

VANDER FABIO SILVEIRA

**AVALIAÇÃO DA INJEÇÃO DE GÁS HHO EM UM GERADOR A GASOLINA PARA
FINS DE ENERGIZAÇÃO RURAL**

CASCADEL,
PARANA - BRASIL
FEVEREIRO – 2012

VANDER FABIO SILVEIRA

**AVALIAÇÃO DA INJEÇÃO DE GÁS HHO EM UM GERADOR A GASOLINA PARA
FINS DE ENERGIZAÇÃO RURAL**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

CASCADEL,
PARANA - BRASIL
FEVEREIRO - 2012

1 Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

2 Biblioteca Central do Campus de Cascavel – Unioeste

Ficha catalográfica elaborada por Jeanine da Silva Barros CRB-9/1362

S591a Silveira, Vander Fábio
Avaliação da injeção de gás HHO em um gerador a gasolina para fins de energização rural. / Vander Fábio Silveira— Cascavel, PR: UNIOESTE, 2012.
66 p.

Orientador: Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira
Coorientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na Agricultura, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.
Bibliografia.

1. Gás HHO - Produção. 2. Energização rural. 3. Eletrolise hidrogênio. 4. Gás de Brown. I. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. II. Título.

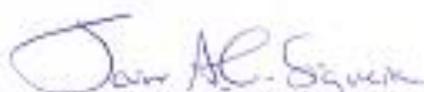
CDD 21.ed. 333.79

VANDER FABIO SILVEIRA

"Avaliação da injeção de gás HHO em um gerador
à gasolina para fins de energização rural"

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, **aprovada** pela seguinte Banca Examinadora:

Orientador:



Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira

Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel



Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira

Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel



Prof. Dr. Evandro Marcos Kolling

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR/Toledo

Cascavel, 17 de fevereiro de 2012.

À minha filha Gabriela...

A minha esposa Juceli...

Pela paciência, amor e compreensão.

dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, por permitir chegar a mais esta conquista.

À minha família, em especial, à minha esposa e filha pelos dias distantes que mesmo perto, faltou dar-lhes atenção

Ao professor orientador, Dr. Jair Antônio Cruz Siqueira, por seus conselhos e ensinamentos.

Ao amigo, Wagner Alessandro Pansera, pela contribuição ao início do Mestrado.

A todos os responsáveis pelo Programa de Pós-graduação em Energia na Agricultura.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná, por ter fornecido infraestrutura para a pesquisa.

Aos amigos de turma que de alguma forma contribuíram com este trabalho.

ÍNDICE

LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
INTRODUÇÃO GERAL	1
CAPÍTULO 1	3
DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM REATOR ELETROLÍTICO PARA A PRODUÇÃO DE GÁS HHO	3
RESUMO.....	3
ABSTRACT.....	4
1. INTRODUÇÃO	5
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	7
2.1 Eletrolise	7
2.2 Eletrolise para obtenção de H ₂	7
2.3 Tipos de eletrólise	10
2.4 Tipos de eletrolisadores	11
2.5 Gás de brown, Gás hidróxi ou Gás HHO	11
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	12
3.1 MATERIAL	12
3.1.1 Localização do experimento.....	12
3.1.2 Materiais utilizados na construção do reator eletrolítico.....	12
3.1.3 Materiais utilizados na construção do gasômetro.....	13
3.1.4 Materiais utilizados na construção do Borbulhador	13
3.1.5 Materiais utilizados na construção manômetro.....	14
3.1.6 Equipamentos utilizados para a medição de corrente	14
3.1.7 Equipamentos utilizados para a medição de tensão.....	14
3.1.8 Fonte utilizada para fornecimento de energia.....	14
3.2 Sistema de Produção de Gás HHO Desenvolvido	15
3.3 Métodos.....	16
3.3.1 Montagem do experimento	16
3.3.2 Procedimento para eletrolise com NaOH	16
3.3.3 Procedimento para eletrolise com KOH	17
3.3.4 Medição da temperatura de solução e ambiente	17
3.3.5 Medição do volume de gás HHO produzido.....	17

3.3.6	Análise de dados	18
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
4.1	Avaliação do Desempenho do reator eletrolítico.....	19
5.	CONCLUSÕES	22
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23
CAPITULO II		25
EFEITO DA INJEÇÃO DE GÁS HHO EM UM GERADOR A GASOLINA PARA FINS DE ENERGIZAÇÃO RURAL		25
RESUMO		25
ABSTRACT		26
1.	INTRODUÇÃO	27
2.	REVISÃO BIBLIOGRAFICA	29
2.1	Geradores a combustão interna para energização rural.....	29
2.2	Gerador a diesel.....	29
2.3	Gerador a gasolina	29
2.4	Relação estequiométrica entre combustível e ar.....	29
2.5	Desempenho de geradores a combustão interna.....	30
2.6	Consumo de combustível e rendimento térmico de um motor	31
2.7	Geradores a combustão funcionando com hidrogênio e/ou gás HHO ..	31
2.8	Emissões produzidas por motores de combustão interna.....	31
3.	MATERIAL E METODOS	32
3.1	Material	32
3.1.1	Localização do experimento.....	32
3.1.2	Material utilizado para construir as cargas resistivas.....	33
3.1.3	Determinação da tensão	34
3.1.4	Equipamento utilizado para a medição da frequência	34
3.1.5	Medição da temperatura	35
3.1.6	Medição da corrente.....	35
3.1.7	Medição dos gases de exaustão	36
3.2	MÉTODOS	37
3.2.1	Montagem do experimento	37
3.2.2	Medição do consumo de combustível	39
3.2.3	Determinação da massa da gasolina	40

3.2.4	Montagem do injetor de HHO	40
3.2.5	Carga Resistiva Instalada para Simular a Demanda de Energia Elétrica do Moto-Gerador	43
3.2.6	Determinação do Consumo Específico de Combustível.....	43
3.2.7	Medição dos Gases de Exaustão	44
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	Avaliação do Consumo Específico de Combustível.....	45
4.4	Avaliação do excesso de ar expelido após a combustão	49
5.	CONCLUSÕES	51
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
	CONCLUSÕES GERAIS	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- eficiência dos eletrolisadores (SOUZA, 1998).....	10
Tabela 2 - relação da mistura λ	30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama do processo de eletrolise (SANTOS JUNIOR, 2004).	8
Figura 2 - Curvas de tensão aplicada versus temperatura para a eletrólise (SOUZA, 1998)..	9
Figura 3 - Eletrolisador eletrolítico.....	12
Figura 4 - Sistema completo desenvolvido para a produção de gás HHO.....	13
Figura 5 - Esquema geral do sistema montado para a geração de gás HHO.....	15
Figura 6 - Gasômetro de PVC utilizado para medir o volume de gás produzido.....	18
Figura 7 - Volume de gás produzido em função da energia elétrica consumida na eletrólise de NaOH.....	20
Figura 8 - Volume de gás produzido em função da energia elétrica consumida na eletrólise KOH.....	20
Figura 9 - moto-gerador marca Toyama modelo TF1200.....	32
Figura 10 - cargas resistivas ligadas ao gerador.....	34
Figura 11 – Frequencímetro marca Minipa modelo ET-2053.	34
Figura 12 – Termômetro marca Kalimex modelo M890T.	35
Figura 13 - Alicate amperímetro marca Instrutherm modelo VA-750.....	36
Figura 14 - Analisador de combustão e emissões marca HOMIS modelo PCA-3.	36
Figura 15 - ajuste manual de aceleração e rotação.....	38
Figura 16 - haste de conexão com RAR	38
Figura 17 - sem a haste de conexão do carburador com o RAR.....	39
Figura 18 - proveta graduada para medir o consumo de gasolina.....	39
Figura 19 – Protótipo de injetor de gás HHO.	40
Figura 20 - protótipo do injetor de gás instalado no moto-gerador a gasolina.	41
Figura 21 - Sistema completo de Injeção de gás HHO Instalado no moto-gerador á gasolina.	42
Figura 22 – Design do injetor de HHO.	42
Figura 23 – Carga de 8 lâmpadas de 100 W cada ligada ao gerador.....	43
Figura 24 - Consumo específico do moto-gerador em função da carga aplicada.	46
Figura 25 - Variação de temperatura no escape do motor.	47
Figura 26 - Dados de exaustão dos óxidos nitrosos.....	48
Figura 27 - Dados de exaustão de dióxido de carbono.	49
Figura 28 - Variação de excesso de ar.....	50

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ΔH	Variação da entalpia da reação (kJ.kg^{-1})
316L	Aço inox de alta resistência com liga de molibdênio
CA	Corrente alternada
CC	Corrente continua
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
cv	Energia mecânica produzida por um motor em Cavalos Vapor
E	Tensão elétrica (V)
F	Constante de Faraday (Coulomb)
H ₂	Hidrogênio gasoso
Hc	Poder calorífico de um combustível (kJ.kg)
HHO	Mistura de H ₂ com O ₂
hp	Energia mecânica produzida por um motor em Horsepower
KOH	Hidróxido de potássio
kVA	Potência em volt-ampere
\dot{m}_c	Vazão mássica de combustível (kg.h^{-1})
mmH ₂ O	milímetros coluna d'água
η	Eficiência de um motor a combustão interna
n	Rotação do motor (revoluções por minuto)
NaCl	Cloreto de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
NO _x	óxidos nitrosos
np	Número de polos
O ₂	Oxigênio
P	Potência elétrica (W)
ppm	partes por milhão
PVC	Cloreto de polivinila
Q	Energia calorífica (J)
RAR	Regulador automático de rotação
rpm	Rotações por minuto

SO _x	óxidos de enxofre
V	Unidade de tensão elétrica
Wh	Consumo de energia elétrica em Watt/hora
λ	Relação estequiométrica entre combustível e ar

INTRODUÇÃO GERAL

Para Boretta (2010), o aquecimento global é um dos maiores problema que a comunidade científica vem enfrentando na atualidade e, muitos estudos indicam que a redução na camada de ozônio é provocada pela queima de combustíveis fósseis, que ao serem transformados em calor, liberam gases tóxicos contribuindo para o aquecimento do planeta. Segundo o autor, esta liberação de gases é proveniente da queima muitas vezes incompleta por motores veiculares, motores estacionários e plantas industriais.

Segundo Musmar e Al-Rousan (2011), a combustão é uma reação exotérmica de oxidação de um combustível com a presença de oxigênio ou ar atmosférico. Quando a quantidade de oxigênio é suficiente para oxidar, totalmente o combustível, esta reação é chamada de estequiométrica, resultado em água e monóxido de carbono (CO). Quando a quantidade de oxigênio for superior à quantidade necessária para a reação esta é chamada de excesso de ar ou queima pobre. Porém, quando em uma reação de combustão, a quantidade de oxigênio for inferior à quantidade necessária para a reação esta é chamada de falta de ar ou excesso de combustível. A reação fora da relação estequiométrica produz gases poluentes, além do monóxido de carbono, geralmente, são dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e óxidos de enxofre (SO_x).

Para AL-Rousan (2010), a preocupação de reduzir o consumo de recursos provenientes de jazidas fósseis e rigorosas restrições ambientais, a demanda por melhoria na eficiência dos motores à combustão interna tem crescido nos últimos anos. O hidrogênio tem mostrado, através de pesquisas pelo mundo, que pode ser uma fonte promissora de energia limpa podendo ser utilizado em motores de combustão sem alterações radicais em sua concepção, podendo ser também utilizado em sistemas com células a combustível. Embora, a célula a combustível tenha mais vantagens em relação ao motor de combustão interna como, alta eficiência, emissões praticamente zero, por outro lado, existem alguns problemas a serem superados como, alto custo, vida útil reduzida e falta de mão de obra para operação. Portanto, uma solução atual seria unir as características do hidrogênio ao motor de combustão interna, usando para melhorar a eficiência da queima, devido à

alta velocidade de chama e maior poder calorífico durante a combustão do hidrogênio.

Segundo Souza Filho (2008), uma das melhores alternativas para o aproveitamento desta energia de forma limpa, existente no hidrogênio, seria através do processo de eletrólise da água, pois é um processo relativamente simples onde não é gerado nenhum resíduo, seja ele sólido, líquido ou gasoso que venha a ser prejudicial ao meio ambiente, ajudando desta forma, na redução do consumo de combustíveis de origem fóssil.

