

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

METODOLOGIA PARA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ÓLEO DIESEL EM SISTEMAS DE
GERAÇÃO TERMOELÉTRICA USANDO MISTURAS DE ÓLEO VEGETAL COM
ADIÇÃO DE GÁS HIDROGÊNIO

RICARDO DA SILVA PEREIRA

TD 02/2017

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RICARDO DA SILVA PEREIRA

METODOLOGIA PARA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ÓLEO DIESEL EM SISTEMAS DE
GERAÇÃO TERMOELÉTRICA USANDO MISTURAS DE ÓLEO VEGETAL COM
ADIÇÃO DE GÁS HIDROGÊNIO

TD 02/2017

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RICARDO DA SILVA PEREIRA

METODOLOGIA PARA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ÓLEO DIESEL EM SISTEMAS DE
GERAÇÃO TERMOELÉTRICA USANDO MISTURAS DE ÓLEO VEGETAL COM
ADIÇÃO DE GÁS HIDROGÊNIO

Tese submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica na área de sistemas de Energia Elétrica.

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2017

Pereira, Ricardo da Silva, 1981-

Metodologia para redução de consumo de óleo diesel em sistemas de geração termoelétrica usando misturas de óleo vegetal com adição de gás hidrogênio / Ricardo da Silva Pereira.-2017.

Orientadora: Maria Emília de Lima Tostes

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2017.

1. Sistemas de energia elétrica – fontes alternativas. 2. Biocombustíveis. 3. Consumo específico. 4. Geração termoelétrica. I. Título.

CDD 23. ed. 333.79

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“METODOLOGIA PARA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ÓLEO DIESEL EM
SISTEMAS DE GERAÇÃO TERMOELÉTRICA USANDO MISTURAS DE ÓLEO
VEGETAL COM ADMISSÃO DE GÁS HIDROGÊNIO”**

AUTOR: RICARDO DA SILVA PEREIRA

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO
JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA
ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA.

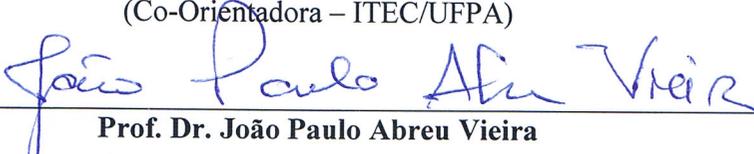
APROVADA EM: 30/03/2017

BANCA EXAMINADORA:

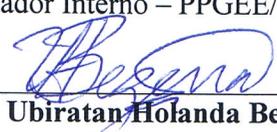


Prof.ª Dr.ª Maria Emília de Lima Tostes
(Orientadora – PPGEE/UFPA)

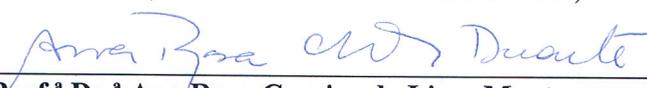
Prof.ª Dr.ª Danielle Regina da Silva Guerra
(Co-Orientadora – ITEC/UFPA)



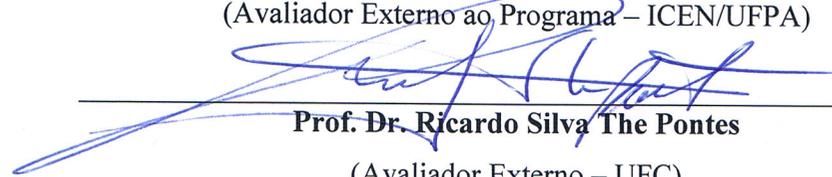
Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)



Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)



Prof.ª Dr.ª Ana Rosa Carriço de Lima Montenegro Duarte
(Avaliador Externo ao Programa – ICEN/UFPA)



Prof. Dr. Ricardo Silva The Pontes
(Avaliador Externo – UFC)

VISTO:

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ser a força, a motivação e a inspiração em minha vida durante todas as lutas diárias.

Ao meu pai, Francisco Pereira (*in memoriam*).

Em honra a minha mãe Talita Santos da Silva. Ela que com sua simplicidade e determinação soube dar a mim e a meus irmãos o essencial para nos tornarmos pessoas de bem. Todas as conquistas alcançadas até hoje foram por ela e para ela.

A minha esposa Claudia Barbosa Pereira, que tem sido o alento de todos os dias. Ela que com sua simplicidade e amor tornam os meus dias mais felizes.

Agradecimento especial a minha orientadora Maria Emília de Lima Tostes. Não há palavras para descrever o sentimento de gratidão que tenho. Obrigado pela confiança depositada e oportunidade oferecida ao longo de toda a minha vida.

A minha coorientadora Daniele Regina da Silva Guerra, pelos ensinamentos e conhecimentos partilhados desde o meu ingresso no programa de pós-graduação em 2009. Só tenho a agradecer por tudo.

Ao amigo e professor Manoel Nogueira, que desde 2009 tem possibilitado o desenvolvimento de inúmeros trabalhos e que foi um dos grandes responsáveis pela minha mudança profissional. Obrigado também pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao amigo, professor Hendrick Zarate, que tem sido ao longo desses anos uma verdadeira fonte de conhecimento, partilha e inspiração. Sem ele este trabalho não seria possível. Agradeço pela amizade diária.

Aos Amigos e colegas do Labmotor, pela convivência diária e partilha de conhecimento ao longo desses anos.

Aos meus irmãos e familiares, pois família é a base de tudo!

Agradeço a todos aqueles que acreditaram e incentivaram a realização deste trabalho, apesar de todas as dificuldades.

E por fim a todos os meus amigos que constitui ao longo de toda a vida, em especial, aqueles em que eu tenho o prazer de desfrutar da convivência diária. Vocês são a melhor parte de minha vida.

