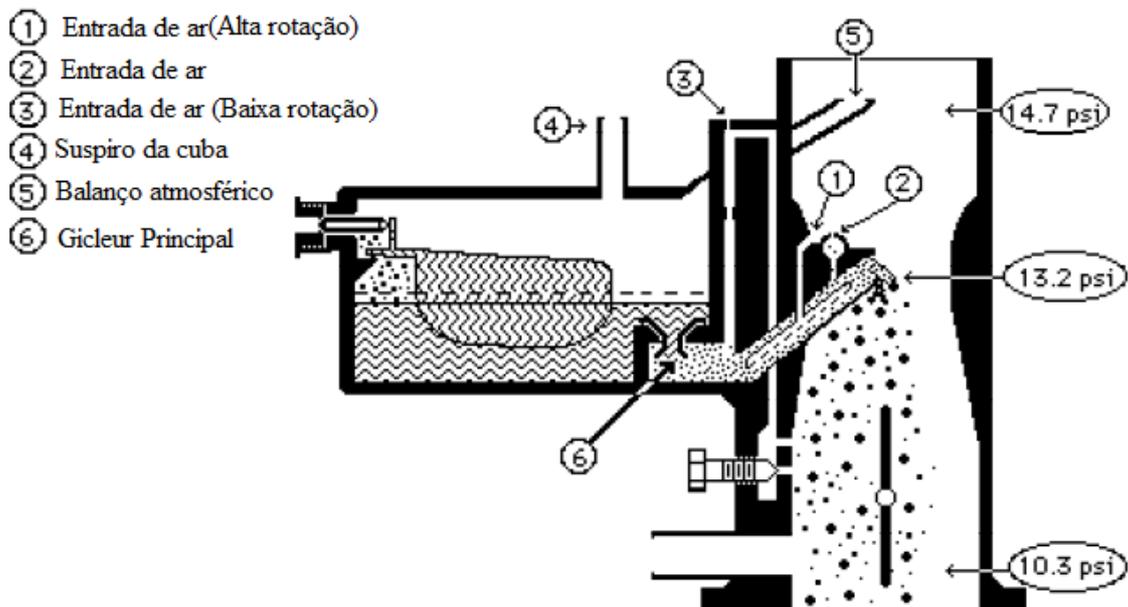


Figura 58: Funcionamento Carburador – Alta Rotação. Traduzido e adaptado de (WEISEMAN, 2010).

Para se alterar o ponto de ignição de centelha em motores carburados, faz-se necessário o ajuste no distribuidor. Para tal alteração, basta soltar o parafuso que prende o distribuidor e girá-lo para mudar o ângulo de disparo das centelhas. Para verificação precisa do ângulo definido de centelha, faz-se necessário o uso de equipamento adequado. A utilização de uma pistola de ponto é o suficiente para alteração do ponto, e experimentações devem ser feitas em cada tipo de motor e sistema para ajuste do melhor ponto operacional de forma prática.

Ganhos relativamente baixos, se comparados ao aproveitamento máximo da adaptação, ainda podem ser atingidos sem modificações dos parâmetros citados. Como a quantidade de gasolina utilizada no motor está diretamente ligada à posição do pedal do acelerador que movimenta a borboleta do carburador para permitir maior fluxo de ar admitido e dessa forma maior admissão de gasolina na carburação, a sensibilidade do motorista pode influenciar no consumo e desempenho do veículo após adaptação realizada. Com a adaptação realizada, as posições de pedal de acelerador podem ser diferentes (menos gasolina e ar) para se vencer os mesmos obstáculos, além de se atingir as velocidades comuns do motorista com menor inserção de gasolina. O aumento dá-se principalmente pela melhor queima de particulados de Hidrocarbonetos

que, em operação normal, seriam expelidos através do escape. Com a adaptação, uma melhor queima da mistura acontece, e a energia proveniente desses particulados é mais bem aproveitada, disponibilizando maior potência e rendimento ao motor.

### **3.3 CONTROLE DA ENERGIA ELÉTRICA FORNECIDA A UM ELETROLISADOR COMPACTO**

A bateria armazena energia elétrica necessária para o início do funcionamento do motor e sistemas diversos. Uma vez o motor funcionando, o alternador faz o papel de fonte elétrica principal para os diversos sistemas do veículo, incluindo o sistema injeção eletrônica e, através de reguladores de tensão e de controle de fluxo de potência, carrega a bateria com a energia elétrica gerada sobressalente.

É de suma importância o correto dimensionamento do alternador e da carga elétrica que será acrescentada no sistema elétrico do veículo para se evitar a sobrecarga, podendo ocasionar no descarregamento rápido da bateria, danos ao alternador/gerador ou diminuição do rendimento global. Se o sistema eletrolisador exigir uma potência elétrica muito grande do alternador, o aumento de eficiência devido ao efeito catalítico da combustão proporcionado pela adaptação pode não ocasionar um aumento de eficiência global devido à carga extra muito grande aplicada ao alternador e, por consequência, ao motor. O grau máximo de eficiência de um alternador refrigerado a ar é de aproximadamente 75%, que, entretanto, regride rapidamente para rotações maiores. Na operação prática, o grau médio de eficiência é de cerca de 55% (Bosch, 2002).

#### **3.3.1 Alternador e Bateria como Fontes de Energia Elétrica**

No gráfico da Figura 59, a seguir, podemos observar as curvas características de corrente e de potência de acionamento de um alternador tipo N1 da Bosch (Bosch, 2002). No eixo vertical, à esquerda, podemos observar a corrente (curva I) disponibilizada pelo alternador para diferentes rotações do mesmo. E no eixo vertical, à direita, podemos observar a potência de acionamento (curva P1), que é a

potência máxima necessária ao motor do veículo para o acionamento do alternador em uma determinada rotação.

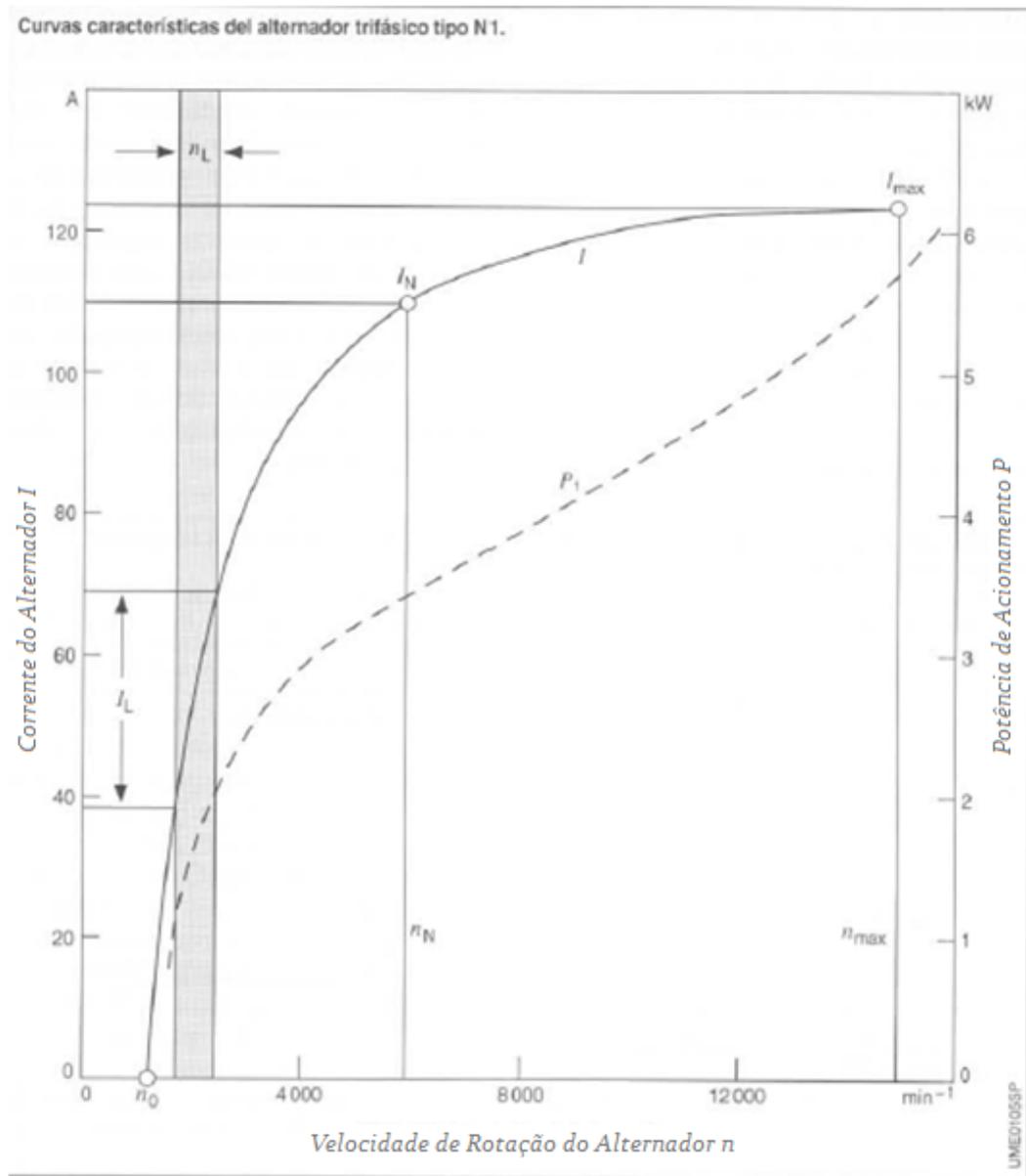


Figura 59: Exemplo de curvas características de Corrente e Potência de Acionamento de um alternador Bosch tipo N1. Fonte: (Bosch, 2002)

Ainda no mesmo gráfico pode-se identificar:

*Rotação com corrente nula* ( $n_0$ ) - rotação do alternador (cerca de 1000 rpm) na qual é atingida a tensão nominal sem liberação de corrente. Somente em rotações mais elevadas, o alternador pode liberar corrente.

*Corrente com motor em marcha lenta ( $I_L$ ) e Rotação com motor em marcha lenta ( $\eta_L$ )* – Nessa rotação, o alternador deve liberar, no mínimo, a corrente necessária para os consumidores permanentes. São indicados no diagrama como uma faixa, pois o valor exato depende da definição da relação de transmissão para o motor a combustão. Valor típico de rotação de  $1800 \text{ min}^{-1}$  para alternadores compactos da Bosch.

*Corrente Nominal ( $I_N$ ) e Rotação Nominal ( $\eta_N$ )* – A rotação nominal na qual o alternador pode liberar sua corrente nominal está em torno de  $6000 \text{ min}^{-1}$ . A corrente nominal deverá ser superior ao exigido pela potência total de todos os consumidores.

*Rotação Máxima ( $\eta_{\max}$ ) e Corrente Máxima ( $I_{\max}$ )* –  $I_{\max}$  é a corrente máxima liberada pelo alternador quando em rotação máxima. Para carros utilitários, esse valor de rotação varia de  $8000 \text{ min}^{-1}$  até  $20000 \text{ min}^{-1}$ .

Pode-se observar que a curva de potência de acionamento é mais elevada quando o alternador está próximo da rotação máxima ou que um traçado mais plano da curva pode ser observado na faixa média de operação. Sendo assim, podemos identificar que, para situações de rotação alta, a carga elétrica adicional referente à adaptação proposta exige potência do motor de maneira mais agressiva do que quando operando em faixas médias de rotação. Porém, em altas rotações, mais potência mecânica está disponível no eixo do motor, o que torna o impacto referente ao acionamento do alternador menos relevante se comparado a situação de baixa rotação.

Quando o alternador se encontra em baixa rotação, por exemplo  $1500 \text{ rpm}$ , a potência máxima de acionamento para uma corrente exigida máxima do alternador de  $40 \text{ A}$  ( $560 \text{ W}$ ) é de aproximadamente  $1,2 \text{ kW}$ , representando uma eficiência de aproximadamente  $46\%$  na transformação de energia mecânica em energia elétrica. Dessa forma, um eletrolisador que exija uma potência de  $140 \text{ W}$  a  $14 \text{ V}$  ( $10 \text{ A}$ ) representaria uma demanda de  $300 \text{ W}$  exigida no eixo do motor. O que na hipótese de considerar disponibilidade de  $10 \text{ kW}$  no eixo de um motor de  $38 \text{ kW}$  ( $52 \text{ cv}$ ,  $1.0$ ) para situações de baixa utilização de combustível, representaria  $3\%$  da potência disponibilizada no eixo.