Segundo Al-rousan (2010), o gás HHO, ou gás de Brown, nome dado ao gás hidrogênio e oxigênio, produzido em um mesmo reator eletrolítico, onde este pode ser injetado em motores de combustão interna, junto com o combustível original do motor, melhora a eficiência do motor e, conseqüentemente, reduz o consumo do combustível de origem sintético.

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver, testar e avaliar um reator eletrolítico para a produção de gás HHO, com o intuito de adicionar, juntamente, com a gasolina em um moto-gerador, para fins de energização rural com análise da combustão dos gases expelidos pelo motor.

CAPÍTULO 1

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM REATOR ELETROLÍTICO PARA A PRODUÇÃO DE GÁS HHO

RESUMO

SILVEIRA, Vander Fabio, M.sc; Universidade Estadual do Oeste do Paraná; Janeiro de 2012; **Desenvolvimento e avaliação de um reator eletrolítico para a produção de gás HHO**; Orientador: Prof. Dr. Jair Antônio Cruz Siqueira. Co-orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari De Souza.

Este trabalho teve o objetivo de desenvolver e avaliar um sistema de reação eletrolítica para a produção de gás HHO. O gás HHO, também conhecido como gás de Brown ou gás hidróxi, pode ser utilizado concomitantemente com combustíveis líquidos em motores ciclo Otto e ciclo Diesel, visando à redução do consumo destes últimos. Para a realização do trabalho foi construído um reator eletrolítico com placas de aço 316L em uma cuba de acrílico. Avaliou-se o desempenho do reator eletrolítico, utilizando-se os eletrólitos hidróxido de sódio e hidróxido de potássio. Os resultados encontrados permitiram concluir que o reator apresentou melhor desempenho energético na produção de gás HHO quando se utilizou o hidróxido de sódio como eletrólito.

Palavras-chave: Eletrolise Hidrogênio, gás de Brown.

ABSTRACT

SILVEIRA, Vander Fabio, M.Sc., State University of West Paraná, February of 2011. **DEVELOPMENT AND EVALUATION OF ELECTROLYTIC REACTOR TO PRODUCE HHO GAS.** Adviser: Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira. Co-adviser: Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

This study aimed to develop and evaluate an electrolytic reaction system for the production of HHO gas. The HHO gas, also known as Brown's gas or hydroxyl gas, can be used together with liquid fuel in Otto and Diesel cycle engines, to reduce their consumption. To conduct the study was built an electrolytic reactor with 360L steel plates in an acrylic vat. It was evaluated the performance of the electrolytic reactor, using the electrolytes of sodium hydroxide and potassium hydroxide. The findings allowed to conclude that the reactor showed better energy performance in the production of HHO gas when using sodium hydroxide as electrolyte.

Key-words: Electrolysis, Hydrogen, Brown's gas.

1. INTRODUÇÃO

Uma das melhores alternativas de processo para a produção de hidrogênio é através da eletrolise da água, pois é um processo relativamente simples onde não é gerado nenhum resíduo, seja ele sólido, líquido ou gasoso que venha a ser prejudicial ao meio ambiente, sendo assim, a produção gasosa de hidrogênio torna-se uma técnica eficiente de transformação e armazenamento de energia limpa. (SOUZA FILHO, 2008).

Conforme CGEE (2011), devido às perspectivas de um prazo relativamente curto para o esgotamento das reservas de petróleo em nível mundial, há a necessidade urgente de reestruturação da matriz energética (MME, 2010). O hidrogênio apresenta-se como um dos combustíveis mais promissores a longo prazo, porém não é uma fonte primária de energia, e para ser produzido necessita da utilização de outras formas de energia em processos artificiais.

Para Koroneos et al., (2004), o hidrogênio é o elemento mais leve e abundante do universo, sendo muito reativo quimicamente e encontrado em outros elementos como: água, combustíveis fósseis, combustíveis renováveis, animais e plantas, porém, para aproveitamento da energia contida neste elemento, ele precisa passar por uma transformação, pois é uma forma de energia secundária.

Desta forma, necessita-se separá-lo de outros elementos, e sendo assim a eletrolise é o processo em estudo deste artigo.

Segundo CGEE (2010), a produção de hidrogênio, a partir da eletrólise da água não produz emissões de poluentes na atmosfera e pode ser viável para o Brasil considerando seu potencial hidrelétrico, eólico e solar, pois temos um dos maiores territórios do mundo com possibilidade de geração de energias renováveis.

Conforme Al-rousan (2010), gás HHO ou gás de Brown é o nome dado ao gás hidrogênio e oxigênio produzido juntos em um Eletrolisador. Este gás pode ser utilizado em motores e geradores em sistema dual, juntamente com um combustível fóssil, para a redução do consumo deste último.

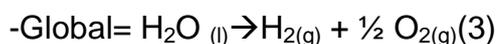
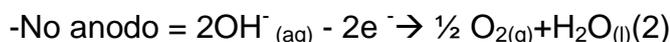
Em vista do exposto, o objetivo deste trabalho é desenvolver um reator eletrolítico para a produção de gás HHO e avaliar o desempenho do mesmo com diferentes eletrólitos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Eletrolise

A eletrólise é um método utilizado na obtenção de reações de oxi-redução. Em soluções eletrolíticas, este processo se baseia na passagem de uma corrente elétrica através de um sistema líquido que tenha íons presentes, gerando assim, reações químicas.(SANTOS JUNIOR, 2004).

Denomina-se como eletrólise da água ao processo eletroquímico de dissociação, onde os produtos finais das reações desencadeadas são hidrogênio e oxigênio moleculares e o balanço mássico destas reações acusa somente a decomposição da água. Quando é aplicada uma força eletromotriz acima de um determinado potencial mínimo, há passagem de corrente entre os eletrodos, desencadeando as reações eletrolíticas, que para o caso de um meio condutor básico, são dadas pelas Equações 1. (SOUZA, 1998).



2.2 Eletrolise para obtenção de H₂

O processo de eletrólise da água consiste basicamente, conforme (Figura 1) na decomposição química da água em seus elementos constituintes, sendo eles o hidrogênio e o oxigênio, e com a utilização de corrente elétrica contínua e uma solução diluída, podendo ser acida ou base. Quando essa corrente elétrica atravessa a água, a ligação entre os elementos se rompe gerando dois átomos de hidrogênio carregados positivamente, e um átomo de oxigênio carregado negativamente. Os íons negativos do oxigênio migram para o eletrodo positivo (ânodo) e os íons positivos de hidrogênio migram para o eletrodo negativo (cátodo). (SOUZA, 1998).

A corrente elétrica diretamente aplicada à água resulta na reação da equação 4, que produz duas vezes mais hidrogênio do que oxigênio.

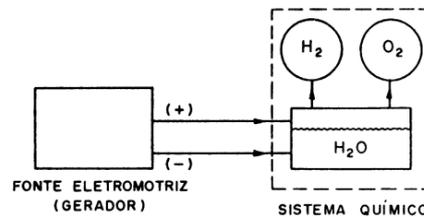
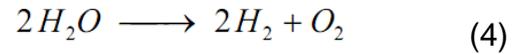


Figura 1 - Diagrama do processo de eletrolise (SANTOS JUNIOR, 2004).

Segundo Silva (1991), a eletrólise da água pode ser considerada um processo reversível, desta forma seu balanço energético é dado por:

Energia elétrica fornecida pelo gerador (E.Q) = Variação da energia química do sistema (ΔG).

Onde:

E = tensão mínima para a eletrólise (Volts)

Q = carga transferida à reação (Coulomb)

ΔG = variação da energia livre de Gibbs da reação (Joules)

Segundo Souza (1998), tem-se:

$$V1 = - \frac{\Delta G}{n} * F$$

Tensão mínima para o desenvolvimento das reações;

$$V2 = \frac{\Delta H}{n} * F$$

Tensão termoneutra, não há troca de calor entre o sistema químico e o meio ambiente.

Onde: n = número de elétrons transferidos na reação.

F = constante de Faraday (96.489 Coulombs/Equivalente).

ΔH = Variação da entalpia da reação.

V_1 e V_2 são funções diretas da temperatura em que se desenvolve o processo.

Assim chega-se às seguintes observações:

- Para tensões abaixo de V_1 , a eletrólise não ocorre;
- Para tensões entre V_1 e V_2 , a eletrólise ocorre desde que seja fornecido calor ao processo;
- Para tensões acima de V_2 , a eletrólise é obtida com transferência de calor para o meio ambiente.

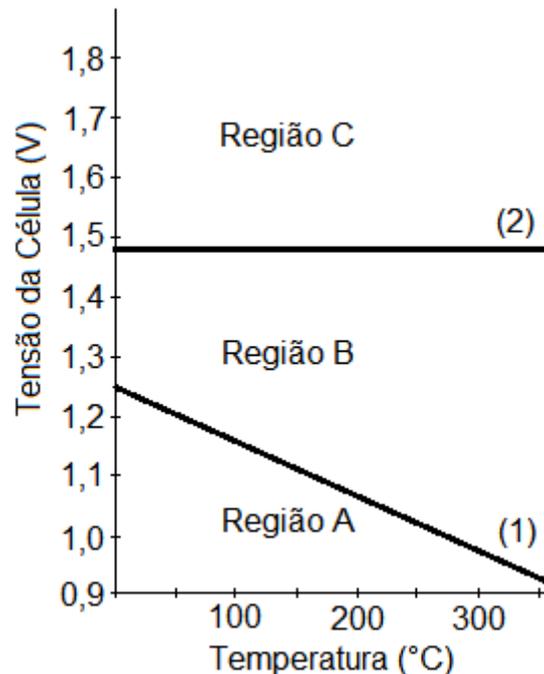


Figura 2 - Curvas de tensão aplicada versus temperatura para a eletrólise (SOUZA, 1998).

Região A: impossível à geração de H_2 ; região B: geração de H_2 através de calor e eletricidade; região C: geração de H_2 e calor através de eletricidade; curva 1: voltagem reversível; curva 2: voltagem termoneutra.

Segundo Souza (1998), a maioria dos eletrolisadores opera na Região C, como mostra a Figura 2, onde uma tensão é aplicada acima do valor limite inferior

determinado pela termodinâmica. A diferença entre a tensão de operação da célula eletrolítica e a tensão mínima é conhecida como sobretensão da célula. Quanto maior essa diferença, isto é, quanto maior a tensão de operação da célula, menor sua eficiência, e maior seu consumo de energia, conforme indicado na Tabela 1.

Tabela 1- eficiência dos eletrolisadores (SOUZA, 1998).

Eficiência (%)	Tensão de Operação (V)	Consumo de Energia (kWh/Nm ³)
100	1,481	3,544
96	1,543	3,692
92	1,610	3,852
88	1,683	4,027
84	1,763	4,219
80	1,839	4,400
78	1,899	4,544
76	1,949	4,663
74	2,001	4,789
72	2,057	4,922
70	2,116	5,063

2.3 Tipos de eletrólise

Existem basicamente dois tipos de eletrolise: a ígnea e a aquosa.

Na eletrolise ígnea, o meio eletrolítico é constituído por uma substância iônica fundida, processo este que ocorre em altas temperaturas em torno de 800°C dependendo da substância utilizada (NOBREGA, SILVA e SILVA 2007).

Segundo os mesmos autores, eletrolise aquosa é o nome de uma reação química provocada pela passagem de corrente elétrica por meio de uma solução de um eletrólito dissolvido em água a baixas temperaturas, geralmente de 45 a 100°C.

Segundo Souza (1998), a eletrólise da água é o processo eletroquímico de dissociação da água em hidrogênio e oxigênio por meio de reações químicas desencadeadas a partir de uma fonte eletromotriz (gerador). Assim, tensão e correntes são fornecidas aos eletrodos (cátodo e ânodo) existindo um meio condutor iônico líquido (eletrolise aquosa) ou sólido (eletrolise ígnea). Quando se

aplica uma força eletromotriz acima da curva 2, conforme a Figura 1, ocorre, dessa forma, a passagem de corrente entre os eletrodos, produzindo no cátodo hidrogênio e no ânodo oxigênio.