A empresa Rede Celpa de Energia pelo apoio financeiro.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis. ”

José de Alencar

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.2 OBJETIVO DA TESE	6
1.3 CONTRIBUIÇÃO DA TESE	7
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	7
2. GERAÇÃO TERMOELÉTRICA	9
2.1 USINAS TERMOÉLETRICAS A DIESEL - SISTEMA ISOLADO	9
2.2 O SISTEMA ISOLADO NO ESTADO DO PARÁ	12
2.3 USINA TERMOELÉTRICA COM MOTOR DIESEL	15
2.3.1 Classificação das usinas a diesel em função da potência	16
2.3.2 Potência das Unidades Geradoras a diesel	17
2.3.3 Desempenho e Rendimento	19
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
3.1 COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS PARA A REDUÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL FÓSSIL	20
3.1.1 Uso do biodiesel	20
3.1.2 Processo de Produção do Biodiesel	21
3.1.3 Óleo vegetal	22
3.1.4 Características físico-químicas dos óleos vegetais	23
3.1.5 Propriedades dos óleos vegetais	25
3.1.6 Norma DIN 51605:2010 para o uso de óleo vegetal como combustível	27
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
4.1 UTILIZAÇÃO DE ÓLEO VEGETAL IN NATURA EM MOTORES DIESEL	29
4.2 UTILIZAÇÃO DE MISTURAS DE ÓLEO VEGETAL COM DIESEL	30
4.3 MISTURAS DIESEL/OLEO VEGETAL COM ADIÇÃO DE HIDROGÊNIO	32
4.4 USO DE HIDROGÊNIO PARA A REDUÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVEL – UTILIZAÇÃO DE GÁS HHO	33
4.4.1 Hidrogênio	33

4.4.2 Aplicações para o Hidrogênio	35
4.4.3 Métodos de produção de hidrogênio	36
4.4.4 Eletrólise da água	39
4.5 USO DE HIDROGÊNIO EM MOTORES CONSUMINDO ÓLEO DIESEL.....	43
4.5.1 Experiências realizadas utilizando gás HHO em motores de Combustão Interna.	45
5. METODOLOGIA	48
5.1 CONSTRUÇÃO DA CÉLULA.	48
5.2 MONTAGEM DA CÉLULA.....	50
5.3 IDENTIFICAÇÃO DO ÓLEO VEGETAL UTILIZADO NAS MISTURAS V20	52
5.4 APARATO EXPERIMENTAL	53
5.5 METODOLOGIA DOS TESTES	59
5.6 DETERMINAÇÃO DA DURAÇÃO DE CADA ENSAIO.....	62
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
7. CONCLUSÕES	74
7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
9. ANEXOS	84

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1: Oferta interna de energia.	1
Figura 1.2: Matriz elétrica brasileira.....	2
Figura 2.1: Distribuição das usinas termoeletricas com motor diesel no Pará.....	13
Figura 2.2: Grupo gerador com motor diesel – Soure/PA	16
Figura 3.1: Estruturas moleculares típicas do óleo vegetal, biodiesel e diesel	24
Figura 4.1: Energia por unidade de massa de diversos combustíveis.	34
Figura 4.2: Energia por unidade de volume de diversos combustíveis.....	35
Figura 4.3: Esquema de produção de energia por diferentes formas	37
Figura 4.4: Eletrólise da água	39
Figura 4.5: Sistema de uma célula eletrolítica básica	40
Figura 4.6: Célula geradora seca.....	41
Figura 4.7: Célula geradora úmida	42
Figura 5.1: Projeto da célula eletrolítica	48
Figura 5.2: Lâminas de aço inoxidável	49
Figura 5.3: Laminas de acrílico.....	49
Figura 5.4: Forma construtiva da célula eletrólítica.....	50
Figura 5.5: Célula eletrolítica para a produção de gás HHO	51
Figura 5.6: Kit da célula de gás HHO	51
Figura 5.7: Estabilidade das diferentes misturas diesel e óleo vegetal.	52
Figura 5.8: Analisador Saga 4500.....	54
Figura 5.9: Aquisitor de dados.	57
Figura 5.10: Visão geral do sistema de monitoramento.....	58
Figura 5.11: Bancada experimental.....	59
Figura 5.12: Produção de gás HHO.	61
Figura 5.13: Injeção de gás HHO no motor.	61
Figura 5.14: Parâmetros avaliados para duração dos ensaios.	62
Figura 6.1: Consumo específico de combustível para B7 e V20 em função da adição de gás HHO.....	65
Figura 6.2: Temperatura dos gases de escape para B7 e V20.....	66
Figura 6.3: Emissões de NOx para B7 e V20	67
Figura 6.4: Emissões de CO para B7 e V20 com o aumento da injeção de gás HHO.....	68
Figura 6.5: Emissões de CO ₂ para B7 e V20 com o aumento da injeção de gás HHO	69
Figura 6.6: Emissões de Hidrocarbonetos não queimados para B7 e V20.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Consumo final de energia no Brasil das principais fontes	3
Tabela 1.2: Limite de consumo específico de óleo diesel por faixa de potência	5
Tabela 2.1: Consumo total em 2015 por tipo de combustível.....	11
Tabela 2.2: Geração térmica e consumo de combustível para 2015	12
Tabela 2.3: Usinas, Geração e demanda – Guascor	14
Tabela 2.4: Usinas, geração e demanda da empresa Soenergy	14
Tabela 2.5: Usinas a diesel do sistema isolado no Pará	15
Tabela 2.6: Classificação das unidades geradoras em função da potência	16
Tabela 3.1: Principais propriedades de diferentes óleos vegetais comparadas com as do óleo diesel	25
Tabela 3.2: Propriedades dos óleos vegetais - Norma DIN 51605:2010	28
Tabela 4.1: Principais propriedades físicas do hidrogênio nas CNTP	34
Tabela 5.1: Parâmetros do grupo gerador	53
Tabela 5.2: Características da balança digital de precisão.....	55
Tabela 5.3: Características dos termopares	55
Tabela 5.4: Características do analisador de gases	56
Tabela 5.5: Características do rotâmetro.....	56
Tabela 5.6: Características do anemômetro	57
Tabela 5.7: Características do aquisitor de dados	58
Tabela 5.8: Incertezas médias dos parâmetros medidos e calculados.....	63
Tabela 6.1: Propriedades físicas e químicas dos combustíveis utilizados	64
Tabela 6.2: Resumo dos resultados encontrados para o B7 + HHO	70
Tabela 6.3: Resumo dos dados encontrados para V20 + HHO.....	71
Tabela 6.4: Consumo de combustível da usina de Cotijuba - Pará.....	71
Tabela 6.5: Dados de emissões coletados em campo na usina de Cotijuba	72
Tabela 6.6: Dados de emissões coletados em campo na usina de Cotijuba.....	73

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>D</i>	Diâmetro do cilindro
\dot{m}_{ar}	Vazão mássica do ar
\dot{m}_{comb}	Vazão mássica de combustível
<i>MCI</i>	Motores de Combustão Interna
<i>N</i>	Rotação do motor
η_V	Eficiência global
<i>PCI</i>	Poder calorífico inferior
<i>PCS</i>	Poder calorífico superior
T_{gas}	Temperatura dos gases de escape
P_i	Potência indicada
ρ_{ar}	Massa específica do ar
<i>C_{sc}</i>	Consumo específico de combustível
<i>RPM</i>	Rotação por minuto
<i>V</i>	Volume do cilindro
V_d	Cilindrada do motor
<i>PMS</i>	Ponto morto superior
<i>PMI</i>	Ponto morto inferior
<i>HC</i>	Hidrocarbonetos
<i>B7</i>	Combustível com 7% de biodiesel e 93% de diesel convencional
<i>V20</i>	Mistura 20% óleo de palma e 80% óleo diesel