Porém, em situações de limite do alternador, a relação entre potência liberada pelo alternador e potência de acionamento cai para faixas próximas a 30% e a demanda de potência exigida para o mesmo eletrolisador subiria para 466 W. Assim, para o mesmo cenário acima descrito, uma demanda de 4,6% da potência disponível no eixo do motor seria exigida para acionamento do eletrolisador em questão.

A condição de carga da bateria é outro fator importante, pois, se não for disponibilizada energia elétrica suficiente necessária à carga da bateria, esta irá se descarregar em breve, impedindo a partida do veículo após interrupção de seu funcionamento e ainda podendo prejudicar funcionamento do sistema devido à sobtensão. O ideal é um balanço de carga equilibrado. De maneira geral, para estudo dos fluxos de correntes entre alternador/gerador, bateria e equipamentos elétricos na demanda de potência circunstancial e condições variadas no alternador, pode-se utilizar a seguinte equação (Bosch, 2002):

$$I_G = I_W + I_B \quad (19)$$

Onde:

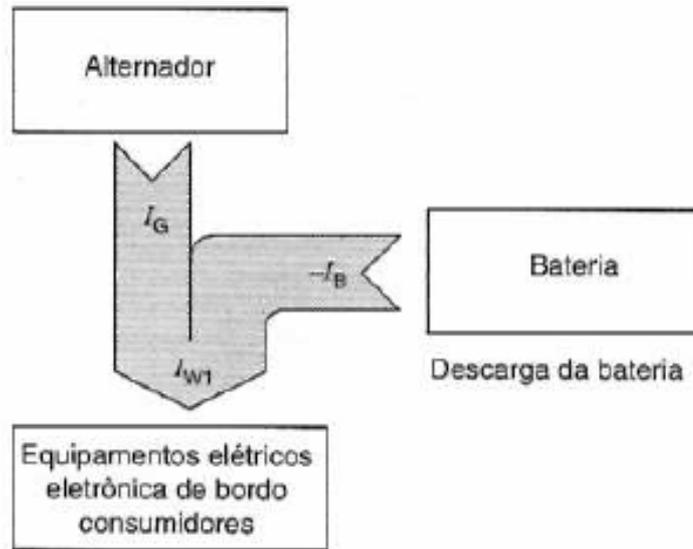
$I_G$  - corrente do alternador/gerador (A)

$I_W$  - corrente dos equipamentos (A)

$I_B$  - corrente na bateria, podendo ser positiva ou negativa, essa sendo carregada ou descarregada (A)

Figura 60 ilustra as condições favoráveis e desfavoráveis referentes:

Condição desfavorável: baixa rotação do alternador



Condição favorável: valores médios ou alta rotação do alternador

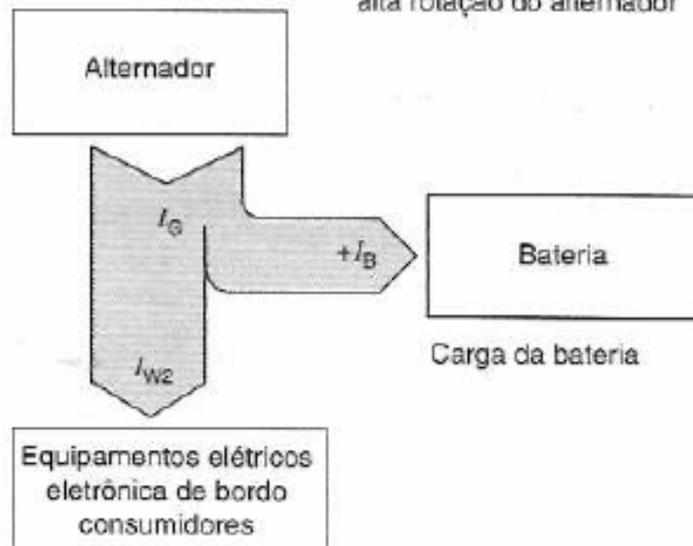


Figura 60: Condições de carga e descarga da bateria do veículo. Fonte: (Bosch, 2002).

Com o aumento da demanda de energia devido à instalação de um consumidor adicional, pode ser mais conveniente a substituição do alternador por um

modelo mais potente que permitiria a operação em uma faixa mais adequada de grau de eficiência compensando a influência de maior peso do alternador a ser instalado.

Para verificação do balanço de carga de um sistema de bordo de um veículo, devemos relacionar todos consumidores instalados com a respectiva absorção de potência e respectivo fator operacional (contínua, curta e longa duração). A Tabela 4 mostra exemplo de Demanda de Potência em um Gol -96, Gasolina, onde se encontra instalado um alternador Bosch K1 – 14V 20/45A.

Tabela 4: Exemplo de Demanda de Potência em 14V ( Gol – 96)

<b>Dispositivos e Equipamentos Elétricos</b>	<b>Potência Real (W)</b>	<b>Fator de Operação</b>	<b>Potência Avaliada (W)</b>
Sistema de ignição	30	1,00	30
Rádio	20	1,00	20
Farol baixo	110	1,00	110
Lanternas	30	1,00	30
Ventoinha de ventilação	80	0,50	40
Limpador de pára-brisas	60	0,25	15
Ventoinha do radiador	180	0,20	36
Adicional farol alto	150	0,10	15
Luzes de freio	45	0,10	5
Luzes de sinalização	45	0,10	5
<b>Consumidores- Curta duração</b>			<b>115</b>
<b>Consumidores - Contínuos</b>			<b>190</b>
<b>Total</b>			<b>305</b>

Consultando tabela (Bosch, 2002), verifica-se que o modelo de alternador suporta até 450W de Demanda de Potência Total. Sendo assim, o limite de Potência de um novo consumidor no sistema do veículo citado seria um equipamento de 145W de potência. A ilustra tabela usada:

Tabela 5: Corrente Nominal do alternador sugerida pela Bosch para diferentes faixas de potência do sistema. (Bosch, 2002)

Corrente Nominal do Alternador					
<b>P<sub>w</sub></b> (em 14 V) W	350 < 450	450 < 550	550 < 675	675 < 800	800 < 950
<b>I<sub>n</sub></b> A	45	55	65	75	90

Outro método é ainda sugerido na apostila Bosch para garantir carga suficiente na bateria mesmo em percursos curtos na faixa de rotação marcha lenta. A corrente liberada pelo alternador em marcha lenta  $I_L$  deve estar no mínimo em um fator de 1,3 acima da corrente exigida pelos consumidores contínuos. No exemplo sugerido, a corrente exigida pode ser calculada através da demanda de potência dos consumidores contínuos e do nível de tensão do sistema (14 V) através das equações:

$$I_{w1} = \frac{P_{w1}}{14V} \quad (20)$$

$$I_L > 1,3 \cdot I_{w1} \quad (21)$$

Onde:

$I_{w1}$  – Corrente Elétrica exigida pelos consumidores contínuos e de longa duração (A).

$P_{w1}$  – Potência Elétrica exigida consumidores contínuos e de longa duração (W)

$I_L$  – Corrente Elétrica liberada pelo alternador operando em marcha lenta(A).

Assim teríamos uma corrente  $I_{w1}$  de 13,6A que, multiplicada pelo fator de 1,3, resulta em 17,6A. O alternador instalado tem um valor de corrente liberado em 1800 rpm de no mínimo 20A especificado em sua placa de identificação, que, na prática, é aumentado devido à rotação em marcha lenta superior a 1800 rpm. Aqui vale

lembrar que, apesar de um motor operando em marcha lenta tenha rotação menor que a sugerida, o sistema de correias que alimenta mecanicamente o alternador proporciona a ele tal rotação. Sendo assim, com uma operação de marcha lenta do veículo exemplo, com alternador girando em torno de 1900 rpm, e fazendo estimativas com base em curvas características de alternadores encontradas, temos que uma corrente  $I_L$  de aproximadamente 32A será liberada pelo alternador para essa rotação, satisfazendo a condição da equação 24. Ainda utilizando esses valores, podemos calcular a corrente máxima que pode ser exigida pelos consumidores contínuos com operação de marcha lenta:

$$I_{w1m\acute{a}x} = \frac{I_L}{1,3} \quad (22)$$

Temos, então, que  $I_{w1m\acute{a}x}$  é de 24,6 Ampéres, e uma carga que exija corrente de até 11A pode ser ainda adicionada ao sistema, sem causar descarga da bateria em trechos curtos com operação em marcha lenta. Obviamente esses são limites operacionais do sistema elétrico do veículo e, quanto menor for o gasto do eletrolisador no que diz respeito à energia elétrica consumida por volume de gás gerado, melhor será a eficiência geral do sistema.

Vale ainda ressaltar que diversas situações de tráfego podem ser desfavoráveis para a manutenção do sistema, como exemplo, situação de emergência com pisca alerta ligada, faróis de neblina adicionais e operação do motor em baixa rotação. Contudo, os ajustes realizados durante instalação devem levar em conta o cenário de o motor operando apenas com combustível primário com a finalidade de se evitar mau funcionamento do motor na ausência de combustível suplementar GPE.

### **3.3.2 Modulação por Largura de Pulso para controle da Corrente Elétrica Média**

Circuitos eletrônicos podem ser desenvolvidos e aplicados para melhor controle da energia elétrica entregue aos eletrolisadores, possibilitando uma melhor eficiência energética com a redução dos níveis de corrente necessários, e também variação nos volumes de produção de GPE.

Um eletrolisador, por si só, apresenta características de carga variável. Uma vez que, à medida que a temperatura de operação sobe devido ao efeito joule provocado pela corrente que circula pelo eletrolisador, temos que, a uma tensão constante, o valor de corrente elétrica que circula pelo eletrolisador também sobe devido à menor resistividade da solução eletrolítica em maiores temperaturas. Dependendo dos níveis de concentração da solução eletrolítica utilizada, esse comportamento pode resultar em aumento contínuo de temperatura no eletrolisador, ocasionando produção demasiada de vapor de água, além de danos no dispositivo, se operado por longo período, podendo chegar até a sua destruição.

A principal finalidade da aplicação de um circuito modulador por pulsos como controlador da unidade geradora de GPE em veículos é a limitação de corrente. Com o controle de limites da corrente, é possível se estabelecer uma operação adequada evitando o superaquecimento da célula e, por consequência, aumentando a eficiência do processo. Para se atingir tal objetivo, é necessário um PWM com controle de limitação automática de corrente ou CCPWM (Constant Current Pulse Width Modulator). É importante ressaltar aqui a diferença entre um simples PWM e um CCPWM, pois, com um PWM convencional, seria necessário alterar a tensão média aplicada manualmente uma vez que, no CCPWM, a alteração da largura dos pulsos faz-se de forma automática, diminuindo a tensão média aplicada à carga para manter a corrente num limiar superior constante. A Figura 61 ilustra o CCPWM utilizado para controle da eletrólise.

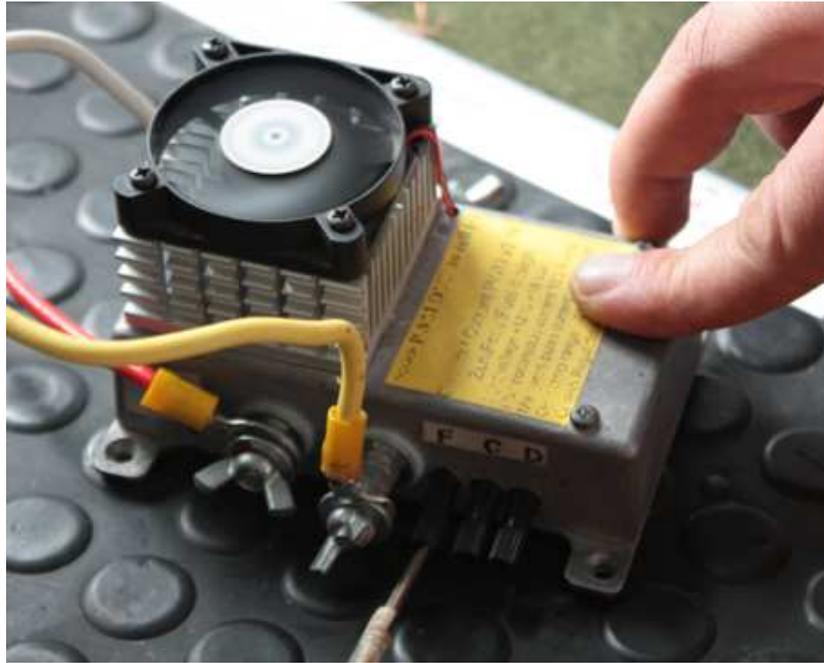


Figura 61: CCPWM utilizado em testes

Na figura anterior, podemos observar a presença de três ajustes:

- F (frequência) – Permite o ajuste da frequência dos pulsos a serem aplicados.
- C (corrente máxima) – Permite o ajuste da Corrente Máxima.
- D (*duty cycle* ou ciclo ativo) – Permite o ajuste da Largura de Pulso a ser aplicado em relação ao período ajustado pelo ajuste de frequência. Define a porcentagem de transferência de potência.