2.4 Tipos de eletrolisadores

Segundo Souza (1998), os eletrolisadores são classificados em unipolares ou bipolares (tipo tanque) e bipolares (filtro prensa). Unipolar é quando os eletrodos possuem uma única polaridade que podem ser positiva ou negativa, desta forma, cada eletrodo processa uma única reação e, conseqüentemente, produz somente um gás (H_2 se for ao eletrodo negativo ou O_2 se for o eletrodo positivo). Os eletrodos são arranjados eletricamente em paralelo e em um reservatório tipo tanque, onde circula uma elevada corrente elétrica e uma baixa tensão elétrica.

Segundo o mesmo autor, os eletrolisadores tipo bipolar são aqueles onde cada eletrodo processa duas reações, sendo de um lado (catodo) o H_2 e do outro lado O_2 (anodo), onde o arranjo elétrico dos eletrodos é feito em serie, contendo baixas correntes e altas tensões.

2.5 Gás de Brown, Gás hidróxi ou Gás HHO

Gás de Brown, gás hidróxi ou gás HHO, são nomes dados ao gás hidrogênio e oxigênio produzido juntos em um eletrolisador. A mistura estequiométrica é relacionada com a da água. O gás de Brown foi desenvolvido e patenteado pelo professor Yull Brown em 1977 com a finalidade de demonstrar a possibilidade de produzir aquecimento através do gás proveniente da água. (AL-ROUSAN, 2010).

O gás hidróxi ou gás Hho é formado por H_2 e O_2 separados por moléculas distintas, em seu estado mono atômico (um único átomo por molécula) gerado pelo processo de eletrólise da água, normalmente com eletrólitos como NaOH, KOH ou aditivos como o NaCl. (YILMAZ; ULUDAMAR; AYDIN, 2010).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 MATERIAL

3.1.1 Localização do experimento

O experimento foi realizado no laboratório de energia e no laboratório de gaseificação de biomassa do Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura da Unioeste, Campus de Cascavel, na latitude de 24°59'20.74"S, longitude de 53°26'58.49"O, e altitude de 790m (Google Earth, 2010).

3.1.2 Materiais utilizados na construção do reator eletrolítico

Na construção do reator eletrolítico foi utilizado um recipiente em acrílico transparente cristalino, formando um reservatório de 25 cm de largura por 25 cm de profundidade e 15 cm de altura, com capacidade total de armazenamento de 8,125 litros ou 8125 cm³. A Figura 3 apresenta o reservatório utilizado.

Os eletrodos utilizados no reator foram confeccionados de aço inox tipo 316L (constituído por ferro, cromo e níquel) com base em artigo publicado por Al-Rousan (2010), com 24,5cm de largura por 7 cm de altura com área de 171,5cm² e espessura de 1 mm. Para a montagem do feixe de eletrodos, foram utilizados parafusos do mesmo material. A Figura 3 apresenta o detalhe da montagem dos eletrodos. O espaçamento entre um eletrodo e outro foi fixado em 1 cm.



Figura 3 - Eletrolisador eletrolítico.

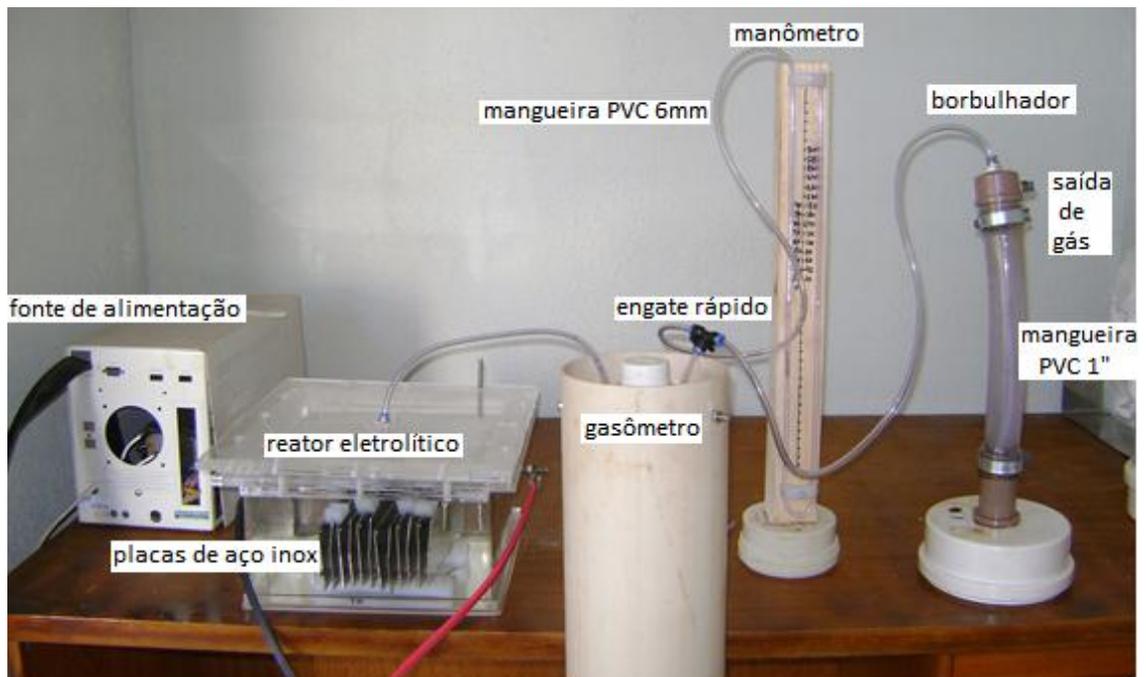


Figura 4 - Sistema completo desenvolvido para a produção de gás HHO.

3.1.3 Materiais utilizados na construção do gasômetro

Para armazenamento do gás HHO produzido, montou-se um gasômetro com tubo de PVC, série normal (branco) com diâmetro nominal de 40 milímetros e comprimento de 1,2 metros, encaixado em outro tubo de PVC, série normal (branco) de 50 milímetros para servir de guia e colocado dentro de outro tubo de PVC, série normal (branco) de 150 milímetros com a função de reservatório de água. O tubo de 40mm foi graduado em centímetros sendo que, cada centímetro correspondia a um volume de gás de 11,34 centímetros cúbicos.

3.1.4 Materiais utilizados na construção do Borbulhador

O Borbulhador (corta-chama) foi construído com mangueira de PVC flexível e transparente, cano de PVC rígido tipo soldável (cor marrom), abraçadeiras de metal e engate rápido do tipo utilizados em pneumática para as conexões de entrada e saída do gás.

Este tem a finalidade de bloquear a chama se ocorrer um retorno proveniente da admissão do motor, pois o gás entra pela mangueira que se encontra submerso em água, as bolhas de gás emergem, saem do Borbulhador e entram na admissão do motor, conforme a Figura 5.

3.1.5 Materiais utilizados na construção manômetro

O manômetro foi construído, utilizando-se o princípio de vasos comunicantes, com tubo de PVC flexível e transparente em formato de U, conforme apresentado na Figura 5 (item 7), onde a entrada do gás a ser medido está posicionado no lado “a”, e o lado “b” é aberto para a entrada da pressão atmosférica, pois quando a pressão do gás a ser medido é maior que a pressão atmosférica, verifica-se uma diferença dos níveis da coluna de água, e esta diferença é a pressão exercida pelo gás em milímetros, coluna d’água (mmH₂O).

3.1.6 Equipamentos utilizados para a medição de corrente

Para o registro da corrente solicitada pelo reator, foi utilizado um alicate amperímetro marca Minipa, modelo VA750, em escala de 200 amperes, colocado em um dos cabos que alimenta o experimento em teste.

3.1.7 Equipamentos utilizados para a medição de tensão

O registro da tensão foi realizado com o equipamento chamado de multímetro, utilizando a função de tensão contínua na escala de 100 volts, também de marca comercial Minipa, modelo ET2053.

3.1.8 Fonte utilizada para fornecimento de energia

Foi utilizada uma fonte de energia com entrada de rede convencional de 127/220 volts com tensão de saída de 24 volts contínuo com capacidade de alimentação de 50 amperes de saída.

3.2 Sistema de Produção de Gás HHO Desenvolvido

As Figura 4 e 5 apresentam os principais elementos do sistema de produção eletrolítica de gás HHO desenvolvido. Na Figura 4 observa-se o esquema de montagem do sistema, sendo que para o funcionamento do sistema utilizou-se a conversão da fonte de tensão alternada de 127 V para 24 V em corrente contínua fornecida pela fonte apresentada no esquema. A cuba eletrolítica foi montada com 12 placas de aço inox tipo 316L (ferro, cromo e níquel) e imersas na solução eletrolítica dentro do reservatório acrílico, conforme pode ser observado na Figura 5. O sistema desenvolvido apresenta características semelhantes ao sistema desenvolvido por Al-Rousan (2010), diferenciando-se pelo arranjo e dimensões das placas utilizadas como eletrodos.

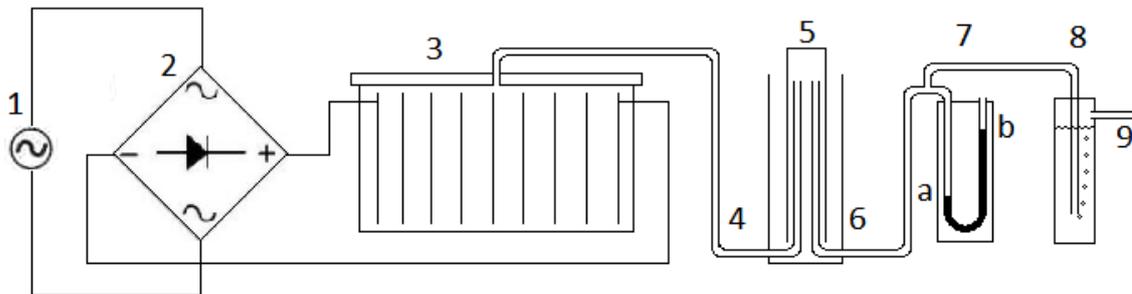


Figura 5 - Esquema geral do sistema montado para a geração de gás HHO.

1- Fonte de alimentação alternada proveniente da rede de alimentação; 2- Retificador de tensão alternada para contínua; 3- Eletrolisador bipolar convencional; 4- Tubulação de entrada do gás no gasômetro; 5- Gasômetro (constituído por dois tubos de PVC, sendo o maior com diâmetro de 150mm e o menor com diâmetro de 40mm, ambos cheios de água, fazendo com que o tubo menor levante por meio da pressão do gás e possibilite a leitura da quantidade de gás produzido. 6- Tubulação de saída do gás no gasômetro; 7- Medidor de pressão (manômetro) para a correção de volume do gás produzido onde “a” (altura da coluna inferior do líquido alterada pela pressão interna do gasômetro), “b” (altura da coluna superior do líquido, onde a diferença da pressão atmosférica com a pressão interna corresponde ao valor da pressão do sistema); 8- Borbulhador (corta chama) sistema de segurança, em caso de haver um retorno de fagulha pelo motor de combustão que será aplicado; 9- Saída de gás que será admitido pelo motor de combustão interna.

Como pode ser observado na Figura 5, o gás produzido pela reação eletrolítica era acondicionado pela parte superior do reator e conduzido ao gasômetro, através de mangueiras de PVC. O manômetro instalado permite a determinação da pressão de gás produzido instantaneamente, fazendo com que o gás seja armazenado no gasômetro e liberado pela saída do Borbulhador.

3.3 Métodos

3.3.1 Montagem do experimento

A eletrolise em meio aquoso foi realizada em uma célula eletroquímica simples do tipo bipolar com tecnologia convencional onde a água é eletrolisada por eletrodos imersos, do tipo aço inox 316L, por serem mais resistentes à corrosão, suportando a reação com o eletrólito de hidróxido de potássio (KOH) e hidróxido de sódio (NaOH).

A tensão nominal aplicada no reator para os dois eletrólitos estudados foram de 24V e com uma tensão de célula (entre placas) de aproximadamente 2 Volts, onde a eficiência foi de aproximadamente 75%, conforme a tabela 1.