RESUMO

Este trabalho analisa de forma experimental a utilização de fontes alternativas de energia para redução do consumo de óleo diesel em usinas termoelétricas do sistema isolado. Foram utilizadas misturas de óleo vegetal de palma com diesel e gás hidrogênio produzido via eletrolise da água. As misturas utilizadas como combustível foram formadas de 20% óleo de palma e 80% óleo diesel. Foi injetado no ar de admissão do motor o gás HHO produzido por uma célula eletrolítica. Os resultados experimentais mostram que a corrente elétrica influencia diretamente a produção de gás HHO, permitindo que o controle da quantidade de gás seja feito pelo ajuste da corrente elétrica. Utilizando a mistura diesel/óleo vegetal com a injeção de gás HHO no ar de admissão, identificaram-se redução no consumo específico de combustível, reduções nas emissões de CO, HC e CO₂, conforme aumento da quantidade de gás HHO injetado. Esses resultados alcançados irão promover reduções significativas no consumo de óleo diesel e nas emissões dos gases de exaustão dos grupos geradores de usinas termoelétricas do sistema isolado.

Palavras Chave: Consumo específico, geração termoelétrica, grupo gerador, gás HHO, óleo vegetal e emissões.

ABSTRACT

This work analyzes the use of alternative sources of energy to reduce the consumption of diesel oil in the diesel power plants of the isolated system. Blends of palm oil with diesel and hydrogen gas produced by electrolysis of water were used. The blends used as fuel were composed of 20% palm oil and 80% diesel oil. The HHO gas produced by an electrolytic cell was injected into the engine intake air. The experimental results show that the electric current directly influences the production of HHO gas, allowing the control of the amount of gas to be made by the adjustment of the electric current. Using the diesel / vegetable oil mixture with the HHO gas injection in the intake air, we identified reduction in specific fuel consumption, reductions in CO, HC and CO₂ emissions as the amount of HHO gas injected increased. These results will lead to significant reductions in diesel oil consumption and exhaust gas emissions from the generator sets of thermoelectric power plants in the isolated system.

Key words: Specific fuel consumption, thermoelectric generation, generator set, HHO gas, vegetable oil and emissions.

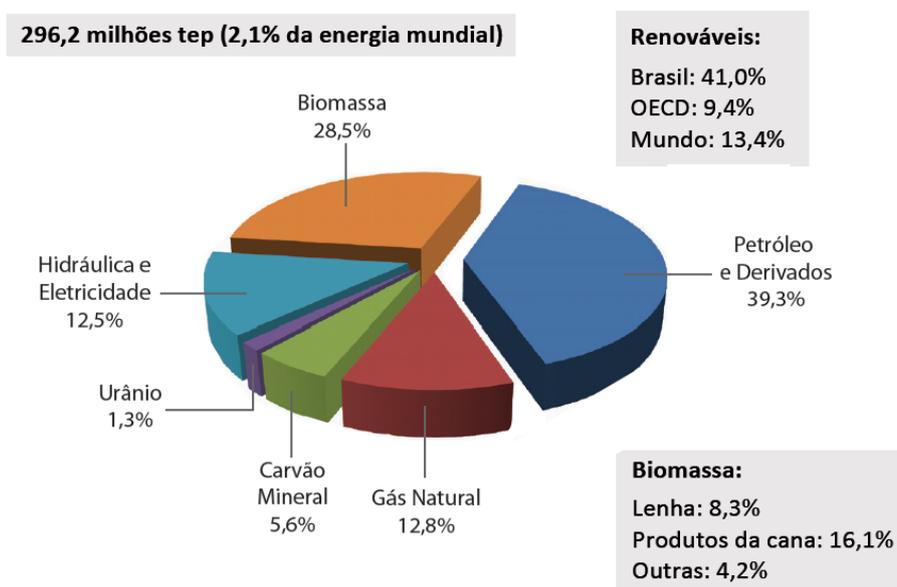
1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade de energia elétrica representa um aumento na qualidade de vida das pessoas. No momento em que a eletricidade passa a ser disponibilizada em uma localidade, a população passa a contar com todos os benefícios que ela pode trazer, desde sua utilização em equipamentos de uso doméstico, até em maquinários de produção, aumentando assim as possibilidades de geração de renda e, conseqüentemente, movimentação econômica.

Atualmente, grande parte das fontes primárias de energia podem ser convertidas em energia elétrica. E essas formas de energia podem ser classificadas como de origem renovável e não-renovável. Os produtos intitulados como *renovável* são representados pela energia oriunda da biomassa, fonte hidráulica, eólica e solar, e os de caráter *não-renovável* são representados pelos produtos de tratamento do petróleo, gás natural, carvão mineral e energia nuclear.

Em 2016, a participação de energias renováveis na Matriz Energética Brasileira manteve-se entre as mais elevadas do mundo, como mostram dados do balanço energético Nacional de 2016, com informações referentes ao ano de 2015 (BEN, 2016), o que se observa na Figura 1.1 em relação a oferta interna de energia no Brasil ao longo do ano de 2015, comprovando uma pequena redução na geração hidráulica em relação ao ano anterior devido à escassez de chuvas no período.

Figura 1.1 - Oferta interna de energia no Brasil

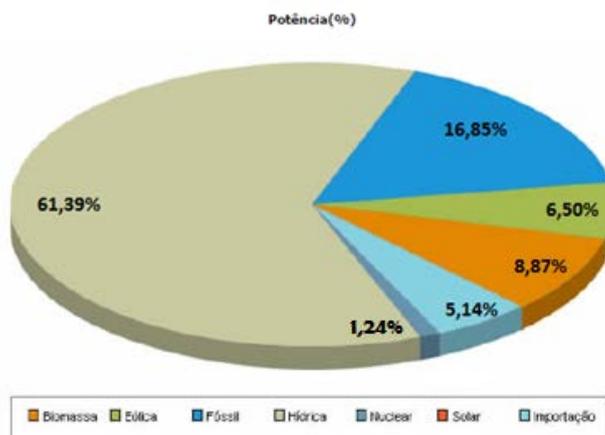


Fonte: (BEN, 2016)

No cenário da geração de energia elétrica no Brasil, a Figura 1.2 apresenta a participação da oferta de eletricidade por diferentes fontes de energia, (BEN, 2016). Observa-se que a geração

hidráulica aparece com maior participação (61,39%). Já para a geração utilizando fontes fósseis, esse valor chegou a 16,85% do total da matriz elétrica brasileira. Uma parte desse valor das fontes fósseis é representado pelo óleo diesel que é utilizado principalmente como matéria prima na geração termoelétrica do sistema isolado do país.