O ajuste do nível máximo de corrente é feito colocando o eletrolisador em funcionamento, alimentado pelo CCPWM e girando o ajuste de corrente no sentido anti-horário, até que a corrente medida na saída do controlador comece a diminuir. Dessa forma, fica definido o valor de corrente máxima, e qualquer acréscimo de corrente que ocorra, será compensado com diminuição do parâmetro “*duty cycle*” de forma automática, diminuindo a largura dos pulsos de tensão entregues à carga e, conseqüentemente, a tensão média aplicada, resultando na diminuição da corrente para o nível ajustado. O ajuste se torna enormemente facilitado com o auxílio de um osciloscópio para observação da forma de onda aplicada.



Além de proporcionar solução, através da limitação da corrente, ao efeito térmico cascata que pode ocorrer em eletrolisadores operando com concentrações elevadas de eletrólito, o controle da tensão média que será aplicada à carga torna possível dimensionar eletrolisadores que operem em tensões menores que a do sistema de bordo do veículo e ainda variar a tensão média aplicada, assim como a frequência dos pulsos empregados. Dessa forma, uma ampla gama de novos estudos e experimentos podem ser realizados utilizando circuitos CCPWM com o intuito de otimizar a eficiência de sistemas eletrolisadores.

Um exemplo de verificação de carga de bateria foi realizado, com uso de alicate amperímetro, para melhor ilustrar as situações pertinentes. A Tabela 6 ilustra medições de corrente cedida pelo alternador, consumida pelo eletrolisador, consumida por outros sistemas com e sem acionamento da ventoinha de arrefecimento e a corrente sobressalente responsável por carregar a bateria. O eletrolisador em questão teve corrente de operação ajustada através de CCPWM para 8,5 A.

Tabela 6: Medições de fluxo de corrente elétrica do sistema

<b>Corrente (A)</b>	<b>Marcha Lenta</b>			<b>2500 rpm</b>		
	<i>Cedida pelo Alternador</i>	3,6	12,1	21,5	4,6	12,6
<i>Consumida pelo eletrolisador</i>	0	8,6	8,3	0	8,6	8,5
<i>Consumida por outros sistemas</i>	2,5	2,5	12,0	3,0	3,0	12,0
<i>Ventoinha Ligada</i>	Não	Não	Sim	Não	Não	Sim
<i>Carga na bateria</i>	1,1	1,0	1,2	1,6	1,0	1,1

A primeira coluna de medições ilustra a situação onde apenas o consumo por consumidores permanentes está associado. A corrente que flui do alternador para a bateria depende da situação de carga da bateria, que, quando realizadas as medições,

aparentava boa situação de carga ilustrada pela pequena corrente exigida pela bateria (1,1 A). O alternador em questão é o K1 da Bosch que tem valores nominais de 23 A para marcha lenta e 40 A para rotação nominal.

Observe que, para todas as situações medidas, sempre houve fluxo de corrente do alternador para a bateria, aquele liberando mais corrente à medida que outras cargas entram no sistema. Na pior hipótese medida, que inclui eletrolisador e ventoinha de arrefecimento ligada, a corrente exigida no alternador chega a 21,5 A, valor próximo ao valor nominal, especificado pelo fabricante para regime de marcha lenta. Dessa forma, qualquer carga extra como faróis, por exemplo, pode levar o alternador a operar em situação além das nominais, ainda que por pouco tempo, podendo ocasionar em defeitos futuros do mesmo ou descarga precoce da bateria.

Porém, para situações de rotação nominal, ainda se verifica amplo limite de cargas a serem adicionadas no sistema.

### **3.4 ANÁLISE DA CONCENTRAÇÃO DE GASES NA EXAUSTÃO DE UM GOL CARBURADO CHT 1996**

Foi realizada instalação de sistema de produção e adição de GPE em um Gol modelo I, ano 96, 1.0L, gasolina, com a finalidade de se verificar a variação dos produtos da combustão com a adição de GPE no processo de combustão. A inserção do GPE produzido em demanda deu-se através da tomada de ar no carburador responsável pela conexão com a válvula de acionamento de entrada de ar quente do filtro de ar.

A Figura 63 ilustra como foi feita a instalação para realização do teste.



Figura 63: Instalação do sistema de Produção e adição de GPE utilizado

A Figura 64 ilustra detalhe do ponto de inserção escolhido para as medições.

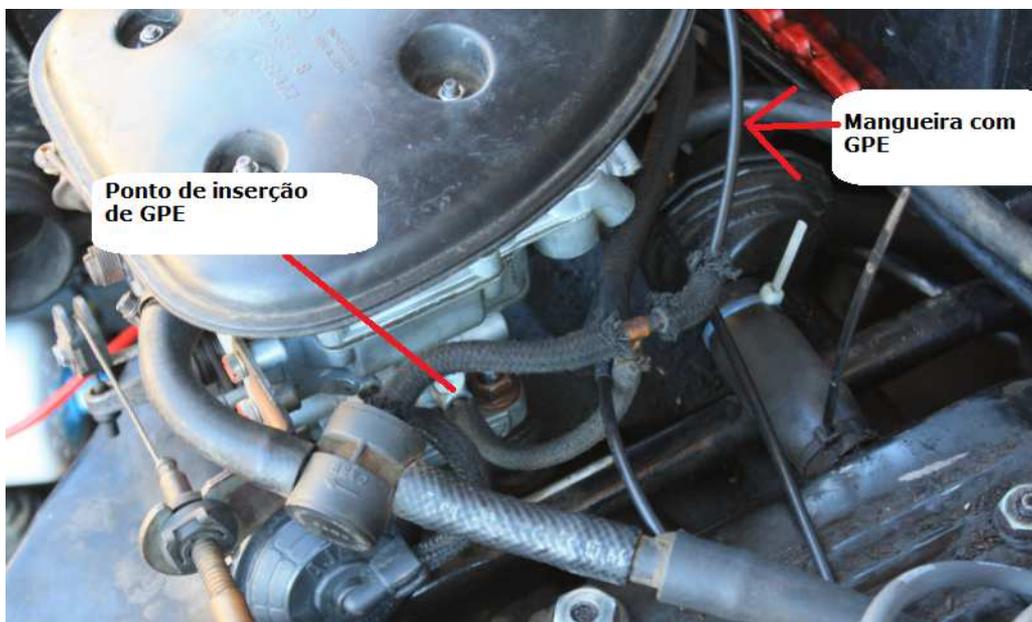


Figura 64: Detalhe do ponto de inserção de GPE através do carburador

O eletrolisador utilizado foi o “mighty-mite”, e a solução eletrolítica utilizada foi o E-22 com 20% de concentração mássica. Foi utilizado um controlador CCPWM para ajuste de corrente máxima em 7 A. A Tabela 7 descreve os principais parâmetros de operação do eletrolisador em questão e foi levantada através de testes de bancada, realizados para determinar os principais parâmetros de funcionamento.

Tabela 7: Parâmetros de operação do eletrolisador

Eletrólito utilizado		E-22
Concentração mássica	(%)	20
Produção de GPE	(ml/min)	300
Produtividade	(ml/W.min)	3,73
Corrente de operação	(A)	7
Tensão Média	(V)	11,5
Potência elétrica exigida	(W)	80,5
Frequência de operação PWM	(Hz)	1000

A análise dos gases de exaustão foi realizada na empresa CEITEC, localizada em Pouso Alegre e credenciada pelo IMETRO para vistoria veicular. Ambos os testes realizados seguiram o procedimento exigido por normas referentes. O ensaio é realizado conforme CONAMA 418 e instrução normativa n° 6 do IBAMA. As medições realizadas durante ensaio foram rotação do motor, concentrações de HC (hidrocarbonetos não queimados) em PPM (partículas por milhão), CO (monóxido de carbono) em porcentagem e CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) em porcentagem.

### 3.4.1 Resultados e Discussões

Os resultados obtidos são demonstrados na Tabela 8. A faixa de rotação em marcha lenta admitida para realização dos testes é de 600 a 1200 rpm e estável com variação máxima de 100 rpm. Para regime acelerado, a rotação é de 2500 rpm com tolerância de 200 rpm. As colunas HCc e COc representam os valores de concentração de HC e CO corrigidos conforme descrito a seguir.

Tabela 8: Análise de Gases da combustão

	Rotação	HC	CO	CO <sub>2</sub>	HCc	COc	F. diluição
SEM GPE	1140	299	3,92	10,5	310	4,07	1,04
	2400	296	3,95	11,7	296	3,95	0,96
COM GPE (7A)	924	318	3,88	9,7	349	4,26	1,1
	2544	279	3,26	12,3	279	3,26	0,96

O fator de diluição presente na tabela é determinado no processo de medição e tem como objetivo diminuir a influência no teste de qualquer falha no sistema de escape que permita entrada de “ar falso”, ou saída de gases pelo escapamento. O fator é calculado levando em conta que o somatório das concentrações de CO e de CO<sub>2</sub> deve ser de 15% para um motor a gasolina em bom funcionamento e, através das medições realizadas, calcula-se esse fator de correção através da equação:

$$F_{diluição} = \frac{15}{\%CO_{med} + \%CO_{2med}} \quad (23)$$

Onde:

$F_{diluição}$  é o fator de diluição a ser calculado.

$\%CO_{med}$  é a concentração de CO medida durante o teste.

$\%CO_{2med}$  é a concentração de CO<sub>2</sub> medida durante o teste.

Dessa forma, calculam-se os índices de HC e CO corrigidos (HCc e COc), que são os índices utilizados para comparação com limites exigidos pelas normas referentes, segundo as equações:

$$CO_c = F_{diluição} \cdot \%CO_{med} \quad (24)$$

$$HC_c = F_{diluição} \cdot HC_{med} \quad (25)$$

Para fatores de diluição menores que “um”, utiliza-se o valor unitário para o fator de correção.

Os resultados obtidos podem ser comparados observando-se os gráficos, a seguir, ilustrados. A Figura 65 mostra a concentração de HC. A Figura 66 ilustra concentrações de CO. A Figura 67 ilustra concentrações de CO<sub>2</sub>, e a Figura 68 ilustra as variações encontradas entre os testes com e sem adição de GPE, conforme descrito anteriormente.

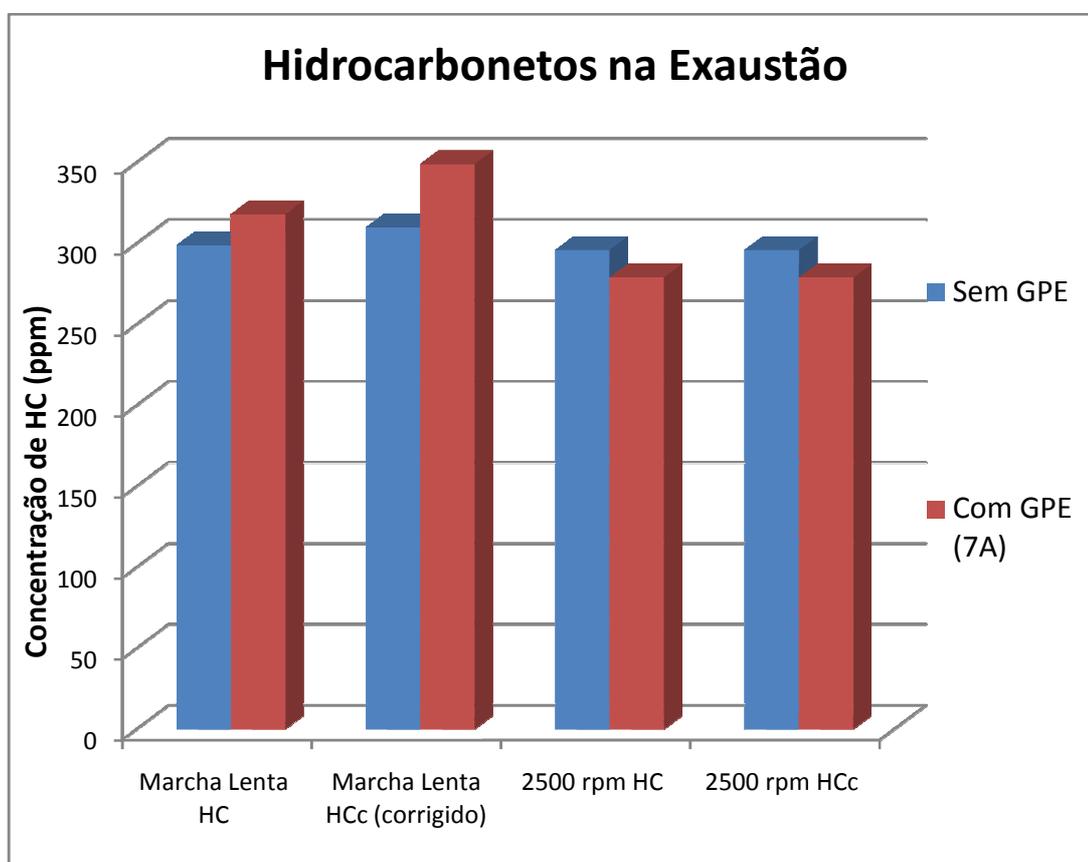


Figura 65: Concentrações de HC na exaustão.