3.3.2 Procedimento para eletrolise com NaOH

Para o experimento com NaOH foram utilizadas concentrações menores que 1% em massa, pois segundo Yilmaz, Uludamar e Aydin (2010), com soluções superiores a 1% em massa, a corrente elétrica fornecida pela fonte de alimentação aumentaria drasticamente devido à redução excessiva da resistência elétrica entre os eletrodos, sendo assim foram usados apenas 40g de hidróxido de sódio, dissolvidos em 8,125 litros de água destilada, o que corresponde, aproximadamente a uma concentração de 0,5% em massa, diluídos no reservatório.

Após a dissolução e pesagem com uma balança de precisão analítica, marca Toledo, modelo AR 2140, foram ligados os eletrodos na fonte de alimentação para início do processo de eletrolise, onde após alguns minutos foram constatados a existência de gás no gasômetro, pela subida do cano mais fino e alteração do nível

da água no manômetro indicando que a pressão interna superava a pressão atmosférica e bolhas no Borbulhador.

3.3.3 Procedimento para eletrolise com KOH

Os mesmos procedimentos descritos no item anterior foram seguidos para o experimento com hidróxido de potássio.

Para o experimento com KOH foram utilizadas concentrações ligeiramente superiores a 1% em massa, pois segundo Yilmaz, Uludamar e Aydin (2010), com soluções superiores a 1% em massa, a corrente elétrica fornecida pela fonte de alimentação aumentaria drasticamente devido à redução excessiva da resistência elétrica entre os eletrodos, sendo assim foram usados apenas 100g de hidróxido de sódio, dissolvidos em 8,125 litros de água destilada, o que corresponde a aproximadamente a uma concentração de pouco mais de 1% em massa, no reservatório de acrílico.

Após a dissolução e pesagem com uma balança de precisão analítica, marca Toledo, modelo AR 2140, foram ligados os eletrodos na fonte de alimentação para início do processo de eletrolise, onde, após alguns minutos, também foram constatados a existência de gás no gasômetro, pela subida do cano mais fino e alteração do nível da água no manômetro, indicando que a pressão interna superava a pressão atmosférica, aparecendo bolhas na saída do Borbulhador.

3.3.4 Medição da temperatura de solução e ambiente

Multímetro marca Minipa, modelo ET-2053, categoria II, utilizando a função de temperatura em graus Celsius com o elemento de medição chamado termopar, tipo J, para coleta das temperaturas envolvidas na solução eletrolítica e a temperatura ambiente.

3.3.5 Medição do volume de gás HHO produzido

A medição do volume de gás produzido foi verificado através de um gasômetro construído com cano de PVC branco, conforme Figura 6.

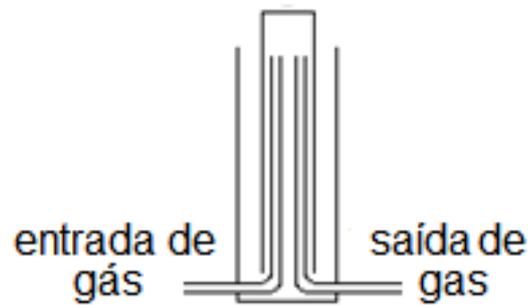


Figura 6 - Gasômetro de PVC utilizado para medir o volume de gás produzido.

3.3.6 Análise de dados

Após o término dos experimentos com KOH e NaOH foram analisados os dados técnicos e colocados em gráficos para posterior análise sobre as informações coletadas, cujos resultados estão dispostos nos próximos capítulos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação do Desempenho do reator eletrolítico

Os resultados da avaliação do volume de gás HHO, produzido pelo sistema em função da energia consumida pelo sistema, utilizando-se os dois tipos de eletrólito testados (NaOH e KOH), são apresentados nas Figuras 7 e 8.

Na Figura 7 é apresentado o resultado do experimento com o eletrólito de NaOH (hidróxido de sódio), no eixo vertical estão os dados do volume de produção de gás HHO e no eixo horizontal está o consumo de energia gasta em Wh (Watt Hora). A produção menor de gás HHO foi de 374,22cm³ com um gasto de energia de 10,44Wh e a produção maior foi de 669,06cm³ de gás HHO, com um gasto de 13,99Wh para o eletrólito de NaOH. No eletrólito de KOH, o consumo menor foi de 15,30Wh e produção de gás HHO 544,32cm³, o consumo maior foi de 18,08Wh, produzindo 657,72cm³ de gás HHO. O intervalo de análise de produção do referido gás HHO foi de 3 em 3 minutos, ou seja, um intervalo de tempo de aproximadamente 8 horas entre início e fim do experimento com um total de 150 repetições.

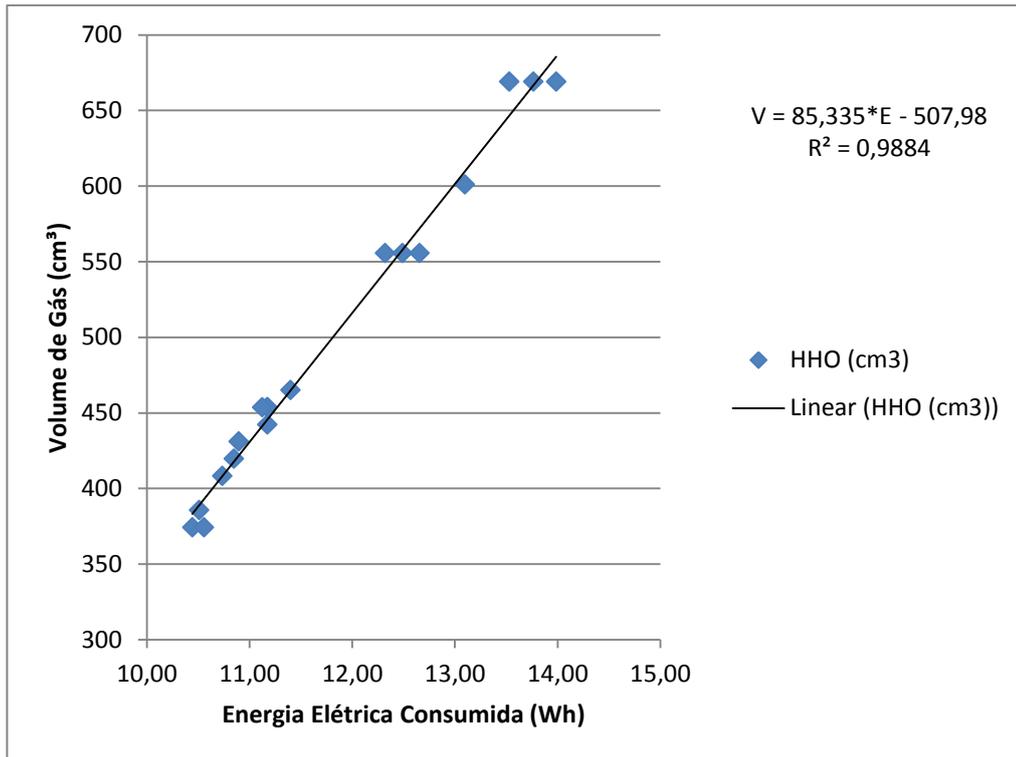


Figura 7 - Volume de gás produzido em função da energia elétrica consumida na eletrólise de NaOH.

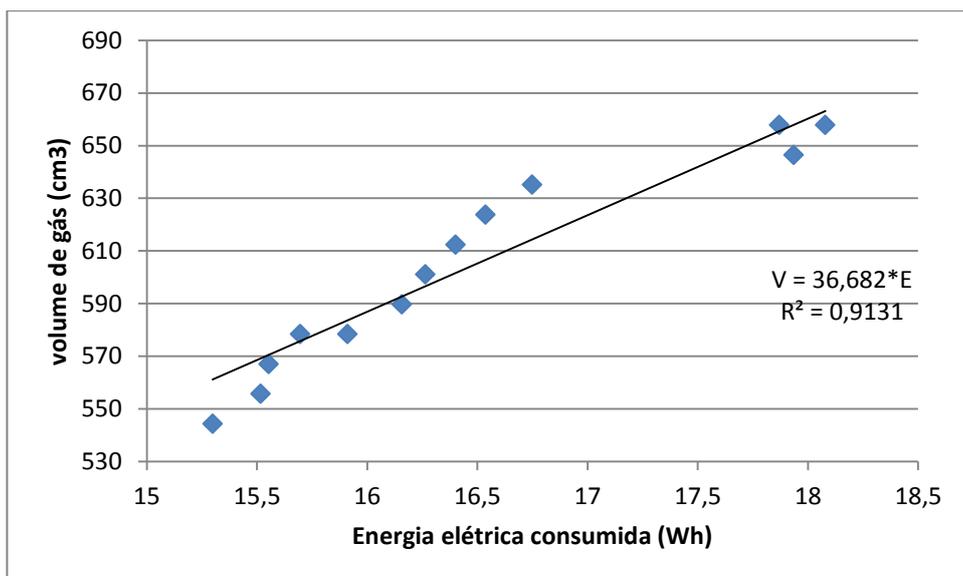


Figura 8 - Volume de gás produzido em função da energia elétrica consumida na eletrólise KOH.

Este trabalho foi desenvolvido e comparado com outros trabalhos já realizados na mesma área de pesquisa conforme: Saravanan e Nagarajan (2008); Yilmaz, Uludamar e Aydin (2010); Wang, Ji e Zhang (2010) e Al-Rousan (2010). Segundo esses autores foram verificados, através de experimentos que, o eletrólito de hidróxido de sódio (NAOH) permaneceu com melhores resultados quando comparados com outros eletrólitos como, hidróxido de potássio e cloreto de sódio, pois o NAOH produziu 20% a mais de HHO, com a mesma quantidade de energia por m³ deste gás.

5. CONCLUSÕES

A partir dos experimentos realizados com os eletrólitos trabalhados chegou-se às seguintes conclusões:

O eletrólito mais adequado à produção de gás HHO é o hidróxido de sódio (NaOH) em uma concentração de 40 gramas diluídos em 8,125 litros de água destilada;

A eficiência do eletrólito de NaOH é maior comparada com KOH, pois o eletrólito de KOH necessita de maior consumo de energia por m³;

O eletrólito de hidróxido de potássio (KOH) necessita de maior concentração (100 gramas) e, conseqüentemente, de maior energia para a mesma produção de gás HHO, tornando a produção menos eficiente;

O sistema Eletrolisador montado atendeu às expectativas de produção de gás para os testes efetuados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-ROUSAN, Ammar A.. **Reduction Of Fuel Consumption In Gasoline Engines By Introducing Hho Gas Into Intake Manifold**. International Journal Of Hydrogen Energy, Mutah, p. 12930-12935. 30 ago. 2010.

CGEE, (Centro de Gestão e Estudo Estratégico) (Brasil) (Org.). **Hidrogênio energético no Brasil.: ciência, tecnologia e inovação**, Brasília, n. 68, p.01-69, 01 ago. 2010. Disponível em: <www.cgee.org.br/publicacoes/hidrogenio.php>. Acesso em: 15 abr. 2011.

EART, Google **Earth** 2011. Informações geográficas do mundo em três dimensões. Disponível em: <http://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>

KORONEOS, C. et al. **Life cycle assessment of hydrogen fuel production processes**. International Journal Of Hydrogen Energy, Thessaloniki, p. 1443-1450. 21 jan. 2004.

MME Ministério De Minas E Energia, Brasília. “**Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil, Versão Beta**”, 2005, Ministério de Minas e Energia. Disponível na internet em <http://www.mme.gov.br>. Acesso em setembro de 2010.

NOBREGA, Olimpio Salgado; SILVA, Eduardo Roberto Da; SILVA, Ruth Hashimoto Da. **Química**. São Paulo: Atica, 2007. 592 p.

SANTOS JÚNIOR, A. C. F.. **Análise da Viabilidade Econômica da Produção de Hidrogênio em Usinas Hidrelétricas: Estudo de Caso em Itaipu**. 2004. 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Produção). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina Florianópolis, 2004.

SARAVANAN, N.; NAGARAJAN, G.. **An experimental investigation of hydrogen-enriched air induction in a diesel engine system**. International Journal Of Hydrogen Energy: elsevier, Chennai, p. 1769-1775. 20 fev. 2008.