Figura 1.2 - Matriz elétrica brasileira



Fonte: BIG, 2017

De acordo com informações de anos anteriores do balanço energético nacional, houve redução da geração de eletricidade via fonte hidráulica em virtude das estiagens ocorridas no Brasil ao longo dos anos 2015 e 2016.

Na Figura 1.1 observa-se o petróleo e seus derivados como a maior oferta de energia interna do Brasil para o ano de 2015, e isso é um indicativo de que o consumo desses combustíveis ainda é elevado em comparação a outras fontes de energia, conforme apresentado na Tabela 1.1, e o óleo diesel apresentou maior consumo em relação às outras fontes de energia, apesar da redução de 3,8% comparado ao ano anterior.

Tabela 1.1 - Consumo final de energia no Brasil das principais fontes

Fonte	2015 (mil tep)	2014 (mil tep)	15/14 %
Óleo diesel	48.033	49.935	-3,8
Gás Natural	18.080	18.138	-0,3
Carvão Mineral	13.234	13.034	-1,5
Eletricidade	44.946	45.782	-1,8
Bagaço de cana	28.667	28.612	0,2
Etanol	15.437	13.019	18,6
Total	253.037	260.249	2,9

Fonte: BEN, 2016.

Essa grande dependência em relação aos combustíveis fósseis tem trazido nos anos recentes, em todo o mundo, grandes preocupações com questões econômicas, estratégicas e ambientais associadas a seu uso. Como consequência, existe atualmente uma intensa busca por fontes alternativas de energia que permitam realizar a transição do uso de combustíveis fósseis para outros mais limpos, seguros e renováveis (Pottmaier *et al*, 2012). Ou ainda, realizar estudos que tornem a tecnologia das máquinas que fazem uso desses combustíveis mais eficientes, tornando possível a utilização de combustíveis alternativos.

Analisando o cenário de geração de energia elétrica através de fontes térmicas que utilizam combustíveis não-renováveis, observa-se que o Brasil recebeu um grande impulso no uso de motores de combustão interna em decorrência do apagão de 2001, quando grandes consumidores viram a necessidade de recorrer a fontes alternativas para suprir sua demanda energética. Entretanto, após a superação da crise, muitos dos grandes consumidores de energia elétrica, como indústrias, comércios, redes hoteleiras, hospitais, shoppings centers, hipermercados e condomínios, recorreram aos grupos geradores como forma de reduzir a conta de energia elétrica, sem ter que diminuir o consumo e, assim, dispondo de maior segurança na alimentação das cargas essenciais. Outro fator que incentiva a utilização de grupos geradores é a tarifação da energia elétrica, que no horário de ponta pode chegar a 4,5 vezes a tarifação do horário fora de ponta. Dessa maneira, nos horários e nas épocas do ano em que a energia fornecida pelas concessionárias é substancialmente mais cara, opta-se pelo uso dos geradores a diesel.

Outros locais em que os grupos geradores a diesel são utilizados com maior frequência e em grandes quantidades são em usinas termelétricas (UTE's). Segundo a ANEEL (2016), em todas as regiões do Brasil existem UTE's com motores diesel de pequeno, de médio e de grande

porte. Estas usinas fornecem energia elétrica para vários municípios, em serviço público. Muitas delas operam continuamente, em sistemas isolados de geração de energia, com maior concentração nos estados das regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste.

Em algumas regiões, como no Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste existem usinas com motores diesel, de médio e grande porte, que operam em regime de complementação de carga, sendo que estas UTE's estão interligadas ao Sistema Elétrico Nacional e operam segundo as normas e gerência do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS.

As UTE's, tanto em sistemas isolados quanto no sistema interligado, são gerenciadas pelas concessionárias dos seus respectivos Estados. Existem ainda algumas empresas que operam como PIE (produtor independente de energia). Essas empresas recebem subsídios governamentais para a compra do óleo combustível utilizado para a geração de energia elétrica através do Fundo Setorial da CCC (Conta de Consumo de Combustível) de acordo com o custo total da geração (CTG) do ano anterior, controlados pela Eletrobrás (Eletrobrás, 2016).

Para que a concessionária de energia consiga receber subsídios do fundo da CCC, ela deve garantir que seus motores operem sob determinado valor de consumo específico de combustível estipulado pela resolução 427/2011 da ANEEL (ver Tabela 1.2). Caso contrário, o excedente identificado durante a geração será de responsabilidade financeira da própria concessionária de energia. Pela resolução, os limites máximos para a subvenção irão ser reduzidos anualmente e irão variar de acordo com a tecnologia de geração e a capacidade do empreendimento. Todos esses valores de limites de consumo específico para motores começaram a vigorar a partir de janeiro de 2014, conforme publicado no Anexo III da Resolução ANEEL 427/2011.

Outro dado importante é que o Brasil vem adotando a adição de biodiesel ao diesel convencional, o que caracteriza o combustível utilizado atualmente como B7 (7% de biodiesel e 93% diesel convencional). Com isso, esse percentual deve aumentar para valores de até 10% em meados de 2019. Entretanto, a adição de biodiesel reduz o poder calorífico do combustível, o que influencia no aumento do consumo específico de combustível dos motores, aumentando o custo da geração e dificultando o enquadramento à resolução.

Tabela 1.2 - Limite de consumo específico de óleo diesel por faixa de potência

Faixa de Potência (kW)		Consumo específico de óleo diesel	
De	a	L/kWh	Kg/kWh
1	100	0,404	0,343
101	250	0,349	0,297
251	500	0,329	0,280
501	750	0,296	0,252
751	1.000	0,289	0,246
1.001	2.500	0,289	0,246
2.501	5.000	0,283	0,241
5.001	7.500	0,283	0,241
7.501	10.000	0,283	0,241
10.001	12.500	0,253	0,215
12.501	15.000	0,253	0,215
15.001	20.000	0,253	0,215
20.001	Acima	0,210	0,179

Fonte: Resolução ANEEL 427/2011

Quando se restringe à análise na utilização de derivados do petróleo, seja para a geração de eletricidade através do uso em motores diesel ou para o uso no setor de transportes, evidencia-se sempre um aumento no seu consumo. Esse aumento, com destaque para o óleo diesel, mobiliza pesquisadores a estudar alternativas eficientes e de fontes renováveis, para a substituição parcial ou total desses combustíveis.