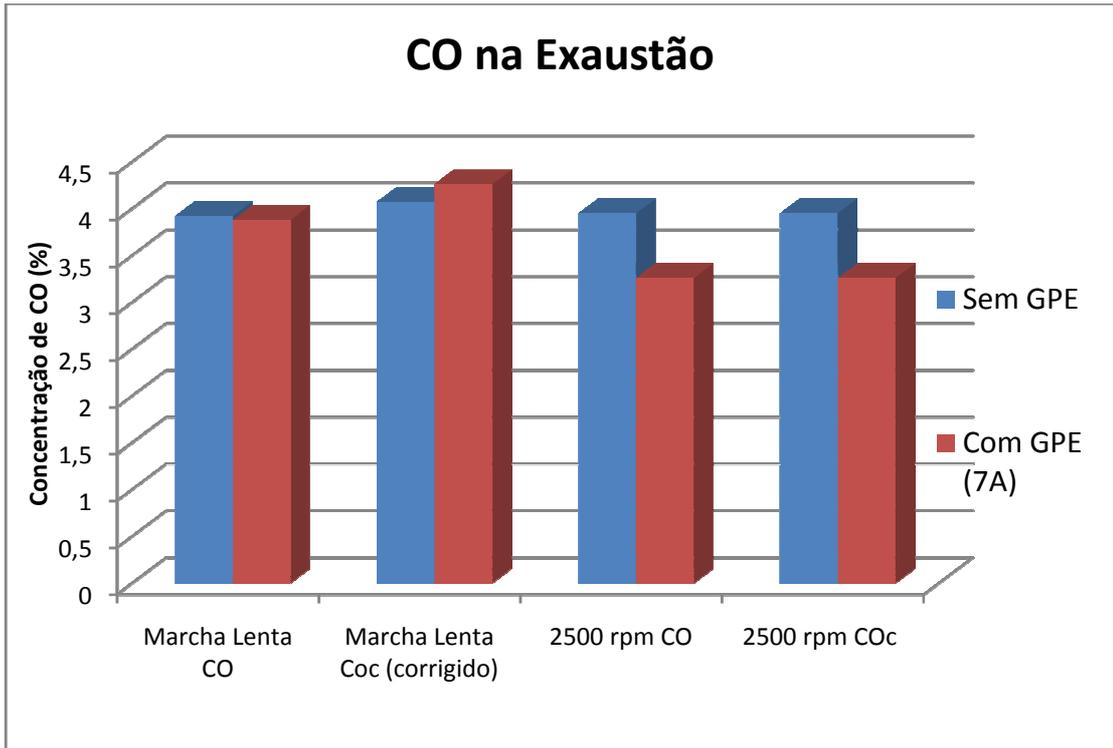


Figura 66: Concentrações de CO na exaustão.

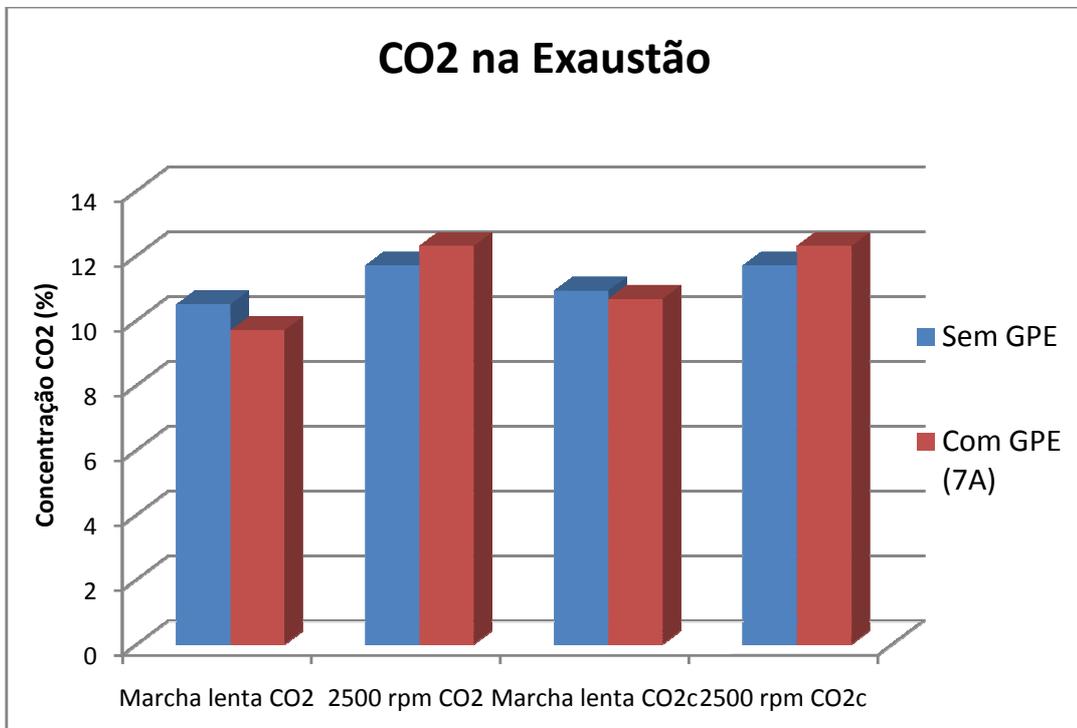


Figura 67: Concentrações de CO<sub>2</sub> na exaustão.

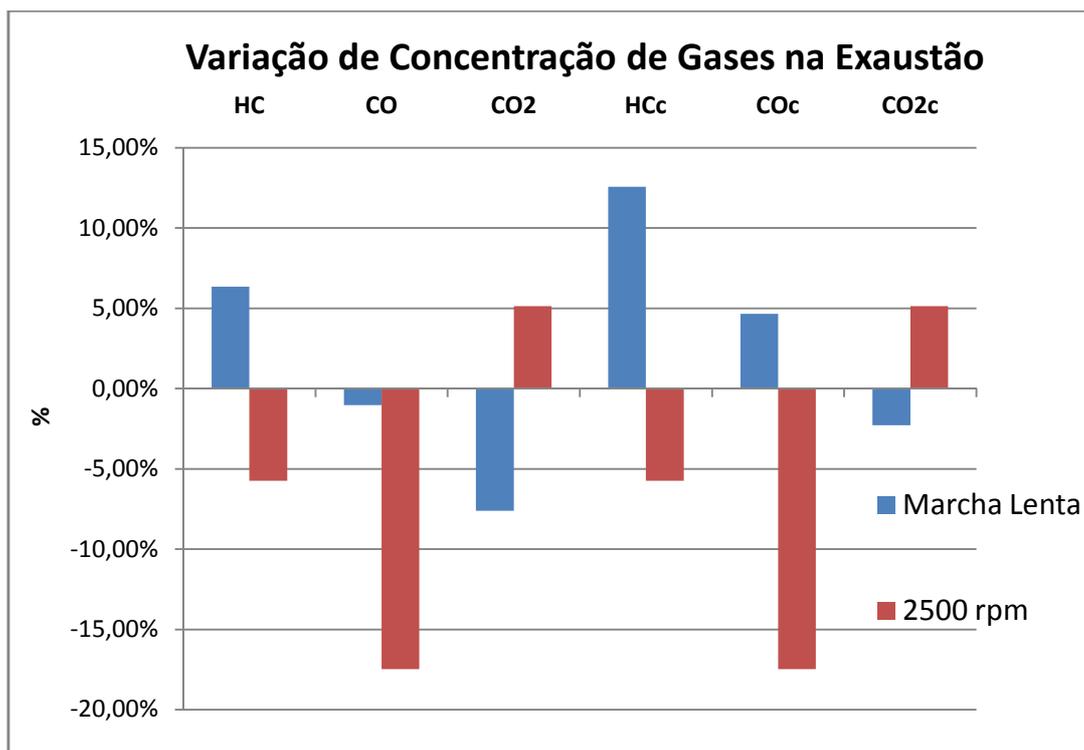


Figura 68: Variação de concentração de gases na Exaustão.

De maneira geral, podemos observar que, para o regime de marcha lenta e considerando as concentrações corrigidas, as alterações realizadas apresentaram um aumento relativo de 12,5% em concentração de HC e de quase 5% em concentração de CO. Tais valores geram indicativo de que um melhor ajuste da mistura e/ou escolha diferente de ponto de inserção faz-se necessário. A diminuição de rotação pode ter sido causada pela falta de oxigênio na mistura, que era aspirado através da válvula reguladora presente na tampa do filtro de ar e eliminada para realização do teste com GPE. A substituição de uma entrada de ar no carburador, ainda que restrita (válvula reguladora), pela entrada de GPE produzido, ocasionou uma riqueza de mistura muito alta, causando diminuição de rotação e aumento de HC e CO na exaustão. A diminuição dos valores de CO<sub>2</sub> se explica devido à ausência de O<sub>2</sub> impossibilitando a oxidação do CO.

Mesmo com a operação em regime de marcha lenta depreciada com as alterações, diminuições nas concentrações de HC (5,7%) e de CO (17,4%) indicam uma melhor aproveitamento da energia para regimes de rotação elevada (2500 rpm) quando se adiciona o GPE.

A experimentação realizada gerou indicativo de que ajustes de parâmetros de funcionamento do motor e diferentes pontos de inserção de GPE devem ser explorados em busca de devida operação em regime de marcha lenta. Outro indicativo gerado foi que, mesmo com ajuste indevido na operação do motor, reduções significativas nas concentrações de HC e CO podem ser alcançadas com a adição de GPE no processo de combustão.

### **3.5 ENSAIO EM GRUPO GERADOR OPERANDO COM ADIÇÃO DE GPE**

Em busca de uma melhor análise do desempenho de motores com adição de GPE, foram realizados ensaios em grupo gerador operando de maneira convencional e, posteriormente, operando com adição de GPE através do sistema de admissão de ar. Cargas elétricas foram então sendo conectadas ao alternador. Dessa forma, se é possível realizar análise comparativa dos dados obtidos e comparar os dois modos de operação.

#### **3.5.1 Descrição dos elementos do Ensaio**

O grupo gerador utilizado foi o S1200 da Pramac Lifter, constituído de um motor quatro tempos Honda e um alternador trifásico Mecc Alte.

A Figura 69 ilustra o grupo gerador utilizado:



Figura 69: Grupo gerador utilizado.

A tabela 9 descreve os principais parâmetros de operação do alternador trifásico. A tabela 10 descreve os principais parâmetros de operação do motor.

Tabela 9: Alternador Mecc Alte

ALTERNADOR Mecc Alte trifásico	
Potência	12 kVA
Tensão	220 V
Corrente	36,5 A
Rotação	3600 rpm
Número de Pólos	2

Tabela 10: Motor Honda GX 620

MOTOR Honda GX620	
Combustível	Gasolina Comum
Tipo	4 tempos, dois cilindros em V
Cilindrada	614 cm <sup>3</sup>
Diâmetro x curso	77x66 mm
Sistema de Ignição	Ignição transistorizada com magneto
Ponto de Ignição	20° A.P.M.S.
Potência máxima	14,9 kW (20 cv) a 3600 rpm
Consumo de Combustível	313 g/kW.h

Para realização da medição de consumo de gasolina, foi utilizada uma proveta conectada a um registro de três vias, assim como um cronômetro para medição do tempo decorrido. A Figura 70 ilustra a proveta e o cronômetro utilizados:



Figura 70: Proveta graduada e cronômetro utilizados para medição de consumo de gasolina.