SOUZA FILHO, João Sales De. **Caracterização de um Eletrolisador Bipolar para Produção de Hidrogênio Visando o Uso de Painéis Fotovoltaicos como Fonte de Energia**. 2008. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Departamento de Centro de Ciências e Tecnologia – CCT, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande – PB, 2008.

SOUZA, Samuel Nelson Melegari De. **Aproveitamento de Energia Hidroelétrica Secundária para a Produção de Hidrogênio Eletrolítico**. 1998. 211 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós Graduação de Planejamento de Sistemas Energéticos, Departamento de Engenharia Térmica e Fluidos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

WANG, Shuofeng; JI, Changwei; ZHANG, Bo. **Effect of hydrogen addition on combustion and emission performance of a spark-ignited engine**

and stoichio metric conditions. Elsevier: international journal of hydrogenenergy, Beijing, p. 9205-9213. 12 jun. 2010.

YILMAZ, Ali Can; ULUDAMAR, Erinc,; AYDIN, Kadir. **Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines.** International Journal Of Hydrogen Energy: elsevier, Adana, p. 11366-11372. 11 ago. 2010.

CAPITULO II

EFEITO DA INJEÇÃO DE GÁS HHO EM UM GERADOR A GASOLINA PARA FINS DE ENERGIZAÇÃO RURAL

RESUMO

SILVEIRA, Vander Fabio, M.sc; Universidade Estadual do Oeste do Paraná; Janeiro de 2012; **Efeito da Injeção de Gás HHO em um Gerador a Gasolina para Energização Rural**; Orientador: Prof. Dr. Jair Antônio Cruz Siqueira. Co-orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

Este trabalho teve por objetivo avaliar a injeção de gás HHO proveniente de um eletrolisador, tipo bipolar convencional, em um moto-gerador a gasolina. Após a injeção de gás HHO, juntamente, com a gasolina, foram verificados e comparados os parâmetros dos gases de exaustão, temperatura de escape, poluição expelida, consumo específico do motor e excesso de ar. Os principais resultados encontrados permitiram avaliar que, quando o motor foi alimentado com gasolina e gás HHO, houve melhor desempenho com relação a queima de combustível, do que quando alimentado apenas com gasolina. Os resultados permitiram concluir que o motor consumiu menor quantidade de gasolina e gerou menor quantidade de gases poluentes, quando em operação com a injeção de gás HHO, sem a necessidade de mudanças radicais na concepção do motor.

Palavras-chave: Gás HHO, Consumo específico, Moto-gerador.

ABSTRACT

SILVEIRA, Vander Fabio, M.sc., State University of West Paraná, January of 2012. **EFFECT OF HHO GAS INJECTION IN A GASOLIN POWER GENERATOR FOR THE PURPOSE OF RURAL ENERGY**. Adviser: Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira. Co-adviser: Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

This study aimed to evaluate the injection of HHO gas from electrolyzer in a conventional bipolar type in a gasoline power generator engine. After the HHO gas injection with gasoline, were observed and compared the parameters of the exhaust gases, exhaust temperature, expelled pollution, specific consumption of the engine and excess air. The main finding results allowed to evaluate that when the engine was fueled with gasoline and HHO gas, there was a better performance in relation to fuel burning, than when fed only with gasoline. The results showed that the engine consumed lower amount of gasoline and generate fewer greenhouse gases while operating with the injection of HHO gas without the need of radical changes in engine design.

Palavras-chave: HHO gas, Specific consumption, engine-generator.

1. INTRODUÇÃO

Existe no Brasil aproximadamente 25 milhões de pessoas, destas, 15% vivem sem acesso à energia elétrica em suas residências, sendo que a grande maioria vive em comunidades rurais ou em áreas de difícil acesso. Estima-se que existem 100 mil propriedades rurais ainda sem eletricidade em nosso país. Para fornecer energia a esta população seria necessário o transporte por longas linhas de transmissão onde o custo seria demasiadamente grande. Uma solução a este impasse, seria a geração em pequena escala, através da chamada geração distribuída, fornecida por pequenas centrais hidrelétricas locais ou até mesmo por geradores a combustão interna (WALTER, 2000).

Em locais onde não existem redes de energia proveniente da chamada geração distribuída e nem a chamada geração centralizada, são utilizados os sistemas de geração por motores de combustão interna, também chamados de moto-gerador, onde cada unidade gera desde alguns quilowatts até megawatts, sendo alimentados normalmente por gasolina, diesel ou gás natural. Estes moto-geradores também são muito utilizados em propriedades rurais aonde existam sistemas chamados de biodigestor que produzem gás combustível adequado para manter a propriedade auto suficiente em energia. Porém estes sistemas produzem gases poluentes nocivos ao meio ambiente, podendo contribuir para a redução da camada de ozônio no planeta.

A crescente demanda por combustíveis derivados do petróleo associado a redução da produção mundial levou ao aumento do preço, promovendo assim a procura por outras soluções que não dependessem de hidrocarbonetos. Sendo assim, os pesquisadores buscam uma alternativa de combustível que pode ser usado em motores sem a necessidade de grandes mudanças mecânicas. Uma das alternativas seria o hidrogênio no estado gasoso, pressurizado para ser utilizado como combustível em motores de combustão interna. Segundo estudos recentes observaram-se algumas vantagens, como melhora na potência do motor, redução nas concentrações de poluentes expelidos no escape e redução no consumo específico. Uma alternativa para a obtenção do gás hidrogênio é através do processo relativamente simples chamado de eletrolise da água onde o gás hidrogênio pode ser retirado da água por uma reação endotérmica. Nesta reação, o

oxigênio também é desprendido da água, podendo ser utilizado, juntamente com o hidrogênio e o combustível base (gasolina, diesel ou gás natural) em motores de combustão interna. Como alguns tipos de eletrolisadores não dispõem de separação do oxigênio e do hidrogênio esta mistura é conhecida como gás HHO (SIERENS, 2000).

Este trabalho tem por objetivo a injeção de gás HHO proveniente da água concebido por meio de eletrolise em um Eletrolisador construído em uma caixa acrílica, do tipo bipolar convencional, em que os gases provenientes da reação H_2 e O_2 , são conduzidos e levados até a câmara de combustão juntos, lá este gás é queimado com a gasolina em um moto-gerador, com a finalidade de constatar os efeitos deste gás no motor, assim como as alterações nos gases de exaustão.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 Geradores a combustão interna para energização rural

2.2 Gerador a diesel

São motores de combustão interna, ciclo diesel, com aplicação geralmente em regime estacionários, onde a energia primaria proveniente de combustível fóssil, neste caso diesel, é transformada em energia mecânica e transferida ao gerador elétrico através de acoplamento por eixo, correia ou polias. (VALENTE, 2007).

2.3 Gerador a gasolina

São motores de combustão interna, ciclo Otto, com aplicação geralmente em regime estacionários, onde a energia primaria proveniente de combustível fóssil, neste caso gasolina, é transformada em energia mecânica e transferida ao gerador elétrico através de acoplamento por eixo, correia ou polias. (VALENTE, 2007).

2.4 Relação estequiométrica entre combustível e ar

Segundo Andrade (2007), um combustível a base de hidrocarbonetos poderá ser completamente oxidado somente se o oxigênio constante na mistura estiver a uma relação denominada de estequiométrica, onde existe uma quantidade exata de combustível e ar, sendo assim cada tipo de combustível tem uma quantidade especifica.

$$\lambda = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_{at}}{\left(\frac{A}{F}\right)_{st}} \quad (1)$$

onde:

A: ar atmosférico e F: combustível admitido pelo motor;

at = é a relação real de massa de ar e combustível que está sendo admitida pelo motor Kg/Kg;

st = é a relação de massa ideal de combustível e ar estequiométrico Kg/Kg;

Tabela 2 - relação da mistura λ

Mistura	λ
Rica	<1
Pobre	>1
Estequiométrica	=1

Ainda, segundo o mesmo autor, podemos classificar uma mistura entre ar e combustível como mistura rica ou mistura pobre, mistura rica é onde existe falta de oxigênio para a completa oxidação dos reagentes, também chamada de excesso de combustível, portanto $\lambda < 1$. Já para a mistura pobre existe uma mistura com excesso de ar ou falta de combustível, chamamos de $\lambda > 1$.

2.5 Desempenho de geradores a combustão interna

O motor tem sua capacidade definida em termos de potência, normalmente em HP (Horsepower) ou CV (Cavalo Vapor), indicando a quantidade de trabalho que ele consegue realizar em uma unidade de tempo. O rendimento é a relação entre a potência produzida e a potência calorífica entregue, ou seja, é a eficiência de transformação de calor em trabalho para um ciclo onde $\eta_t = \text{Potência produzida} / \text{Potência calorífica}$ (SOUZA; SILVA; BASTOS, 2010).

$$\eta_{conj} = \frac{[(P*1000)*3600]}{mc*Hc} \quad (2)$$

Onde:

P: Potência gerada (W); mc: vazão mássica do combustível (kg.h^{-1}); Hc: poder calorífico do combustível (kJ.kg).

O motor de combustão utilizado para prover energia mecânica ao gerador elétrico precisa produzir rotação de forma constante para manter a frequência da onda senoidal, de acordo com as especificações dos equipamentos a serem alimentados pelo gerador. Conforme a equação (3), é possível conhecer a velocidade de rotação do motor n em (rev/min):

$$n = \frac{120f}{np} \quad (3)$$

Em que n : rotação do motor (rpm); f : frequência da onda senoidal (Hz); n_p : número de pólos do gerador elétrico.

2.6 Consumo de combustível e rendimento térmico de um motor

A medição do consumo de combustível é necessária para determinar a eficiência com que o motor transforma a energia química do combustível em trabalho útil. Com os valores da massa de combustível consumido, potência medida e tempo, calcula-se o consumo específico de combustível em g/kWh. (VALENTE, 2007).

2.7 Geradores a combustão funcionando com hidrogênio e/ou gás HHO

O gás HHO produzido a partir da água pode ser utilizado em motores e moto-geradores em sistema dual, juntamente com o combustível fóssil. O gás HHO pode aumentar o torque do motor e reduzir as emissões de gases como o monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO₂) e diminuir o consumo específico de combustíveis fósseis. (AL-ROUSAN, 2010).

2.8 Emissões produzidas por motores de combustão interna

Emissões decorrentes da queima de combustíveis fósseis em motores de combustão interna são formadas por várias substâncias. Normalmente, são constituídas por água, óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrocarbonetos, nitrogênio, oxigênio e hidrogênio. Destas, apenas algumas são consideradas poluentes como, óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono e os hidrocarbonetos não oxidados. Esses gases poluentes são gerados devido a não oxidação de todo combustível admitido pela câmara de combustão, pois em condições ideais onde a relação entre oxigênio e combustível for estequiométrica somente CO₂ e água seria produzida, mas em condições reais esta relação pode ser difícil de ser conseguida e a queima de combustível fornece além do CO₂ e água, outros elementos considerados poluidores como monóxido de nitrogênio (NO) e monóxido de carbono (CO). A quantidade emitida depende de vários fatores como a temperatura de trabalho, composição do combustível, estado do motor, tipo do óleo lubrificante e rotação de trabalho.

3. MATERIAL E METODOS

3.1 Material

3.1.1 Localização do experimento

O experimento foi realizado no LENE (laboratório de energia) e no laboratório de gaseificação de biomassa do Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura da Unioeste, Campus de Cascavel, na latitude de 24°59'20.74"S, longitude de 53°26'58.49"O e altitude de 790m.

No desenvolvimento do experimento utilizou-se um motor gerador, marca Toyama, modelo TF1200, (Figura 9) e sua descrição técnica, conforme a tabela 2, fornecida pelo fabricante.



Figura 9 - moto-gerador, marca Toyama, modelo TF1200.

Tabela 2 - descrição técnica do moto-gerador.