A ideia principal gira em torno de tentar substituir o óleo diesel por combustíveis que sejam biodegradáveis, não tóxicos, de fácil produção e renováveis na natureza (Pereira, 2011). Outro ponto importante é realizar estudos que possam melhorar a eficiência dos processos de combustão nesses motores diesel, reduzindo emissões e consumo de combustível.

É importante destacar que o Brasil passou a utilizar combustíveis diferentes daqueles em que os motores projetados/comercializados deveriam usar (100% derivado de petróleo). Atualmente o combustível comercializado é o B7 fruto do Plano Nacional de Produção de Biodiesel (PNPB) instituído pela lei 11.097 de 13 de janeiro de 2005. Entretanto, com as mudanças nas características do combustível causadas pelas misturas com biodiesel tem-se observado queda de rendimento no funcionamento dos motores de combustão interna.

Uma proposta para a redução do consumo de diesel que está sendo estudada é a utilização de óleos vegetais *in natura* adicionados em mistura com o óleo diesel. Estudos realizados por Rakopoulos *et al.*, 2006; Altun *et al.*, 2008; Misra e Murthy, 2011 e Sharon, 2013 mostraram a viabilidade de sua utilização em motores diesel sem nenhuma modificação. Outro ponto importante é que o uso de misturas com óleo vegetal *in natura* é mais simples de se obter em relação as misturas estipuladas pela ANP com o uso do biodiesel, pois produzir biodiesel

requer elevado custo, mão de obra qualificada e logística de transporte até os centros de comercialização.

Outro ponto que deve ser objeto de pesquisa é a utilização de metodologias que aumentem o desempenho dos motores através da melhora do processo de combustão. E, diante desse cenário, pesquisas realizadas em que se utiliza o gás hidrogênio ou o seu derivado (gás HHO) como aditivo no ar de admissão dos motores, Al-Rousan (2010); Sa'ed (2011); Le Anh *et al.* (2013); Rajaram *et al.* (2014) e Sur *et al.* (2014), mostraram-se como alternativas para melhorar o processo de combustão e, conseqüentemente, aumentar a eficiência térmica dos motores, refletindo ainda no consumo específico de combustível e nas emissões.

1.2 OBJETIVO DA TESE

O objetivo geral da tese é propor o desenvolvimento de metodologias a serem aplicadas em motores de combustão interna, utilizados em usinas termoelétricas do sistema isolado, que possibilitem a redução do consumo específico de combustível e a dependência do óleo diesel, sem diminuir a eficiência do processo e da máquina, introduzindo ainda uma fonte de energia renovável. Para isso, utiliza-se o uso de duas metodologias identificadas pelo estado da arte nos ensaios de longa duração em condições laboratoriais em um grupo gerador a diesel. Para este projeto tem-se o projeto e construção da célula eletrolítica; identificação do óleo vegetal a ser usado nas misturas de 20% óleo vegetal e 80% óleo B7 (que chamaremos de V20); instrumentação da bancada experimental para realização dos ensaios e aquisição dos dados de funcionamento do grupo gerador; testes operando com B7 e misturas V20 utilizando o gás HHO gerado pela célula e a avaliação dos resultados com perspectiva de aplicação em uma usina térmica do sistema isolado do Estado do Pará.

Os objetivos específicos são:

Projetar e construir uma célula eletrolítica para produzir, via eletrólise da água, o gás HHO e utilizá-lo como mecanismo de melhoria do processo de combustão em um grupo gerador diesel.

Verificar o impacto da adição desse gás na redução do consumo específico de combustível, nas concentrações dos gases poluidores e na eficiência da máquina e do processo.

Utilizar misturas (80% B7 + 20% óleo vegetal de palma *in natura*) como mecanismo de redução do consumo de óleo diesel em grupos geradores. Analisar a eficiência dos grupos geradores ao operar com misturas, através do consumo específico de combustível e emissões dos gases de exaustão.

Realizar ensaios utilizando a mistura diesel com óleo vegetal no grupo gerador com pequenas injeções de gás HHO no ar de admissão do motor, como metodologias alternativas para reduzir o uso de diesel e melhorar o processo de combustão.

E, como parte final do trabalho, comparar os resultados obtidos nos testes laboratoriais com os dados reais de consumo, emissões e geração da usina termoelétrica de Cotijuba, pertencente ao sistema isolado do Estado do Pará.

1.3 CONTRIBUIÇÃO DA TESE

O desenvolvimento deste trabalho inovou na metodologia para a inserção e uso de fontes renováveis de energia (gás hidrogênio e óleo vegetal) como mecanismo mitigatório para redução no consumo de óleo diesel. A construção da célula eletrolítica permitiu produzir o gás HHO (o qual é combustível) e utilizá-lo, injetando-o no ar de admissão de um grupo gerador diesel, que utilizou como combustível misturas diesel B7 com 20% de óleo vegetal de palma in natura (V20). A principal contribuição dessa tese foi o uso conjunto do gás HHO e da mistura V20 no grupo gerador, o qual refletiu na redução do consumo específico do grupo gerador, do consumo de óleo diesel e redução nas emissões dos gases de exaustão. A portabilidade adquirida com a construção da célula é outro ponto importante, o que permite seu uso em testes de campo.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O **capítulo 2** apresenta um breve levantamento bibliográfico sobre os sistemas termoelétricos, como distribuem-se e como está organizado no território brasileiro, com destaque especial para a geração térmica a diesel do sistema isolado paraense.

O **capítulo 3** apresenta a fundamentação teórica sobre combustíveis e as alternativas apresentadas pelo estado da arte para substituição parcial ou total do uso de óleo diesel mineral, com destaque para o uso de óleos vegetais e gás hidrogênio como combustível auxiliar.

O **capítulo 4** retrata sobre pesquisas realizadas em que se utilizou óleos vegetais em motores diesel em sua forma in natura ou em misturas e o uso de hidrogênio em motores como mecanismo de melhora do processo de combustão.

O **capítulo 5** trata da metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho e o uso das tecnologias propostas e a forma como foram realizados os ensaios no grupo gerador diesel.

O **capítulo 6** apresenta os resultados encontrados com o uso conjunto de mistura diesel/óleo vegetal e a adição de gás HHO em um grupo gerador diesel.

O **capítulo 7** apresenta as conclusões do trabalho desenvolvido e as propostas para trabalhos futuros.

2. GERAÇÃO TERMOELÉTRICA

2.1 USINAS TERMOELÉTRICAS A DIESEL - SISTEMA ISOLADO

A participação da termoeletricidade no Brasil concentra-se em unidades importantes, localizadas nas extremidades das redes de distribuição, visando a atender especialmente as demandas de ponta do sistema interligado, além de unidades dispersas em comunidades isoladas e não servidas pelo sistema interligado de distribuição. Nesse caso, predomina a geração a óleo diesel (Santos, 2012).