Uma bancada equipada com disjuntores para variação de carga composta de lâmpadas incandescentes e medidor de grandezas elétricas em sistema trifásico. A Figura 71 ilustra bancada utilizada.



Figura 71: Bancada de ensaios de geradores.

O multimedidor trifásico utilizado foi da marca Kron, modelo MKM – C capaz de medir grandezas como Tensão de fase e de linha, Correntes por fase, Potência ativa, Potência Reativa, Potência Aparente, Fator de Potência e frequência. A Figura 72 ilustra detalhe do medidor em questão.



Figura 72: Multimedidor Trifásico utilizado.

O eletrolisador utilizado para produção de GPE durante o ensaio é ilustrado na Figura 73, assim como o controlador CCPWM empregado no controle de transferência de potência da fonte para o eletrolisador. Uma fonte externa foi utilizada para alimentar o eletrolisador durante os testes. Para monitoração dos parâmetros de operação do eletrolisador, foram utilizados dois voltímetros, um diretamente no eletrolisador e outro monitorando tensão de entrada do CCPWM, um alicate amperímetro monitorando corrente média DC entregue ao eletrolisador e um termômetro de haste utilizado para medir a temperatura da solução no início e fim do teste.

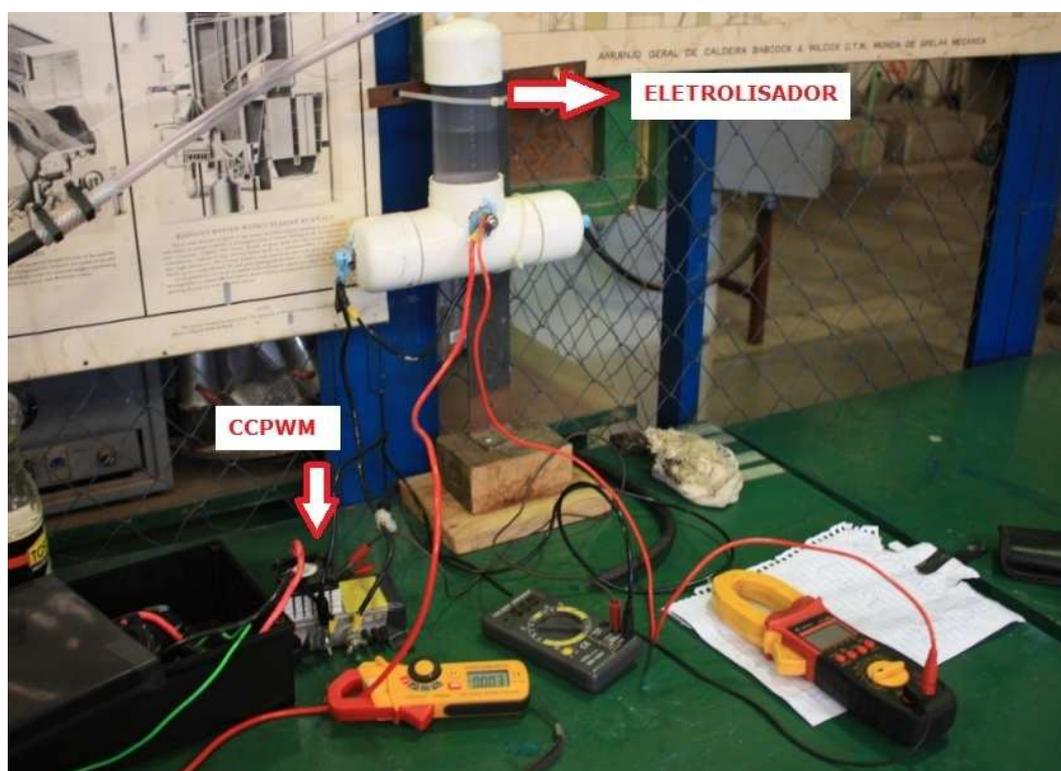


Figura 73: Eletrolisador, Fonte, CCPWM, Multímetros e Alicate Amperímetro

O ponto de inserção de GPE no processo de combustão através de adaptação no filtro de ar pode ser observado na Figura 74. Foram utilizadas duas válvulas de segurança como a destacada na figura.

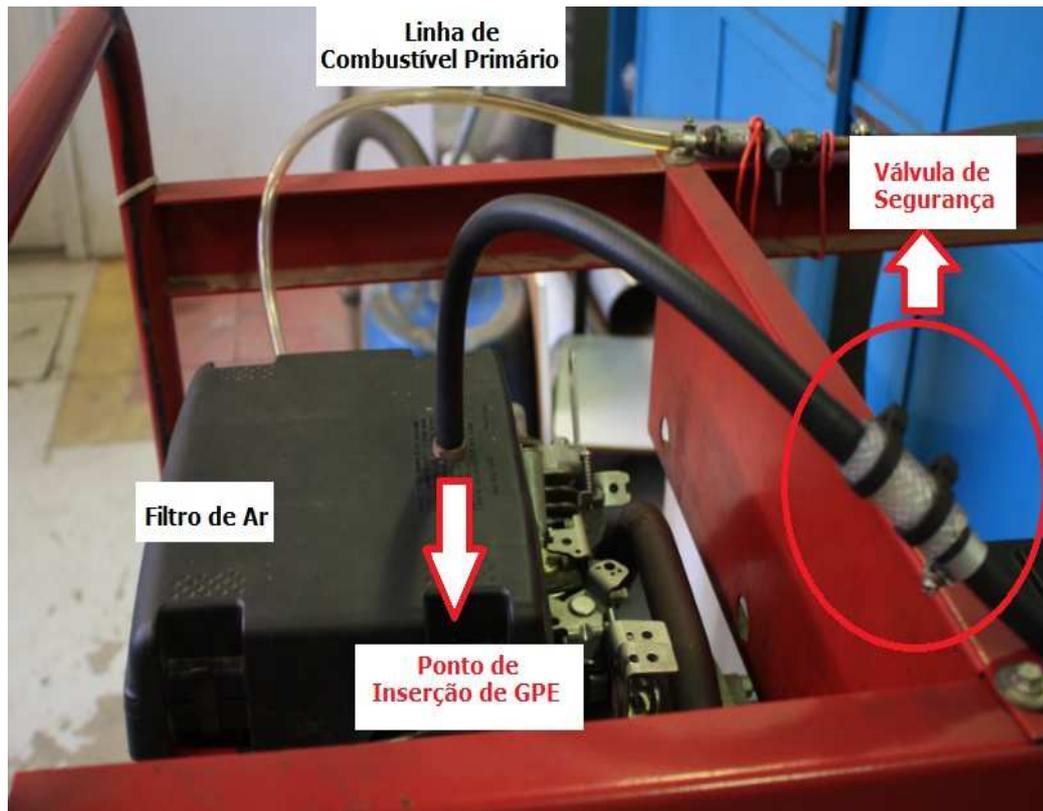


Figura 74: Detalhe do sistema de inserção de GPE.

Para determinação da quantidade de GPE inserido no processo de combustão, foram realizados testes de produção em diferentes níveis de potência transferida ao eletrolisador controlada pelo CCPWM. A medição do volume de gás produzido foi realizada através de recipiente com graduação de 500 ml inicialmente, como mostra a Figura 75.

A monitoração de Tensão e Corrente entregues ao eletrolisador foi realizada através de multímetro e alicate amperímetro. A temperatura de operação da solução eletrolítica inicial e final também foi medida através de termômetro de haste. Dessa forma, ao se monitorar tensão e corrente entregues ao eletrolisador assim como sua temperatura de operação, pode-se obter um valor aproximado de GPE entregue ao motor, através de medição dessas grandezas durante os testes no grupo gerador.



Figura 75: Recipientes utilizados na medição de GPE produzido.

### 3.5.2 Metodologia do Ensaio

Realizaram-se testes em quatro situações diferentes. Uma sem adição de GPE, com o motor operando somente com combustível primário, e outras três situações com adição de GPE em três diferentes taxas de produção por meio de controle de potência transferida ao eletrolisador (CCPWM). Em cada uma delas, foram conectadas ao alternador cargas elétricas de diferentes potências, comutadas através de disjuntores. Para cada situação, foram realizados três testes e os valores discutidos são fruto da média dos resultados obtidos.

Antes ou depois de cada sequência de três testes realizados no grupo gerador, realizaram-se testes do sistema de produção de GPE e monitoramento das grandezas envolvidas para determinação de taxa de produção e produção específica de GPE, assim como potência entregue ao eletrolisador e temperatura de operação do eletrolisador. Para confecção da Tabela 11, que descreve os principais parâmetros de operação do sistema de Produção de GPE empregado no ensaio, foram utilizados

dados de tensão e corrente entregues ao eletrolisador, temperatura de operação, assim como volume produzido e tempo decorrido para sua produção.

Tabela 11: Principais Parâmetros de operação do Sistema de Produção de GPE

<b>Corrente ajustada</b>	<b>5,5 A</b>	<b>6,5 A</b>	<b>7,5 A</b>
Potência exigida (W)	55	70	80
Taxa de produção (ml/min)	205	275	310
Produção específica (ml/W.min)	3,74	3,81	3,83
Temperatura de operação (°C)	40 a 50	40 a 50	50 a 60

Como as experimentações realizadas em veículos apresentaram alterações de funcionamento com adição de GPE para taxas de aproximadamente 300 ml/min, esse valor foi utilizado como base para os testes no grupo gerador. O controle de potência realizado por modulação de largura de pulsos possibilita inserção de diferentes níveis de combustível suplementar e são aqui descritos a partir da corrente elétrica máxima a ser entregue ao eletrolisador ajustada no controlador CCPWM.

Cada sequência de testes possui medições com seis diferentes níveis de carga. Para de cada ciclo de medições efetuadas, esperou-se a estabilização de funcionamento do conjunto e foram coletadas medições das seguintes grandezas:

- Tempo decorrido para consumo de 15 ml de combustível
- Freqüência do Alternador
- Potência entregue à carga elétrica trifásica
- Tensão e Corrente do Alternador
- Tensão e Corrente no Eletrolisador
- Tensão de Entrada do CCPWM
- Temperatura inicial e final da solução eletrolítica.

A rotação do motor foi determinada através da medição de frequência elétrica entregue à carga pelo alternador devido à maior precisão de medida se comparada ao uso de tacômetro.

A Figura 76 ilustra exemplo de planilha utilizada para coleta dos dados durante ensaio.

### TESTE GRUPO GERADOR

DATA:	12/10/2013
Teste	4

Eletrolisador utilizado	Mighty-Mite
Eletrólito e concentração	E-22 20%

	MOTOR	COMBUSTÍVEL		ELETROLISADOR			PWM		CARGA			
	rotação	T	v	Tensão	Corrente	Temp	I máxima	V ent.	P. Ativa	Tensão f-f	I fase	Freq
	rpm	s	ml	V	A	[°C]	A	V	kW	V	A	Hz
1	3840	23,72	15	10,2	5,4	38	5,5	14,3	0,00	220	0,00	64,0
2	3240	24,72	15	10,04	5,5		5,5	14,1	1,50	196	4,40	54,0
3	2880	25,63	15	9,9	5,5		5,5	14,1	2,47	173	8,20	48,0
4	2670	25,57	15	9,7	5,6		5,5	14,2	3,15	158	11,50	44,5
5	2628	23,37	15	9,7	5,6		5,5	14,1	4,10	157	15,00	43,8
6	2568	21,41	15	9,6	5,7		5,5	14,1	4,90	152	18,80	42,8
7	2538	20,78	15	9,53	5,8	57,2	5,5	14,1	5,11	149	19,20	42,3
8												

Figura 76: Exemplo de planilha utilizada para coleta de dados durante ensaio.

### 3.5.3 Resultados e Discussões

Para comparação do desempenho do motor operando nas diferentes situações, foram calculadas as seguintes variáveis:

Potência Efetiva ( $N_e$ ) – Potência obtida no eixo ou potência líquida de saída do motor.

$$N_e = P_{ativa} \cdot \eta_{alternador} \quad (26)$$

Onde

$N_e$  – Potência Efetiva (cv)

$P_{ativa}$  - Potência Ativa medida no multimedidor trifásico. (kW)

$\eta_{alternador}$ - Rendimento do alternador, aqui considerado 90%.