MOTOR		GERADOR		GRUPO	
Tipo	Monocilíndrico, 4 Tempos, OHV 25°	Potência máxima CA	1,2 KVA	Capacidade do tanque	5 L
		Potência nominal CA	1 KVA	Autonomia na potência nominal	9 h
Modelo motor	TF25FX	Tensão de Saída	115 V	Nível de ruído a 7m de distância	67 dB
Cilindrada	87 cc	Corrente nominal CA	9,5 A	Voltímetro	Sim
Cilindro (diâmetro x curso)	54x38 mm	Tomadas	2x115 V	Indicador de nível de combustível	Não
Potência nominal / Rotação	2,4HP/3600RPM			Protetor de sobrecarga	Sim
Taxa de compressão	7,7:1	Tipo / Fases	Monofásico	Alerta de nível de óleo	Sim
Combustível	Gasolina	Fator de potência	$\cos \phi=1$	Estrutura	Aço tubular
Sistema de partida	Manual retrátil	Frequência	60 HZ	Dimensões (L x C x A)	460 x 365 x 390 mm
		Regulador de Tensão	Capacitor	Peso	25 Kg

3.1.2 Material utilizado para construir as cargas resistivas

Foram utilizadas 8 lâmpadas de 100 W cada para servir de carga ao gerador, conforme a Figura 10, de modo que cada lâmpada era acionada independentemente por interruptores formando assim a carga necessária para cada teste.

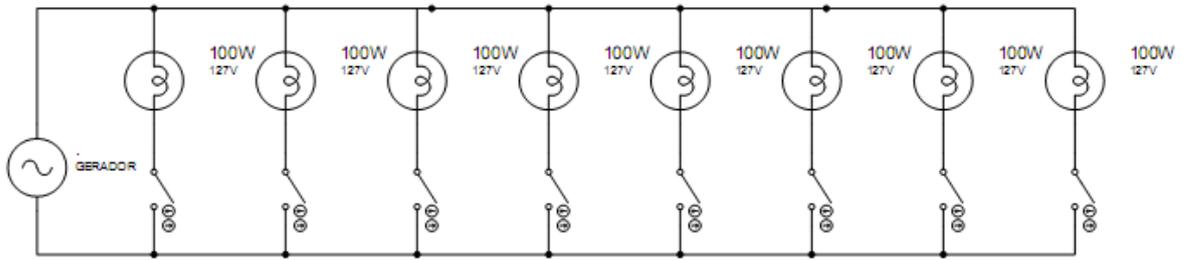


Figura 10 - cargas resistivas ligadas ao gerador.

3.1.3 Determinação da tensão

Para monitorar a tensão gerada pelo moto-gerador foi utilizado o voltímetro instalado no painel do próprio gerador, conforme visto na Figura 9.

3.1.4 Equipamento utilizado para a medição da frequência

Para o registro da frequência da tensão gerada pelo conjunto moto-gerador foi utilizado um equipamento denominado de multímetro com a função selecionada em frequencímetro, marca Minipa, modelo ET-2053, onde foram anotadas os valores para posteriormente serem avaliados (Figura 11).



Figura 11–Frequencímetro marca Minipa, modelo ET-2053.

3.1.5 Medição da temperatura

Para a determinação da temperatura de saída dos gases de exaustão foi utilizado um equipamento com sensor termopar, tipo K, marca Kalimex Tools Professional, modelo M890T, posicionado e fixado na saída do escape por onde eram expelidos os gases de exaustão proveniente do motor à combustão interna, conforme Figura 12.



Figura 12–Termômetro marca Kalimex, modelo M890T.

3.1.6 Medição da corrente

Para registrar a corrente solicitada pela carga de lâmpadas ao moto-gerador foi utilizado um alicate amperímetro, marca Instrutherm, modelo Va-750, visto que o equipamento faz a leitura, através do campo elétrico que circula pelo condutor sem a necessidade de abrir o circuito para efetuar a leitura de seus valores, conforme Figura 13.



Figura 13 - Alicates amperímetro, marca Instrutherm, modelo VA-750.

3.1.7 Medição dos gases de exaustão

Para quantificar os gases gerados pelo motor em estudo foi utilizado um analisador de combustão e emissões fabricado pela Homis com o modelo PCA3, conforme a Figura14.



Figura 14 - Analisador de combustão e emissões, marca HOMIS modelo PCA-3.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Montagem do experimento

O experimento foi realizado com um gerador elétrico acoplado em um motor à combustão, denominada de moto-gerador ou, grupo gerador com algumas alterações na estrutura original, onde foi preciso efetuar a retirada do tanque original, substituída por uma proveta graduada para determinar o consumo em pequenos intervalos de tempo. O carburador original precisou ser deslocado para inserção do injetor de HHO que permaneceu entre o carburador e a válvula de admissão do motor de combustão durante os testes realizados com gás HHO.

Ao inserir o injetor de gás HHO no moto-gerador o carburador precisou ser deslocado e por este motivo a haste de conexão, conforme (Figura 16), entre o carburador e o regulador automático de rotação (RAR), precisou ser desconectada conforme (Figura 17). Assim, foi necessário fazer ajustamento manual com relação à aceleração para manter uma velocidade de rotação do motor em 3600 RPM, para cada carga utilizada, através do ajuste disponível no carburador, conforme a Figura 15.



Figura 15 - ajuste manual de aceleração e rotação.



Figura 16 - haste de conexão com RAR

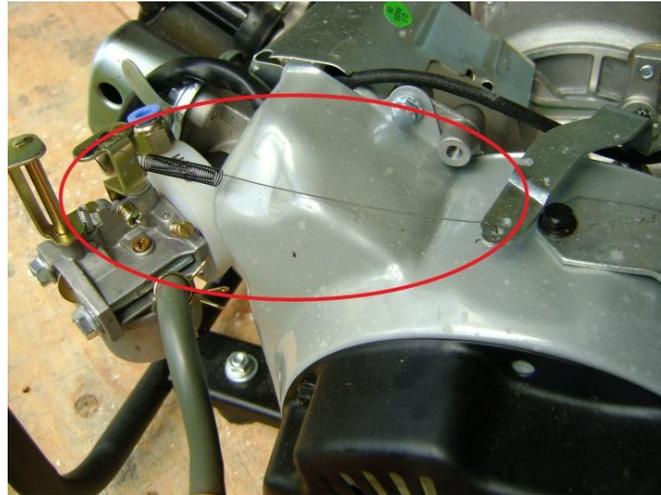


Figura 17 - sem a haste de conexão do carburador com o RAR

3.2.2 Medição do consumo de combustível

Para medir o consumo de gasolina do moto-gerador foi utilizado uma proveta graduada em mililitros com capacidade máxima de 100 ml, conforme pode ser observado na Figura 18. Registrou-se o valor da diferença do combustível gasto a cada minuto, sendo realizadas 10 repetições para cada uma das 9 cargas. As cargas elétricas foram de 0W (vazio), 100W, 200W, 300W, 400W, 500W, 600W, 700W e 800W.



Figura 18 - proveta graduada para medir o consumo de gasolina.

3.2.3 Determinação da massa da gasolina

Determinou-se a massa da gasolina para cada mililitro de combustível utilizado no motor, utilizando-se uma balança de precisão com seis casa decimais, calculando-se, posteriormente, a massa específica em gramas por mililitros, pois o consumo específico do motor é dado em g/kWh.

3.2.4 Montagem do injetor de HHO

Para que o gás HHO fosse admitido pelo moto-gerador, foi desenvolvido um injetor em nylon, conforme apresentado nas Figuras 19, 20 e 22.

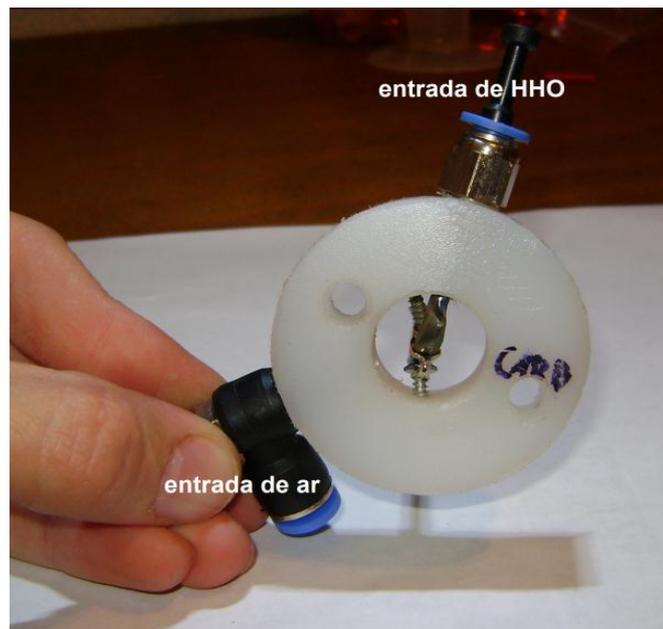


Figura 19 – Protótipo de injetor de gás HHO.

O injetor foi instalado entre a válvula de admissão e o carburador, conforme pode ser observado na Figura 20.

A instalação do injetor foi realizada desta forma para assegurar a admissão do gás HHO e diminuir a passagem de ar pelo carburador, reduzindo desta forma, o arraste e consumo de combustível (gasolina), através da passagem principal do

carburetor. Na Figura 21 pode-se observar o esquema do sistema completo da instalação do injetor de HHO no moto-gerador.

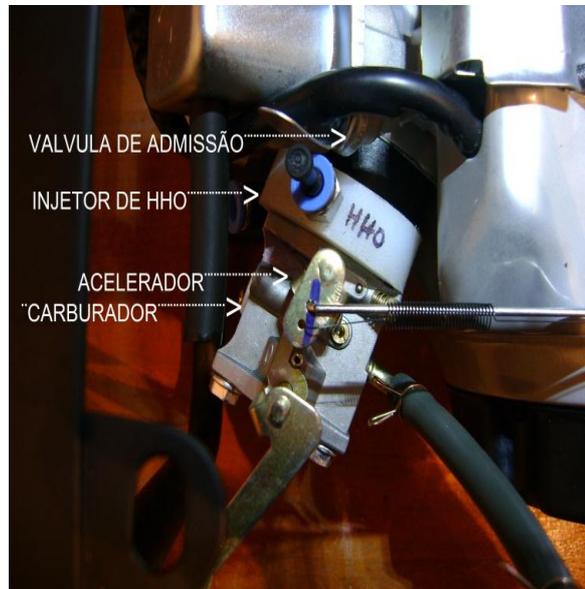


Figura 20 - protótipo do injetor de gás instalado no moto-gerador a gasolina.

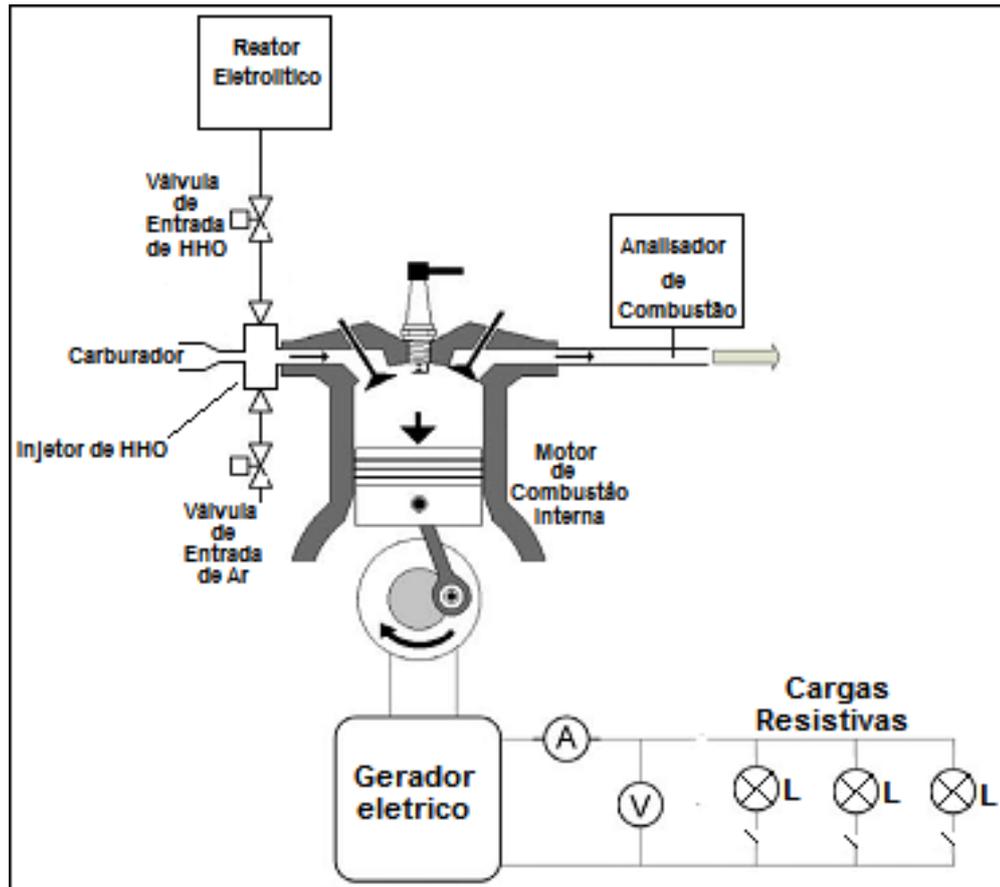


Figura 21 - Sistema completo de Injeção de gás HHO Instalado no moto-gerador a gasolina.