Dada a importância desses aspectos, a geração térmica não adquiriu, ao longo da evolução histórica do setor elétrico brasileiro, um caráter de produção competitiva com a hidroeletricidade. Por isso mesmo, tanto o desenvolvimento em maior intensidade como a modernização ou melhoria na eficiência de suas instalações permaneceram estagnados, Pottmaier (2012).

Apenas 1% da capacidade de produção de eletricidade do país encontra-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados, localizados principalmente na Região Amazônica. Esse percentual, em sua grande maioria, está inserido em 45% do território nacional e compõe o Sistema Elétrico Isolado. Tal sistema é assim denominado por não estar interligado ao SIN e por não permitir o intercâmbio de energia elétrica com outras regiões, em função das peculiaridades geográficas da região em que está instalado. Nesses sistemas isolados a geração é predominantemente térmica, a base de óleo diesel e óleo combustível, embora também abriguem Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH), termelétricas movidas a biomassa e geradores fotovoltaicos.

Os sistemas isolados de maior porte suprem as capitais Rio Branco (AC), Porto Velho (RO), o Estado de Roraima (com exceção da capital Boa Vista e seus arredores, abastecidos pela Venezuela), algumas localidades da região do Estado do Pará e uma pequena parte de Manaus (AM) e Macapá, pois grande parte já está conectada ao SIN.

Os Sistemas Isolados, por serem predominantemente térmicos, apresentam custos de geração superiores ao SIN. Além disso, as dificuldades de logística e de abastecimento dessas localidades pressionam o frete dos combustíveis (com destaque para o óleo diesel). Para assegurar à população atendida por esses sistemas os benefícios usufruídos pelos consumidores do SIN, o Governo Federal criou a Conta de Consumo de Combustíveis Fósseis (CCC), encargo setorial que subsidia a compra do óleo diesel e do óleo combustível usado na geração de energia

por usinas termoelétricas que atendem às áreas isoladas. Essa conta é paga por todos os consumidores de energia elétrica do país. Em 2016, o custo total com combustível para a geração de energia elétrica somente com as usinas da CELPA foi de R\$ 31.643.113,52, de acordo com dados contidos no Plano Anual de Custos da CELPA (Plano Anual de Custos, 2017).

Atualmente o fundo setorial da CCC tem sofrido modificações: antes, consideravam-se apenas os dados referentes a consumo específico de combustível. Agora, no entanto, o Custo Total da Geração (CTG) passou também a ser um parâmetro importante na análise das usinas termoelétricas do Sistema Isolado.

De acordo com a Lei nº 12.111/2009, oriunda da conversão da Medida Provisória nº 466/2009, o novo marco legal para a CCC e para a gestão dos Sistemas Isolados introduziu a cobertura do Custo Total de Geração (CTG), relativo ao atendimento ao serviço público de energia elétrica nos Sistemas Isolados e manteve a cobertura para os empreendimentos subrogados. Posteriormente, a Lei nº 12.783/2013 apresentou ajustes no CTG e determinou que os recursos para a cobertura desses subsídios passassem a ocorrer por meio do fundo setorial da Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), e não mais por arrecadação direta de quotas (Eletrobrás, 2016).

Torna-se importante destacar a principal diferença entre os Sistemas Isolados e as Comunidades Isoladas. Os Sistemas Isolados referem-se a sistemas térmicos ou hidráulicos já constituídos, sendo operados por concessionárias ou Produtores Independentes de energia e passíveis de usufruírem do mecanismo do benefício da CCC (Duarte, 2009). As Comunidades Isoladas referem-se a localidades sem acesso à energia ou com fornecimento feito por prefeituras, cooperativas ou pequenos distribuidores, mediante o uso de fontes alternativas de energia que promovam as potencialidades locais (Santos, 2012).

Atualmente no Brasil, ainda existem sistemas isolados, que se concentram em sua maior parte na Região Norte do País e esses sistemas caracterizam-se basicamente pelo grande número de pequenas unidades geradoras que utilizam motores de combustão interna consumindo óleo diesel e pela enorme dificuldade na logística de abastecimento.

Observou-se ao longo dos anos que não houve inclusões de novos Sistemas Isolados, mas sim se trabalhou para a interligação ao SIN de algumas das principais usinas térmicas isoladas, entre elas: Rio Preto da Eva, Novo Airão, grande parte de Manaus e Macapá, Óbidos e Oriximiná, da CELPA, e Petrolina do Norte e Vista Alegre da CERR (interligação à

Caracará/Boa Vista). Entretanto não há estimativas para a interligação de todos os sistemas isolados, principalmente os que compõem o Estado do Pará.

A previsão da geração térmica para 2016 foi da ordem de 3.254.462 MWh, valor 58,2% menor que o previsto no plano do ano anterior (Eletrobrás 2016) devido às novas interligações ao SIN. A principal fonte dessa forma de geração é o óleo diesel, que atualmente é denominado de B7 (uma mistura de diesel e biodiesel).

Os dados apresentados pela ANEEL em 2016 referentes aos dados de consumo dos diferentes tipos de combustíveis de origem fóssil podem ser observados na Tabela 2.1. O consumo de óleo diesel para a geração de energia elétrica no sistema isolado é superior a um milhão de metros cúbicos. Entretanto esse valor foi inferior ao período de 2014, em virtude da interligação de novos sistemas ao SIN.

Tabela 2.1 - Consumo total em 2015 por tipo de combustível

TIPO	Consumo por tipo de combustível		
	Plano 2015	Varição em relação ao previsto no plano 2014	Varição em relação ao verificado em 2014*
Óleo diesel (m ³)	1.030.542	-14,4%	-34,9%
Óleo combustível (t)	12.112	-93,4%	-96,1%
Gás Natural (Mm ³)	10.2	-99,3%	-100,0%

(*) verificado jan-ago + previsto set-dez

Fonte: Eletrobrás, 2016.

Na Tabela 2.2 são apresentadas a geração térmica e o consumo de combustível por empresa para o ano de 2015 (pois para o ano de 2016 houve dificuldade de se obter dados das empresas). O Estado do Pará, representado pela empresa Celpa, figura entre os três maiores consumidores de óleo diesel, chegando a 128.899 m³.