Para transformação de unidades: 1 kW = 0,7355 cv.

Consumo absoluto de Combustível (Q) – Massa de combustível consumida por unidade de potência e unidade de tempo.

$$Q = \frac{V_c \cdot d_c}{t} \quad (30)$$

Onde:

Q – Consumo absoluto de combustível (g/h).

$V_c$  – volume de combustível consumido medido (ml).

$d_c$  – densidade da gasolina, aqui considerada 0,7495 g/cm<sup>3</sup> (MARTINS, 2013)

t – tempo transcorrido para consumo do volume de combustível medido.

Para adequação de unidades: 1 hora = 3600 segundos.

Consumo específico de Combustível (q) – Massa de combustível consumida por unidade de potência e unidade de tempo.

$$q = Q / N_e \quad (27)$$

Onde:

q – Consumo específico de Combustível (g/cv.h)

Q – Consumo absoluto de combustível (g/h).

$N_e$  – Potência Efetiva (cv)

Potência do Combustível ( $N_c$ ) – Representa a energia química do combustível disponibilizada no processo de combustão.

$$N_c = PCI_{gasolina} \cdot Q / (3600 \cdot 0,7355) \quad (28)$$

Onde

$N_c$  – Potência do Combustível (cv)

$PCI_{gasolina}$  – Poder Calorífico Inferior da gasolina, aqui considerado 40,4 kJ/g (MARTINS, 2013).

$Q$  – Consumo absoluto de combustível (g/h).

Rendimento Global ( $\eta_t$ ) – Relação entre a potência efetiva e a potência do combustível.

$$\eta_t = \frac{N_e}{N_c}$$

(33)

Fator de Redução (R) – O desempenho de motores é afetado pelas condições ambientais de pressão, temperatura e umidade. Em consequência, para se permitir base comum de comparação, deve ser aplicado fator de redução para transformar os valores observados em valores correspondentes à atmosfera-padrão.

$$R = \frac{736}{B_s} \sqrt{\frac{T+273}{303}} \quad (29)$$

$$B_s = B - (\varphi \cdot h_{sat}) \quad (30)$$

Onde

$R$  – Fator de redução para motores ciclo Otto segundo norma MB 374/82.

T – Temperatura ambiente (°C)

$B_s$  – Pressão Barométrica de ar seco (mmHg)

B – Pressão Barométrica observada (mmHg)

$\phi$  – Umidade relativa do ar observada (%)

$h_{sat}$  – Pressão de vapor saturado (mmHg)

O fator de redução visa a cálculos referentes à potência, porém cálculos referentes a consumo específico não devem adotar essa redução devido ao não conhecimento das influências do ambiente em relação ao consumo (MB 374/82).

Os cálculos apresentados foram realizados para cada teste (três para cada situação), e as médias encontradas podem ser observadas a seguir:

Tabela 12: Médias das Variáveis calculadas Sem GPE.

Média -Sem GPE							
Leitura	$N_e$	Q	q	$N_c$	$\eta_t$	$N_{er}$	$\eta_{tr}$
-	[cv]	[g/h]	[g/cv.h]	[cv]	%	[cv]	%
1	2,175	1672,1	769,0	23,734	9,17%	2,291	9,66%
2	3,490	1572,6	450,7	22,321	15,63%	3,676	16,47%
3	4,287	1545,8	360,8	21,941	19,54%	4,516	20,58%
4	5,516	1696,5	307,6	24,081	22,90%	5,810	24,13%
5	6,676	1936,4	290,1	27,486	24,29%	7,032	25,59%
6	6,961	1939,3	278,6	27,526	25,29%	7,333	26,64%

Tabela 13: Médias das Variáveis calculadas “Com GPE – 5,5 A”

Média - Com GPE 5,5 A							
Leitura	Ni	Q	q	Nc	ht	Ner	$\eta_{tr}$
-	[cv]	[g/h]	[g/cv.h]	[cv]	%	[cv]	%
1	2,058	1641,3	797,8	23,296	8,83%	2,160	9,27%
2	3,395	1569,6	462,5	22,278	15,24%	3,563	15,99%
3	4,242	1586,8	374,1	22,523	18,83%	4,453	19,77%
4	5,602	1720,6	307,2	24,422	22,94%	5,880	24,08%
5	6,649	1883,3	283,3	26,731	24,87%	6,979	26,11%
6	6,966	1958,7	281,2	27,802	25,06%	7,312	26,30%

Tabela 14: Médias das Variáveis calculadas “Com GPE – 6,5 A”

Média- Com GPE 6,5 A							
Leitura	Ni	Q	q	Nc	ht	Ner	$\eta_{tr}$
-	[cv]	[g/h]	[g/cv.h]	[cv]	%	[cv]	%
1	2,098	1682,3	801,8	23,878	8,79%	2,224	9,31%
2	3,304	1598,2	483,8	22,685	14,57%	3,501	15,44%
3	4,197	1538,6	366,6	21,839	19,22%	4,447	20,37%
4	5,012	1642,5	327,7	23,313	21,50%	5,312	22,79%
5	6,136	1786,8	291,2	25,362	24,20%	6,503	25,64%
6	6,567	1828,6	278,5	25,955	25,30%	6,959	26,81%

Tabela 15: Médias das Variáveis calculadas “Com GPE – 7,5 A”

média - Com GPE 7,5 A							
Leitura	Ni	Q	q	Nc	ht	Ner	$\eta_{tr}$
-	[cv]	[g/h]	[g/cv.h]	[cv]	%	[cv]	%
1	2,053	1671,8	814,5	23,729	8,65%	2,195	9,25%
2	3,390	1605,7	473,7	22,791	14,87%	3,624	15,90%
3	4,179	1541,9	369,0	21,886	19,09%	4,467	20,41%
4	5,062	1625,5	321,1	23,073	21,94%	5,412	23,46%
5	6,105	1783,9	292,3	25,321	24,11%	6,526	25,78%
6	6,467	1836,1	283,9	26,061	24,82%	6,914	26,53%

A Tabela 16 ilustra as variações médias de consumo específico e rendimento global reduzido para cada situação de ajuste de corrente máxima entregue ao eletrolisador, tendo como base a operação do motor sem adição de GPE.

Tabela 16: Variação média de consumo

Ajuste de corrente máxima	Variação média	
	$q$	$\eta_{tr}$
com GPE - 5,5 A	1,42%	-1,70%
com GPE - 6,5 A	3,37%	-2,59%
com GPE - 7,5 A	3,40%	-1,82%

Pela tabela acima observa-se que nenhuma melhora de desempenho foi encontrada analisando-se as variações médias de consumo específico e do rendimento global reduzido. Em vez de qualquer melhora, foi encontrada uma ligeira depreciação de desempenho, com aumento de consumo específico e redução do rendimento global. Para melhor visualização dos resultados, foram construídos os gráficos a seguir.

A Figura 77 ilustra consumo específico para as diferentes rotações desenvolvidas no ensaio.

A Figura 78 ilustra o rendimento global reduzido para diferentes rotações.

Os resultados demonstram que nenhuma melhora significativa em consumo específico ou rendimento global foi alcançada com a adição de GPE em nenhuma das situações testadas, contrariando assim os resultados encontrados na adaptação realizada no Fusca documentada na seção 3.4. Assim como os resultados encontrados através de comparação das médias de consumo específico e rendimento global, os gráficos ilustram ligeiro aumento de consumo e diminuição de rendimento global.

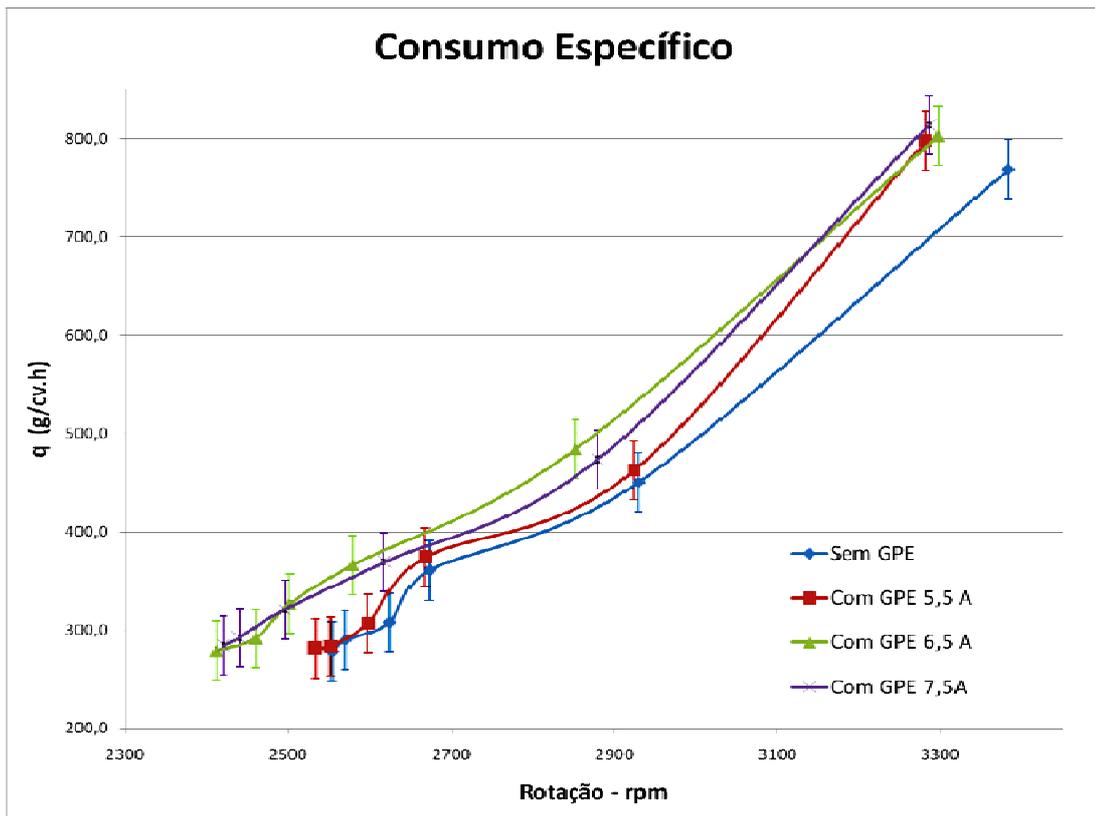


Figura 77: Consumo específico para cada situação

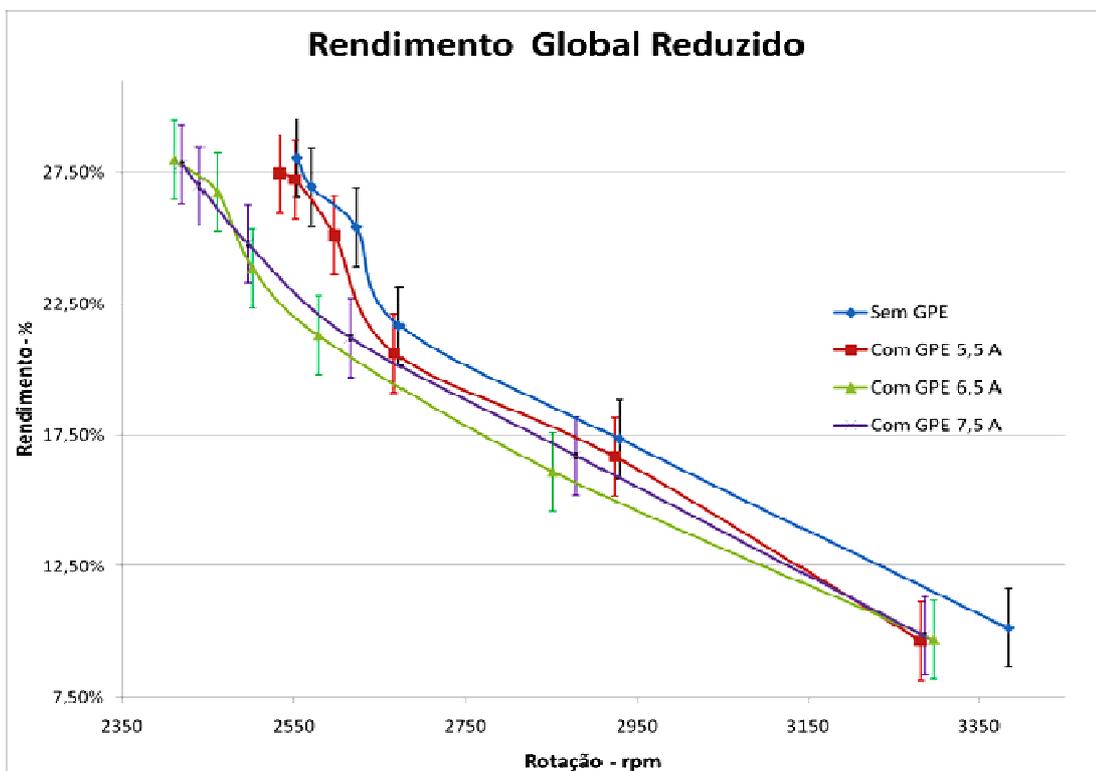


Figura 78: Rendimento Global reduzido para cada situação

Para compreender a discordância dos resultados é necessária análise das diferenças encontradas entre as duas experimentações. O motor utilizado no ensaio supracitado não permite qualquer ajuste simplificado do ponto de ignição de centelha, sendo este fixo em 20 graus antes do ponto morto superior. O sistema de ignição se dá através de duas bobinas (uma pra cada cilindro) fixadas próximas ao volante do motor, onde um ímã preso ao volante é responsável pelo disparo da centelha em cada bobina. Tal situação é diferente da encontrada na adaptação realizada no Fusca, onde um novo ajuste do ponto de ignição foi realizado e o avanço do distribuidor, responsável pelo adiantamento do ponto para altas rotações foi eliminado.