Figura 22 – Design do injetor de HHO.

3.2.5 Carga Resistiva Instalada para Simular a Demanda de Energia Elétrica do Moto-Gerador

Para simular a carga elétrica demandada pelo moto-gerador foram utilizadas 8 lâmpadas incandescentes de 100 W cada, acionadas individualmente por interruptores de acordo com o nível da carga a ser simulada, podendo-se selecionar desde o sistema funcionando no modo vazio (0 W) até a potência de 800W, conforme observado na Figura 23.

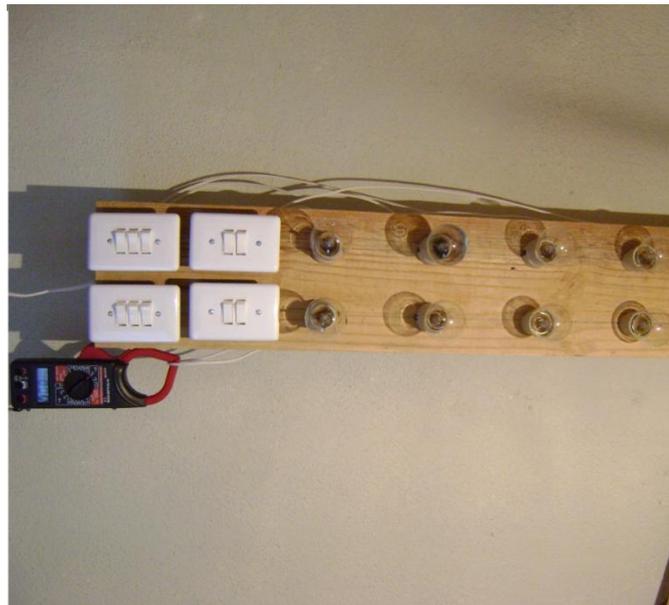


Figura 23 – Carga de 8 lâmpadas de 100 W cada ligada ao gerador.

3.2.6 Determinação do Consumo Específico de Combustível

Para a determinação do consumo específico de combustível no moto-gerador, tanto para a alimentação exclusivamente com gasolina, como com a mistura de gasolina e gás HHO, utilizou-se a proveta graduada de 0 a 100 ml, com a qual quantificou-se o consumo a cada minuto com 10 repetições para cada uma das cargas simuladas.

3.2.7 Medição dos Gases de Exaustão

Para quantificar os gases de exaustão utilizou-se o analisador de combustão e emissões, com a entrada de gás inserida no escapamento do motor, a fim de coletar somente os gases que realmente estavam presentes na reação exotérmica ocorrida na câmara de combustão do motor.

O analisador permaneceu coletando os dados durante todo o experimento, quantificando os valores dos gases a cada carga conectada ao gerador, tanto quando alimentado o motor somente com gasolina, como quando alimentado com a mistura gasolina e gás HHO. Foram determinadas as variações nos gases de exaustão do motor. Mediu-se as variações para os óxidos nitrosos (NO_x), dióxido de carbono (CO₂), excesso de ar (EA) e temperatura dos gases de exaustão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação do Consumo Específico de Combustível

Na Figura 24 observou-se que o consumo específico de combustível, no modo vazio, ou seja, com carga de 0W, foi de 4,8 g/kWh e 4,4 g/kWh para o moto-gerador alimentado, respectivamente, com gasolina e com gasolina e gás HHO. A diferença correspondeu nesta carga a 8,3 % a menos de consumo de combustível para o moto-gerador quando alimentado com a mistura de gasolina e gás HHO.

Observou-se que a diferença entre o consumo de combustível, quando o moto-gerador foi alimentado com gasolina e gás HHO, tornou-se mais significativa quando a carga elétrica simulada foi maior. Para a carga de 800W o consumo específico de combustível apresentou um consumo 16,6 % menor quando alimentado com gasolina e gás HHO, com valores de consumo específico de 8,6 g/kWh e 7,2 g/kWh para o moto-gerador alimentado, respectivamente, com gasolina e com gasolina e gás HHO, conforme pode ser observado na Figura 24.

Musmar e Al-Rousan (2011), em trabalho realizado com o objetivo de avaliar o efeito do gás HHO em motores a gasolina, obtiveram resultados onde o consumo específico de gasolina foi reduzido em 20%, entretanto, os autores tem como enfoque relacionado à rotação do motor.

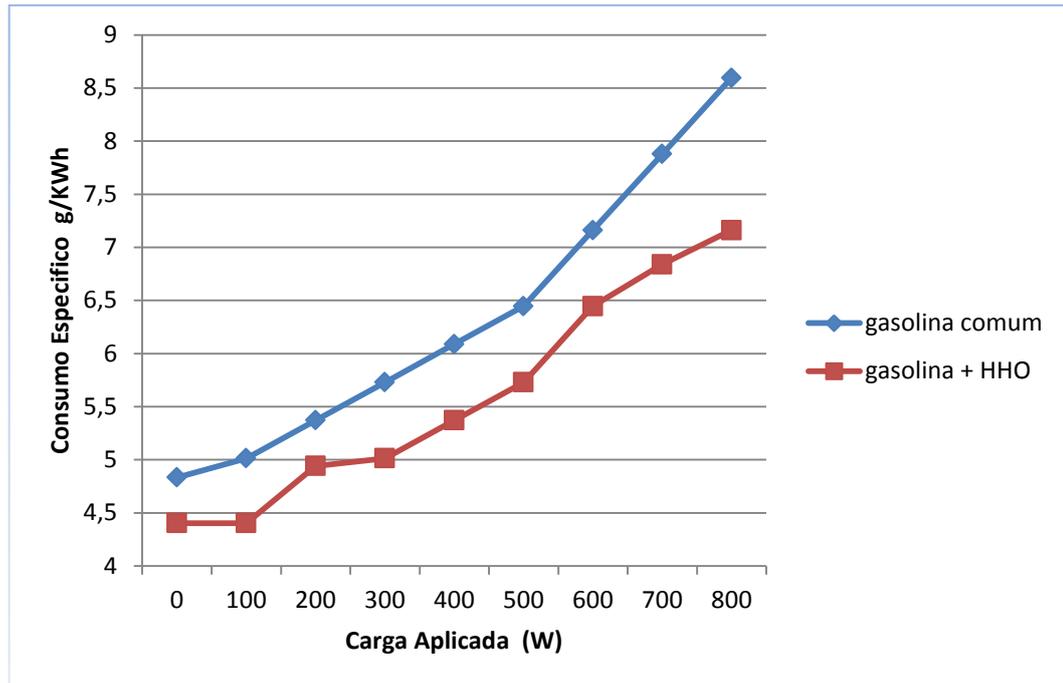


Figura 24 - Consumo específico do moto-gerador em função da carga aplicada.

4.2 Avaliação da temperatura dos gases de exaustão

Conforme observou-se na Figura 25, a temperatura foi menor quando inserido gás HHO, juntamente com a gasolina. Este comportamento pode ser verificado em todo o gráfico, a partir da carga no modo vazio, ou seja, com a carga de 0W, que foi de 113°C e 106°C para o moto-gerador alimentado, respectivamente, com gasolina e gasolina com HHO. A variação correspondeu nesta carga a 6,2% a menos de temperatura para o moto-gerador quando alimentado com a mistura de gasolina e gás HHO.

Observou-se que a diferença entre a temperatura, quando o moto-gerador foi alimentado com gasolina e gás HHO, tornou-se mais significativa quando conectado a cargas de 100 a 800W. Para a carga de 100W a temperatura dos gases de exaustão apresentou valores de 6,6 % menor quando alimentado com gasolina e gás HHO, com valores de temperatura de 136°C e 127°C para o moto-gerador alimentado, respectivamente, com gasolina e com gasolina e gás HHO, onde esta diferença permaneceu praticamente em todo o experimento, conforme pode ser observado na Figura 25.

Musmar e Al-Rousan (2011), em trabalho realizado com o objetivo de avaliar o efeito do gás HHO em motores a gasolina, obtiveram resultados semelhantes às

variações de temperatura dos gases de exaustão encontradas, entretanto com enfoque relacionado à rotação do motor.

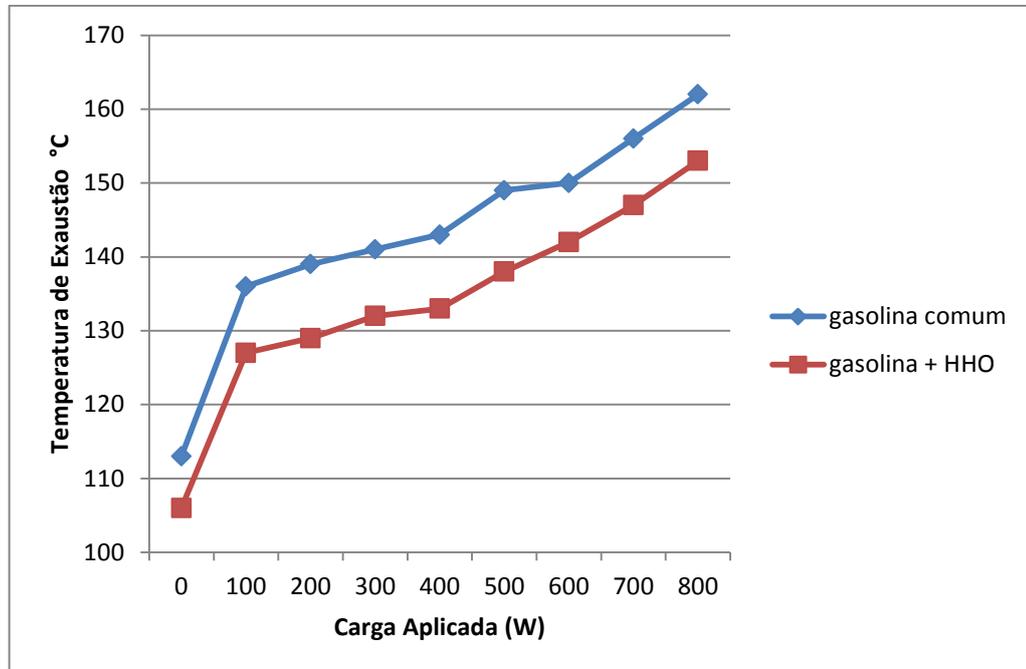


Figura 25 - Variação de temperatura no escape do motor.

4.3 Avaliação dos gases de exaustão

Conforme pode ser visto na Figura 26, onde os gases de exaustão estão evidenciados, a injeção do gás HHO influenciou na quantidade de partes por milhão dos gases exalados, tanto os óxidos nitrosos (NOx), como dióxidos de carbono (CO₂).

Quando o moto-gerador funcionou com gasolina ao modo vazio (0W), a quantidade de NOx era de 34 ppm, e após a inserção de HHO, esta quantidade foi de 20 ppm, apresentando uma redução de 41%. Conforme observado na Figura 26, onde os gases de exaustão estão apresentados, verificou-se que quando inserido gás HHO, juntamente, com a gasolina, este comportamento foi verificado em todo o gráfico a partir da carga ao modo vazio, ou seja, com a carga de 0W, até a carga próxima da nominal do motor (800W).