Tabela 2.2 - Geração Térmica e Consumo de Combustível para 2015

Geração Térmica e consumo de combustível			
Empresa	Tipo de óleo	Geração Térmica (MWh)	Consumo de combustível
CEA (Macapá)	Diesel (m ³)	533.484	112.032
CEA (interior)	Diesel (m ³)	118.602	31.245
CELPA	Diesel (m ³)	457.482	128.889
CEMAT	Diesel (m ³)	7.267	2.100
CERR	Diesel (m ³)	25.203	8.016
Eletrobrás Dist. Rondônia	Diesel (m ³)	306.795	82.444
Eletrobras Acre	Diesel (m ³)	205.761	53.484
Eletrobras Roraima	Diesel (m ³)	241.534	50.722
Eletrobras AmE (interior)	Diesel (m ³)	1.215.481	326.965
Eletrobras Eletronorte Macapá	Diesel (m ³)	672.211	188.954
CELPE	Diesel (m ³)	17.896	5.065
JARI CELULOSE	Diesel (m ³)	19.355	5.505
Petrobras /Alcoa Porto	Diesel (m ³)	9.214	2.608
Total		3.830.285	998.029

Fonte: Eletrobrás, 2015 (adaptado)

2.2 O SISTEMA ISOLADO NO ESTADO DO PARÁ

O Estado do Pará é formado por 144 municípios, distribuídos em 06 mesorregiões, como mostrado na Figura 2.1. Pode-se observar também a distribuição das usinas termoeletricas que operam com motor diesel localizadas no Estado.

Tabela 2.3 - Usinas, geração e demanda – Guascor

USINAS	Geração térmica (kWh)	Demanda máxima (kW)
AFUÁ	783.790	1395
ALENQUER	3.068.397	5591
ALMEIRIM	1.414.053	2955
CACHOEIRA DO ARARI	463.996	885
FARO	375.259	715
GURUPÁ	835.780	1490
JURUTI	3.492.107	6902
MONTE ALEGRE	3.404.090	6723
MUANÁ	1.060.574	1960
OEIRAS DO PARÁ	848.368	1520
PORTO DE MOZ	1.468.927	2535
PRAINHA	702.247	1276
SALVATERRA	1.867.217	3498
S S DA BOA VISTA	966.553	1700
SOURE	1.732.430	3190
TERRA SANTA	1.103.168	2083

Fonte: Celpa, 2016

Tabela 2.4 - Usinas, geração e demanda da empresa Soenergy

USINAS	Geração térmica (kWh)	Demanda máxima (kW)
ANAJÁS	680.526,00	1.305
AVEIRO	178.970,40	380
CHAVES	181.713,00	411
COTIJUBA	331.494,00	630
JACAREACANGA	618.201,00	1.122
SANTA CRUZ DO ARARI	262.080,00	620
SANTANA DO ARAGUAIA	3.287.579,00	7.090
MONTE DOURADO	-	-

Fonte: Celpa, 2016

Atualmente a responsabilidade da rede Celpa é apenas de distribuição de energia, ficando a cargo da Guascor e da Soenergy a tarefa de geração de energia. Grande parte das usinas do sistema isolado encontram-se em regiões de difícil acesso e a grandes distâncias, tendo como referência a capital do Estado do Pará. A Tabela 2.5 identifica o meio de acesso às usinas e também o total de unidades geradoras por usina e a potência instalada. As 24 usinas pertencentes ao sistema isolado possuem 143 grupos geradores diesel, oferecendo uma potência instalada de 91,8 MW.

Tabela 2.5 - Usinas a diesel do sistema isolado no Pará

	Localidade	Operador	Acesso	Unidades geradoras	Potência instalada [kW]
1	Afuá	Guascor	Fluvial	6	3.592,8
2	Alenquer	Guascor	Fluvial	10	7.350,4
3	Almeirim	Guascor	Rodo Fluvial	7	4.632,8
4	Cachoeira do Arari	Guascor	Fluvial	5	1.728,0
5	Curuá	Guascor	Rodo fluvial	5	2.003,6
6	Faro	Guascor	Fluvial	5	1.728,0
7	Gurupá	Guascor	Fluvial	7	3.483,2
8	Jurutí	Guascor	Fluvial	11	9.525,6
9	Monte Alegre	Guascor	Fluvial	13	10.517,6
10	Muaná	Guascor	Fluvial	7	3.064,8
11	Oeiras do Pará	Guascor	Fluvial	6	2.581,6
12	Porto de Moz	Guascor	Rodoviário e Fluvial	7	3.969,4
13	Prainha	Guascor	Rodo fluvial	4	2.248,8
14	Salvaterra	Guascor	Rodoviário	8	6.520,8
15	Soure	Guascor	Rodoviário	8	6.108,0
16	Terra Santa	Guascor	Fluvial	5	3.662,8
17	Anajás	Celpe	Fluvial	5	1.380,0
18	Aveiro	Celpe	Fluvial	3	872,0
19	Chaves	Celpe	Fluvial	4	1.000,0
20	Cotijuba	Celpe	Fluvial	3	2.590,0
21	Jacareacanga	Celpe	Fluvial	4	1.800,0
22	Santa Cruz do Arari	Celpe	Fluvial	4	960,0
23	Santana do Araguaia	Celpe	Rodoviário	6	10.500,0
24	Monte dourado	Celpe	-	-	-

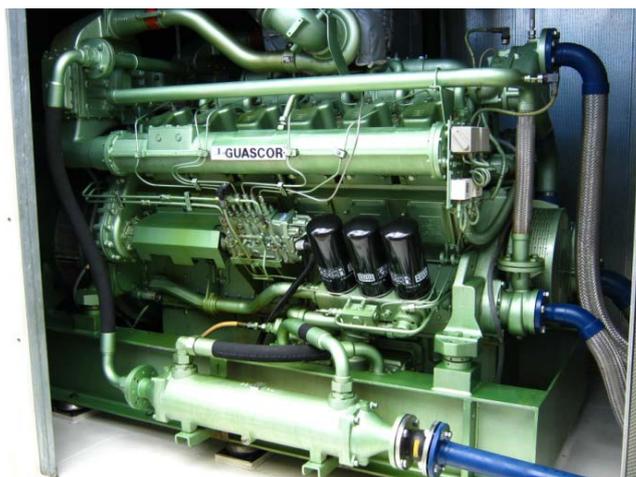
Fonte: (Celpe, 2016)

2.3 USINA TERMOELÉTRICA COM MOTOR DIESEL

As usinas termoelétricas que utilizam como elemento acionador os motores de combustão interna têm como sua principal fonte de energia primária os combustíveis fósseis, os quais podem ser: o óleo combustível (AOC, PGE, BPF, etc.), o óleo diesel, o gás natural ou, mais recentemente, uma mistura de diesel com biodiesel, comumente chamado de biodiesel BX.