Além disso, para o teste veicular citado, aconteceu uma operação do motor com alta razão de excesso de ar devido ao reduzido consumo de combustível registrado na situação de cruzeiro e nenhuma mudança com relação à quantidade de ar aspirada ou combustível admitido foi realizada no motor do grupo gerador.

A pequena diminuição no rendimento e conseqüente aumento de consumo específico encontrados no ensaio podem ter sido causados devido à mudança do tempo de desenvolvimento e propagação de chama da mistura com a adição de GPE. Se para uma determinada mistura ar-gasolina o tempo de ignição é ideal, a alteração das propriedades dessa mistura, ao ser acrescentada de GPE em níveis suficientes, certamente ocasionará uma mudança do tempo ótimo de ignição de centelha devido à diferente velocidade de desenvolvimento e propagação de chama da mistura detonada.. Se para um mesmo ponto de ignição de centelha, que anteriormente possibilitava um desenvolvimento de chama em tempo ideal, sincronizado com o movimento do pistão, a velocidade de desenvolvimento da chama for aumentada através da adição de GPE, temos que o ponto ótimo de liberação de calor da mistura detonada ocorrerá antes do que com a mistura original, para a qual o ponto foi ajustado, ocasionando então em depreciação, ainda que reduzida, de rendimento global e aumento de consumo específico. Em outras palavras, alterar a mistura a ser queimada é equivalente a alterar o ponto de ignição, sendo necessário novo ajuste dos parâmetros de operação do motor para melhor avaliação das possibilidades de melhora de desempenho de motores operando com adição de GPE.

O combustível suplementar adicionado tem como objetivo hipotético neste trabalho aumentar o rendimento do processo de combustão através de mudanças na mistura a ser queimada. Uma vez que o conteúdo energético adicionado, representado pelo poder calorífico do hidrogênio presente no GPE, é muito pequeno comparado ao conteúdo energético do combustível utilizado, a única maneira provável de se obter melhora de desempenho, com adição de GPE nos níveis estudados, é adequar parâmetros como razão de excesso de ar e ponto de ignição de centelha.

De qualquer forma, fica evidente, através do ensaio realizado no grupo gerador, que, sem a realização de nenhum ajuste dos parâmetros de operação citados, a adição de GPE nos níveis estudados não causa melhora no desempenho para o tipo de motor nas condições de operação avaliado nesta seção.

## Capítulo 4

### CONCLUSÕES

Extensa literatura a respeito da introdução de pequenos volumes de hidrogênio no processo de combustão interna mostra que a melhora de eficiência atingida, em alguns casos, é significativa, assim como redução dos níveis de gases poluentes emitidos na exaustão do processo. Recentemente um maior número de publicações referentes ao uso em demanda do gás produto da eletrólise realizada “on board” fortalece a busca de uma melhor eficiência de motores a combustão.

Em países com geração de energia elétrica baseada em fontes renováveis de energia, como o Brasil, uma parcial substituição dos insumos energéticos requeridos no processo de combustão reduziria o uso de combustíveis fósseis e acrescentaria uma significativa parcela de fontes de energia renovável (elétrica) na matriz energética do setor de transporte.

Para motores que se utilizam de carburador para preparação da mistura, as adaptações necessárias para estudo da adaptação são de solução simplificada, tornando atrativa a pesquisa nesse ramo para comercialização de sistemas que visem à melhora de eficiência e redução de emissão de gases poluentes através do uso do gás produto da eletrólise produzido e utilizado imediatamente.

As experimentações realizadas em adaptação veicular, visando criar indicativos de redução de poluentes, apresentaram cenário favorável para determinadas rotações. Um ensaio foi realizado em empresa, de vistoria veicular, credenciada pelo IMETRO, e registrou reduções das concentrações de HC em 5,7% e CO em 17,4% para rotações próximas de 2500 rpm. Em contrapartida, uma depreciação dos

resultados ocorreu para rotação de marcha lenta. O aumento das concentrações de HC em 12,5% e de CO em 5% indica necessidade de ajuste dos parâmetros de operação do motor para tentativa de melhora de resultados. Tais alterações no conteúdo dos gases de exaustão foram alcançadas como uma taxa aproximada de produção de GPE de 300 ml/min, estipulada por medição realizada em bancada.

Em busca de resultados confiáveis a respeito de melhora de desempenho de motores com adição de GPE, foram realizados testes com diferentes níveis de adição desse combustível suplementar em um motor estacionário. A taxa de inserção de GPE foi variada de 200 a 300 ml/min, valor relativamente maior do que os utilizados nas experimentações veiculares considerando o tamanho reduzido do motor estacionário em relação aos outros motores ( $614 \text{ cm}^3$  para motor estacionário e  $1000 - 1300 \text{ cm}^3$  nas aplicações veiculares). A utilização de modulação por largura de pulso com ajuste de corrente máxima mostrou-se eficaz no controle de níveis de produção de gás produto de eletrólise, possibilitando, assim, diferentes níveis de adição de GPE no processo de combustão.

Os resultados de ensaio realizado em grupo gerador gasolina não mostraram melhora de consumo específico ou rendimento global, mas sim ligeira depreciação dos resultados. Aumento de até 3,4% em consumo específico e redução de rendimento global em até 2,59 % nas variações médias foram calculadas com base em valores obtidos no ensaio realizado. A depreciação dos resultados obtidos, segundo análise da literatura, pode ser relacionada aos ajustes de ponto de ignição e da mistura a ser detonada. Uma vez que o sistema de ignição por bobina transistorizada empregada no motor estacionário impede alteração simplificada do ponto de ignição, a mudança desse parâmetro de operação não foi então efetuada. Além disso, condições de operação do motor estacionário com alta razão de excesso de ar também não foram testadas.

O fato de a energia elétrica consumida para produção de gás ser maior que a energia teórica entregue pelo gás, esta calculada com base no poder calorífico do hidrogênio gasoso estável, e ainda assim, a inserção desse gás no processo de combustão ser suficiente, em certos casos, para provocar melhora de desempenho em aplicações veiculares, indica que o gás inserido não pode ser considerado apenas como

insumo energético pelo potencial térmico do hidrogênio adicionado. A premissa hipotética é de que um efeito catalítico da combustão pode estar ocorrendo, levando a uma economia de energia do processo termodinâmico da combustão, que compensa o gasto energético causado pela carga elétrica extra adicionada ao sistema de alternador/bateria, que por sua vez, está acoplado ao motor.

O trabalho reuniu literatura que relata e explica esse evento e produziu indicadores práticos através de redução de emissão de poluentes. Entretanto, não foi possível realização de ensaio reprodutível onde fossem evidenciados os benefícios do uso de GPE em motores combustão, assim como detalhes dos ajustes necessários para operação que propicie melhora de desempenho em motores a combustão com uso desse combustível suplementar. Dessa forma, fica evidente que ajustes de parâmetros de operação são críticos para o sucesso da aplicação.

Limites de operação segura com maior razão de excesso de ar e levantamento de mapas de tempo de ignição de centelha para diferentes rotações e taxas de inserção de GPE são passos importantes para determinação de parâmetros ideais de operação e comportamento de grandezas envolvidas para desenvolvimento de sistemas que se utilizem de GPE no processo de combustão em motores. Para tal estudo, faz-se necessária a determinação e leitura de diversas variáveis envolvidas dentre as quais podemos citar as principais:

- Massa de ar aspirado
- Massa de combustível injetado
- Concentração de gases na exaustão (HC, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>)
- Temperatura dos gases de exaustão
- Temperatura de líquido de arrefecimento
- Carga Mecânica aplicada ao motor
- Tempo de ignição de centelha

- Pressão absoluta no coletor de admissão
- Posição de borboleta de aceleração

Assim, um ajuste adequado de operação de um motor ,operando de maneira convencional, pode ser feito através da análise dos produtos da combustão. Identificado o melhor ponto de operação convencional, introduz-se então o GPE como combustível suplementar, e adequa-se parâmetros como ponto de ignição de centelha e razão de excesso de ar em busca de melhor desempenho observado através de medições de consumo de combustível primário, concentrações dos gases de escape e carga mecânica aplicada ao motor.

Ensaio em bancada dotada de medições precisas de todas variáveis envolvidas, assim como controle de parâmetros de operação do motor, são o único modo de se determinar parâmetros ideais de funcionamento e comportamento de grandezas com a adição de GPE. Somente dessa forma, poderá ser comprovada e quantificada, de maneira confiável, o efeito catalítico produzido com a inserção de GPE no processo de combustão.

## **4.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Visando ao direcionamento de futuras pesquisas que contribuam para o desenvolvimento e expansão de sistemas de produção de GPE, como também para a viabilidade da utilização desse gás em motores de combustão interna, e dessa forma, sua inserção na matriz energética do setor de transporte, são sugeridos, abaixo, importantes pontos sobre o funcionamento do sistema que precisam ser amplamente analisados e discutidos para um conhecimento completo das potencialidades e barreiras a serem enfrentadas no desenvolvimento dessa tecnologia. Entre eles, podemos incluir o estudo da eficiência de eletrolisadores sem separação dos gases, minucioso estudo a respeito do desempenho de motores com inserção de GPE em regime bicomcombustível, estudo das

características físico-químicas do GPE, bem como de suas características energéticas quando sofre combustão. São, recomendações para futuras pesquisas:

- Eficiência de eletrolisadores - adicionais estudos de: comportamento como carga elétrica de diferentes modelos de eletrolisadores, do arranjo ótimo de eletrodos e de faixa de concentração da solução eletrolítica para um bom desempenho energético do eletrolisador; experimentação de diferentes formas de onda aplicadas ao eletrolisador como sinal de alimentação elétrica, em especial, verificação do comportamento do eletrolisador quando alimentado através de pulsos de alta frequência com operação em ressonância; estudo de células capacitivas com acoplamento de indutor para verificação de efeitos de ressonância; verificação de efeitos de ressonância com operação dotada de CCPWM e análise da resposta do sistema a diferentes processos de condicionamento das placas eletrodos.
- Análise de Desempenho de MCI alimentados por GPE – estudo objetivando a determinação dos limites ideais de operação com alta razão de excesso de ar em regime bicomustível para diversos níveis de adição de GPE; experimentações no ajuste de tempo de ignição e razões de mistura ar-combustível para uma operação eficiente; estudo do comportamento de grandezas medidas em sistemas de injeção eletrônica para desenvolvimento de adaptações necessárias; desenvolvimento de circuitos eletrônicos para acoplamento elétrico entre os componentes elétricos do sistema (gerador/alternador, bateria e eletrolisador).

Para veículos carburados, são recomendadas as seguintes diretrizes: estudo experimental a respeito dos possíveis pontos de inserção do GPE no motor, definição da relação entre ponto de centelha e velocidade de rotação de forma a se obter operação eficiente do conjunto eletrolisador-MCI.