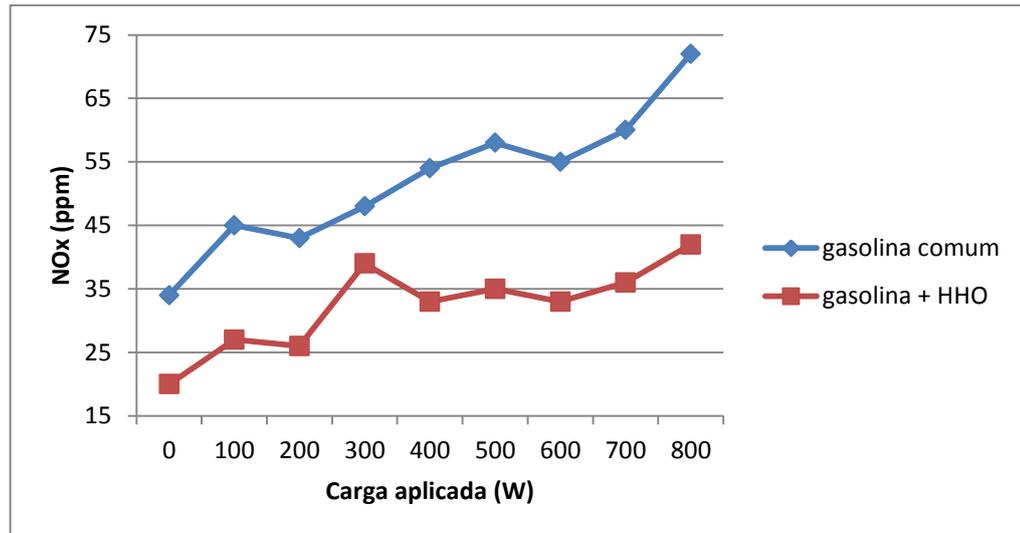


Figura 26 - Dados de exaustão dos óxidos nitrosos.

Quando analisado a emissão de CO₂, mostrado na Figura 27, o comportamento foi semelhante após a inserção do gás HHO, quando o motor gerador funcionou com gasolina ao modo vazio (0W), a quantidade de CO₂ foi de 6,1 ppm, e após a inserção de HHO esta quantidade foi de apenas 4,6 ppm, apresentando uma redução de 24%. Verificou-se que quando inserido gás HHO juntamente com a gasolina, este comportamento pode ser percebido em praticamente todo o gráfico a partir da carga ao modo vazio, ou seja, com a carga de 0W, até a carga próxima da nominal do motor (800W).

Observa-se na figura 27, que o dióxido de carbono apresenta um comportamento mais constante a partir da carga de 400 W enquanto funcionando com gasolina comum apresenta leves variações e permanecendo mais constante a partir da carga de 500W.

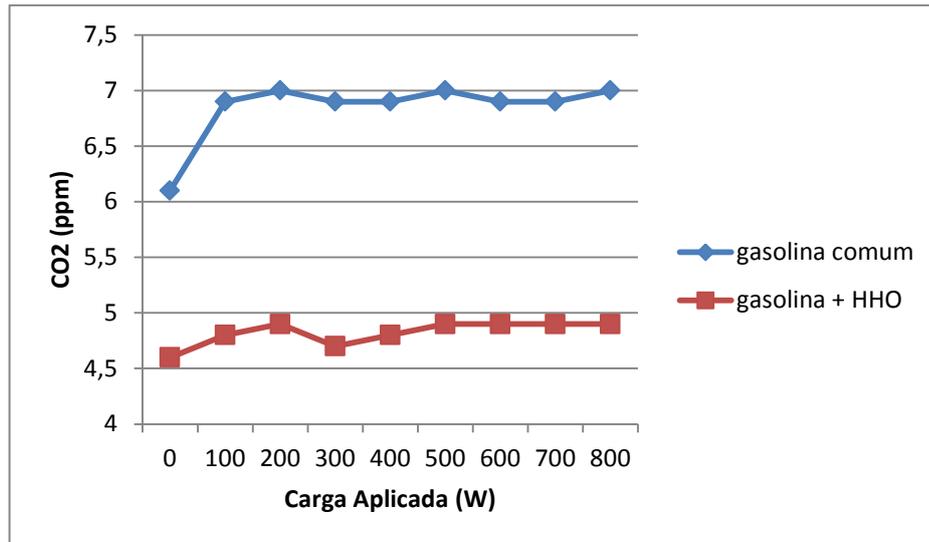


Figura 27 - Dados de exaustão de dióxido de carbono.

Estes resultados foram comparados com Musmar e Al-Rousan (2011), Yilmaz, Uludamar e Aydin (2010), em trabalho realizado com o objetivo de avaliar o efeito do gás HHO em motores à combustão, obtendo resultados semelhantes às variações de óxidos nitrosos e dióxido de carbono exalados durante a combustão, onde segundo estes autores a redução de dióxido de carbono chegou a 40%, entretanto, estes autores tem um enfoque relacionado à rotação dos motores.

4.4 Avaliação do excesso de ar expelido após a combustão

Conforme a leitura dos dados coletados do analisador de combustão, o motor trabalhou com excesso de combustível quando adicionado o gás HHO na câmara de combustão, juntamente com a gasolina, conforme mostra a Figura 27, por se tratar de uma mistura composta por gasolina enriquecida com hidrogênio.

Se há menor liberação de dióxido de carbono, automaticamente haverá uma menor liberação de ar em excesso, pois o excesso de ar engloba os gases que constituem o ar atmosférico como CO₂, O, N.

Como pode ser observado na figura 28 houve uma redução no excesso de ar no motor funcionando com gasolina e gás HHO e compatível, como com a redução de CO₂ apresentada na figura 27.

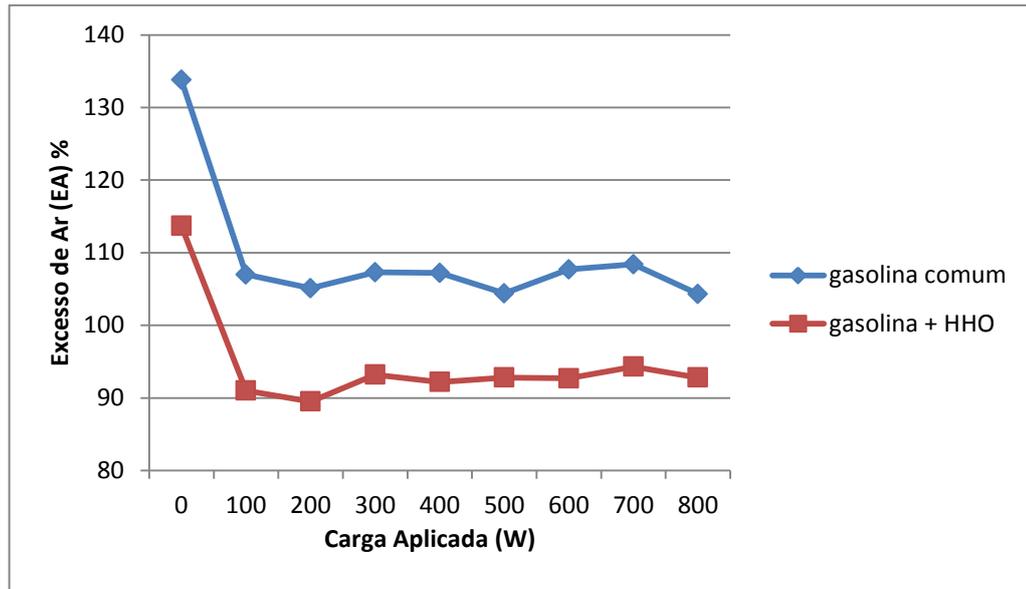


Figura 28 - Variação de excesso de ar.

5. CONCLUSÕES

Verificaram-se neste trabalho os efeitos do gás HHO ao ser injetado em um moto-gerador Toyama, modelo TF1200. O gás foi gerado através de um Eletrolisador e inserido diretamente na válvula de admissão com a ajuda de um injetor de gás. Os gases expelidos pelo motor foram quantificados através do analisador de gás, o que possibilitou chegar as seguintes conclusões:

Ocorreu o aumento da rotação do motor após inserção do gás HHO, devido ao aumento do poder calorífico da mistura gasolina, HHO e ar.

Houve um aumento da eficiência da combustão, sendo que a redução do consumo específico do combustível chegou a 16,6%.

Conclui-se que, houve redução na temperatura dos gases de exaustão.

Após a inserção de HHO houve redução da concentração dos gases de exaustão.

Ao injetar gás HHO o motor permaneceu em regime de trabalho com excesso de combustível ou queima rica.

Sugere-se que em motores com sistema de controle mecânicos seja feito o ajuste no carburador para se atingir à redução do consumo específico.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-ROUSAN, AMMAR A.. **Reduction of fuel consumption in gasoline engines by introducing HHO gas into in take manifold.** International Journal Of Hydrogen Energy, Mutah, p. 12930-12935. 30 ago. 2010. (AL-ROUSAN, 2010).

ANDRADE, Giovanni Souza de. **Avaliação experimental da duração do combustão para diferentes combustíveis, em um motor padrão ciclo Otto ASTM-CFR.** 2007. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Mecânica, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

BORETTI A. **Comparison of fuel economies of high efficiency diesel and hydrogen Engines powering a compact ear with a fly whe el based kinetic energy recovery Systems.** Int J Hydrogen Energy, Australia, p. 8417-8424, 7 Maio de 2010.

MUSMAR, Sa'ed A.; AL-ROUSAN, Ammar A..**Effect of HHO gas on combustion emissions in gas oline engines.** Fuel: elsevier, Mutah, p. 10016-10021. 01 jun. 2011.

SIERENS R, ROSSEEL E. **Sequential injection of gas e ous fuels. In: proceedings of the 5th internation al congress: the European automotive industry meets the challenge soft he year 2000;** 1995 June 21 e 23. Strasbourg: EAEC Congress; 1995. p. SAI 9506A03.

SOUZA, RODRIGO G.; SILVA, FABIO M.; BASTOS, ADRIANO C.. SOUZA, R. G. et al. **90 desempenho de um conjunto moto gerador adaptado a biogás. Ciências Agro técnicas,** Lavras/MG, p. 190-195. 2010.

TOYAMA (Pr - Brasil). **Moto-gerador:** manual do produto. Disponível em: <http://www.toyama.com.br/produtos_det.asp?cod_categoria=2&cod_linha=8&cod_sublinha=7&cod_produto=83>. Acesso em: 15 dez. 2011.

VALENTE, OSMANO Souza. **Desempenho e emissões de um motor- gerador de energia elétrica operando com biodiesel.** 2007. 161 f. Dissertação (Mestrado) -

Departamento de Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica, Belo Horizonte, 2007.

WALTER, ARNALDO. **Fomento a geração elétrica com fontes renováveis de energia no meio rural brasileiro: barreiras, ações e perspectivas.** Encontro de energia no meio rural (AGRENER) 2000. Disponível em: www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000002200000100028&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt Acesso em: 10/11/2011

YILMAZ, ALI CAN; ULUDAMAR, ERINC₃; AYDIN, KADIR. **Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines.** International Journal Of Hydrogen Energy: elsevier, Adana, p. 11366-11372. 11 ago. 2010. (YILMAZ; ULUDAMAR; AYDIN, 2010).

CONCLUSÕES GERAIS

Após construção do reator eletrolítico em uma caixa de acrílico para a produção de gás HHO e inserido na câmara de combustão do motor-gerador, conclui-se que:

O reator eletrolítico construído foi adequado ao experimento produzindo o gás HHO ou gás de Brown suficiente, com o eletrólito de hidróxido de sódio (NaOH) dissolvido em água destilada.

Ao injetar gás HHO o motor de combustão interna altera sua rotação devido ao aumento do poder calorífico da mistura de gasolina, gás e oxigênio.

O motor reduziu o consumo específico quando introduzido, através do injetor de gás, conseqüentemente, melhorando a eficiência da combustão em 16,6%.

A concentração de gases expelidos pela válvula de escape foi reduzida com a injeção de gás HHO.

Além de reduzir o consumo de combustível, a inserção de gás HHO diminui as emissões dos gases nocivos ao meio ambiente como CO₂ e NO_x.