Para veículos de injeção eletrônica: estudo da aplicação de tratamento dos sinais provenientes dos diversos sensores do sistema de injeção eletrônica de

forma a desenvolver soluções de mercado tecnológico para adaptação de veículos a um sistema de alimentação bicomustível com GPE.

- Estudo da combustão de GPE: estudo da queima da mistura ar-GPE para aplicações em sistemas aquecimento de ambientes e de água, determinando o conteúdo térmico real do gás; pesquisas laboratoriais que visem à confirmação de efeitos de alto conteúdo térmico da chama, para aplicação em processos termodinâmicos industriais e siderurgia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**AKANSU, S. O.; DULGER, Z.; KAHRAMANA, N.; VEZIROGLU, T. N. 2004.** Internal combustion engines fuelled by natural gas-hydrogen mixtures. *Int. Journal of Hydrogen Energy*. 2004, Vol. 29, pp. 1527-1539.

**AKANSU, S. O., KAHRAMAN, N. and ÇEPER, B. 2007.** Experimental study on a spark ignition engine fuelled by methane-hydrogen mixtures. *Int. Journal of Hydrogen Energy*. 2007, Vol. 32, pp. 4279-4284.

**AL-ROUSAN, A. A. 2010.** Reduction of fuel consumption in gasoline engines by introducing HHO gas into intake manifold. *Int. Journal of Hydrogen Energy*. 2010, Vol. 35, pp. 12930-12935.

**BARI, S. and ESMAEIL, M. M. 2012.** Effect of h<sub>2</sub>-o<sub>2</sub> addition in increasing the thermal efficiency of a diesel engine. *Fuel*. 2012, Vol. 89, pp. 378-383.

**BAUER, C. G. and FOREST, T. W. 2001a.** Effect of hydrogen addition on the performance of methane fueled vehicles. Part I: Effect on S.I. engine performance. *Int. Journal of Hydrogen*. 2001a, Vol. 26, pp. 55-70.

**BAUER, C. G. and FOREST, T. W. 2001b.** Effect of hydrogen addition on the performance of methane fueled vehicles. Part II: driving cycle simulations. *Int. Journal of Hydrogen Energy*. 2001b, Vol. 26, pp. 71-90.

**BIRTAS, A.; VOICU, I.; PETCU, C.; CHIRIAC, R.; APOSTOLESCU, N. 2011.** The effect of HRG gas addition on diesel engine combustion characteristics and exhaust emissions. *International Journal of Hydrogen*. 2011, Vol. 36, pp. 12007-12014.

**BOSCH. 2002.** *Apostila Técnica de Alternadores Bosch*. 2002.

**BROWN, Y. 1977.** *Welding. US 4014777 US*, 1977.

**BROWN, Y. 1978.** *Arc assisted OxyHydrogen Welding. US 4081656* 1978.

**CASSIDY, J. F. 1977.** *EMISSIONS AND TOTAL ENERGY CONSUMPTION OF A MULTI CYLINDER PISTON ENGINE RUNNING ON GASOLINE AND HYDROGEN-GASOLINE MISTURE.* Lewis Research Center, NASA. s.l. : NASA, 1977. TN D-8478 C.1.

**CONTE, E. and BOULOUCHOS, K. 2004.** Influence of hydrogen-rich-gas addition on combustion, pollutant formation and efficiency of an ICI-SI engine. *SAE.* 2004, Vols. 2004-01-0972.

**D'ANDREAA, T. and HENSHAWA, P. F. 2004.** The addition of hydrogen to a gasoline- fuelled SI engine. *Int. Journal of Hydrogen energy.* 2004, Vol. 29, pp. 1541-1552.

**DAS, L. M. 1996.** Hydrogen-Oxygen Reaction Mechanism and its implication to hydrogen engine combustion. *International Journal of Hydrogen.* 1996, Vol. 21, 8, pp. 703-715.

**DULGER, Z. and OZÇELIC, K. R. 2000.** Fuel economy improvement by on-board electrolytic hydrogen production. *International Journal of Hydrogen.* 2000, Vol. 25, pp. 895-897.

**ECKMAN, C. 2010.** Plasma Orbital Expansion of the Electrons in Water. *Proceedings of the NPA.* 2010.

**EPE. 2013.** *Balanço Energético Nacional.* s.l. : Ministério de Minas e Energia - EPE, 2013.

**FLORES, L. F. V. 2004.** [book auth.] Luiz Fernando Valadão Flores. *Apostila de Sistemas e Centrais térmicas.* 2004, 3, p. Cap. 3 .

**FRAZER, C. H. 1918.** *Oxy-hydrogen Generator. US 1262034 US*, 1918.

**FREEDOM, O. 2008.** *Water 4 Gas User Manual.* 2008.

**GOLDMAN, J. A., SHARMA, S. K. and SUGGS, S. 2010.** Transportation Applications Using Practical Hydrogen-on-Demand Systems. *IEEE*. 2010, Vols. 978-1, pp. 4593-4598.

**HACOHEN, Y. and SHER, E. 1989.** Fuel consumption and emission of an SI engine fueled with H<sub>2</sub> enriched gasoline. *IEEE*. 1989, Vols. CH 2781-3/89, pp. 2485-2490.

**HOUSEMAN, J. and CERINI, D.J. 1974.** *On Board Hydrogen Generator for a Partial Hydrogen Injection Internal Combustion Engine*. Jet. Propulsion Lab., California Institute of technology. 1974.

**HUANG, Z.,; LIU, B.; ZENG, K.; HUANG, Y; JIANG, D.; WANG, X.; MIAO, H. 2007.** Combustion Characteristics and Heat Release Analysis of a Spark-Ignited Engine Fueled with Natural Gas-Hydrogen Blends. *Energy & Fuels*. 2007, Vol. 21, pp. 2594-2599.

**JI, C. and WANG, S. 2009a.** Effect of hydrogen addition on combustion and emissions performance of a spark ignition gasoline engine at lean conditions. *Int. Journal of Hydrogen Energy*. 2009a, Vol. 34, pp. 7823-7834.

**JI, C. and WANG, S. 2009b.** Combustion and emissions performance of a hybrid hydrogen-gasoline engine at idel and lean conditions. *Int. Journal of Hydrogen Energy*. 2009b, Vol. 35, pp. 346-355.

**KIM, H. G., KWAC, L. K. and SHIN, J. D. 2011.** Physical properties and flame characteristics of water electrolysis gas. *Renewable Energy*. 2011, Vol. 42, pp. 84-89.

**LEE, K.; KIM, T.; CHA, H.; SONG, S.; CHUN, K. M. 2010.** Generating efficiency and NO<sub>x</sub> emissions of a gas engine generator fueled with a biogas-hydrogen blend and using an exhaust gas recirculation system. *Int. Journal of Hydrogen Energy*. 2010, Vol. 35, pp. 5723-5730.

**LILIK, G. K.; ZHANG, H.; HERREROS, J. M.; HAWORTH, D. C.; BOEHMAN, A. L. 2010.** Hydrogen assisted diesel combustion. *Int. Journal of Hydrogen Energy*. 2010, Vol. 35, pp. 4382-4398.

**MA, F.; WANG, Y.; LIU, H.; LI, Y.; WANG, J.; DING, S. 2008.** Effects of hydrogen addition on cycle-by-cycle variations in a lean burn natural gas spark-ignition engine. *Int. Journal of Hydrogen Energy*. 2008, Vol. 33, pp. 823-831.

**MARTINS, J. 2013.** *Motores de Combustão Interna*. quarta edição. s.l. : Publindustria, 2013.

**MAZLOOMI, S. K. and SULAIMAN, N. 2012.** Influencing factors of water electrolysis electrical efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012, Vol. 16, pp. 4257-4263.

**MEYER, S. A. 1989.** *Gas Generator Voltage Control Circuit*. 4798661 Janeiro 17, 1989.

**MIN, S. Y.; MAKEN, S; PARK, J. W.; GAUR, A.; HYUN, J. S. 2008.** Melting treatment of waste asbestos using mixture of hydrogen and oxygen produced from water electrolysis. *Korean J. Chem. Eng.* 2008, Vol. 25(2), pp. 323-328.

**MUSMAR, S. A. and AL-ROUSAN, A. A. 2011.** Effect of HHO gas on combustion emissions in gasoline engines. *Fuel*. 2011, Vol. 90, p. 5.

**NAGAI, N.; TAKEUCHI, M.; KIMURA, T.; OKA, T. 2003.** Existence of optimum space between electrodes on hydrogen production by water electrolysis. *International Journal of Hydrogen*. 2003, Vol. 28, pp. 35-41.

**NTK. 2011.** Catálogo NTK de sensores de oxigênio. 2011.

**OZCAN, H. 2012.** Hydrogen enrichment effects on the second law analysis of a lean burn natural gas engine. *Int. Journal of Hydrogen Energy*. 2012, Vol. 35, pp. 1443-1452.

**Panacea University. 2012.** *Panacea University Hydroxy courses*. 2012.

**PINESCHI, S. A. A. 2013.** Dissertação de Mestrado. "*Desenvolvimento de sistema compacto de Produção de gás rico em hidrogênio*". 2013, pp 185.

**SANCHIS, P.; URSUA, A.; GUBIA, E.; GANDIA, L. M.; DIEGUEZ, P. M. 2009.** Influence of the power supply on the energy efficiency of an alkaline water electrolyser. *International Journal of Hydrogen*. 2009, 34, pp. 3211-3233.

**SANTILLI, R. M. 2006.** A new gaseous and combustible form of water. *Int. Journal of Hydrogen Energy*. 2006, Vol. 31, pp. 113-1128.

**SARAVENAN, N. and NAGAJARAN, G. 2008.** An experimental investigation of hydrogen-enriched air induction in a Diesel engine System. *International Journal of Hydrogen*. 2008, Vol. 33, pp. 1769-1775.

**SHIMIZO, N., HOTTA, S. and SEKIYA, T. 2006.** A novel method of hydrogen generation by water electrolysis using. *Journal of Applied Electrochemistry*. 2006.

**SOBERANIS, M. A. E. and FERNADEZ, A. M. 2012.** A review on the technical adaptations for internal combustion engines to operate with gas/hydrogen mixtures. *Int. Journal of Hydrogen Energy*. 2012, Vol. 35, pp. 12134-12140.

**SOPENA, C., DIEGUEZ P.M., SAINZ, D., URROZ, J.C., GUEL BENZU, E., GANDIA L.M., 2010.** Conversion of a commercial spark ignition engine to run on hydrogen: Performance comparison using hydrogen and gasoline. *Int. Journal of Hydrogen Energy*. 2010, Vol. 35, pp. 1420-1429.

**SOUZA, S.N. M. 1998.** Aproveitamento de energia elétrica secundária para Produção de hidrogênio Eletrolítico. *Tese de Doutorado*. Campinas : Unicamp, 1998.

**TOLMASQUIM, M. T. 2003.** *Fontes Renováveis de Energia no Brasil*. 2003.

**URSUA, A., GANDIA, L. M. and SANCHIS, P. 2012.** Hydrogen Production From Water Electrolysis: Current Status and Future Trends. *Proceedings of IEEE*. fevereiro 02, 2012, Vol. 100, 2, pp. 410-426.

**VLASSOV, D. 2008.** *Fundamentos da Combustão*. 2008.

**WANG, S., JI, C. and ZHANG, B. 2010a.** Effect of hydrogen addition on combustion and emissions performance of a spark-ignited ethanol engine at idle and stoichiometric conditions. *Int. Journal of Hydrogen Energy*. 2010a, Vol. 35, pp. 9205-9213.

**WANG, S., JI, C. and ZHANG, B.. 2010b.** Reducing the idle speed of a spark-ignited gasoline engine. *Int. Journal of Hydrogen Energy*. 2010b, Vol. 35, pp. 10580-10588.

**WEISEMAN, G. 2010.** *Carburetor Enhancer Manual*. terceira edição. s.l.: Eagle Research, Inc., 2010.

**YILMAZ, A. C., ULUDAMAR, E. and AYDIN, K. 2012.** Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines. *Int. Journal OF Hydrogen Energy*. 2012, Vol. 35, pp. 11366-11372.

**ZANG, B., JI, C. and WANG, S. 2010.** Effect of spark timing on the performance of a hybrid hydrogen–gasoline engine at lean conditions. *Int. Journal of Hydrogen Energy*. 2010, Vol. 35, pp. 2203-2212.