Um motor diesel é uma máquina térmica alternativa, de combustão interna, destinada ao suprimento de energia mecânica ou força motriz de acionamento, como é o caso do grupo gerador a diesel mostrado na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Grupo gerador com motor diesel – Soure/PA



Fonte: Celpa, 2016.

2.3.1 Classificação das usinas a diesel em função da potência

De acordo com Santos (2012), as unidades geradoras que operam com motor diesel podem ser classificadas conforme mostrado na Tabela 2.6, na qual são apresentados exemplos de algumas máquinas estacionárias para a geração de energia elétrica, quanto às potências nominais e instaladas dos motores e dos alternadores.

Tabela 2.6 - Classificação das unidades geradoras em função da potência

Equipamentos	CLASSIFICAÇÃO DAS UNIDADES GERADORAS A DIESEL			
	Motor		Alternador	
Classificação	Potência Nominal (hp)	Exemplos	Potência Instalada (kW)	Exemplos
Pequeno Porte	$P_n \leq 550$	Cummins (séries N e C), Scania (D, DN), MWM (D299), Perkins (MS) Mercedes Benz (OM 336) e Guascor (F180, SF180). Mercedes Benz (OM 447), Volvo (TAD), etc.	$PI \leq 350$	Negrini, Toshiba, GE, Weg e Leroy Somer.
Médio Porte	$550 < P_n \leq 1400$	Cummins (KTTA), Caterpillar (série 3500, C32), Perkins (4012T), Alco, Guascor (SF 480TA), GM – EMD, Mitsubishi.	$350 < PI \leq 1000$	Onan, Caterpillar, GE, Leroy Somer, GM, e Weg.
Grande Porte	$P_n > 1400$		$PI > 1000$	Onan, Caterpillar, Leroy Somer, GE, Toshiba, ABB e Newage; Stanford

Fonte: Adaptado (Santos, 2012).

2.3.2 Potência das Unidades Geradoras a diesel

Para definir as potências de funcionamento dos motores existe a norma DIN 6270 e 6271, geralmente adotadas por empresas europeias, bem como as normas ISO 8528, 3046, AS 2789, 1585 e SAE BS 5514, J1349 e J1995, utilizadas por empresas de origem americana.

As normas brasileiras, elaboradas pela ABNT, que tratam das características dos motores diesel são: MB – 749 (NBR 06396) – Motores Alternativos de Combustão Interna e NB – 130 (NBR 05477) – Apresentação do Desempenho de Motores de Combustão Interna, Alternativos e de Ignição por Compressão (Diesel).

Mesmo observando as características de cada uma das normas existentes, torna-se importante ainda o entendimento de que elas foram elaboradas para as condições ótimas de operação, ou seja, para os testes realizados em laboratório e nas Condições Normais de Temperatura e Pressão – CNTP, adotada por cada fabricante. Logo esses testes são baseados nas condições estabelecidas, com um poder calorífico inferior (PCI) de 42.780 kJ/kg, quando utilizado a 29 °C, massa específica de 839,9 g/l e ainda o combustível correspondente a ASTM D2, com consumo baseado na densidade do produto de 0,850 kg/l.

As potências empregadas para os grupos geradores são:

- Potência Efetiva Contínua Não Limitada: é a maior potência efetiva garantida pelo fabricante, que será fornecida sob regime de velocidade, conforme sua aplicação durante 24 horas diárias, sem sofrer desgaste anormal e perda de desempenho. O ajuste dessa potência no motor permite ainda uma sobrecarga (em geral 10 % da potência efetiva contínua) que dependerá da quantidade de combustível injetada e/ou bloqueada na bomba injetora ou PT (pressão – tempo) para a aceleração tal como requerida em caso de aplicação súbita de plena carga elétrica.
- Potência Efetiva Contínua Limitada: é a maior potência efetiva garantida pelo fabricante, que será fornecida sob regime de velocidade angular, especificado conforme sua aplicação, contínua e durante um tempo limitado, ou intermitentemente, sob a indicação do fabricante e sem sofrer desgaste anormal e perda de potência. O ajuste dessa potência não permite uma sobrecarga na operação.
- Potência Nominal (Pn): é a faixa de potência para a qual a unidade geradora foi testada (comissionada) pelo fabricante do motor, dentro das CNTP's, sem que haja desgaste anormal e/ou perda de potência. É importante ressaltar que a Pn de uma UDG é obtida na bancada de teste e ajustada para as condições do local da instalação.

- Potência de *Stand by*: é estabelecida sobre a potência efetiva contínua limitada, na qual o grupo gerador opera como uma unidade de emergência, com carga variável, somente quando a fonte principal deixa de fornecer energia. Neste caso, os motores funcionam com sua potência máxima especificada pelos fabricantes, que consideram esse regime de trabalho para aqueles motores que operam até 300 h/ano.
- Potência Intermitente ou Principal: é estabelecida sobre a potência efetiva contínua não limitada, em que o grupo gerador opera por curtos períodos de tempo com carga variável sem limites. Neste caso, os motores das unidades geradoras operam com potências inferiores à máxima, definidas pelos fabricantes, para cada tipo de motor. Alguns fabricantes consideram esse regime de trabalho para motores que operam entre 300 e 3.000 h/ano.
- Potência Contínua: é a potência efetiva disponível, na qual o grupo gerador opera todos os dias de forma contínua e sem variação de carga, por um período indeterminado de tempo (podendo operar 24 horas por dia), parando somente para pequenas manutenções (troca de carga de óleo lubrificante, de filtros e reaperto). Neste caso, os motores funcionam com potências inferiores àquelas praticadas no regime intermitente e também são definidas pelos fabricantes de cada tipo de motor. Alguns fabricantes consideram esse regime de trabalho para motores que operam acima de 3.000 h/ano.
- Potência Liberada: é a potência na qual o grupo gerador opera após o teste de consumo específico, realizado na instalação, em que se define a faixa ótima de operação. Esta potência, na melhor das situações, deverá ser igual à potência contínua.
- Potência Elétrica Ativa Nominal (Pa) de uma Unidade Geradora (em kW): é definida pelo produto da potência elétrica aparente nominal (em kVA) pelo fator de potência nominal do gerador elétrico, considerado o regime de operação contínuo e as condições nominais de operação, ou seja, é a potência elétrica nominal encontrada na placa do alternador (gerador elétrico) da UDG (ANEEL 2000).
- Potência Instalada de uma Central Geradora (em kW): é definida, em números inteiros, pelo somatório das potências elétricas ativas nominais das unidades geradoras instaladas na central (ANEEL, 2014).

2.3.3 Desempenho e Rendimento

As usinas termoelétricas a diesel apresentam seu rendimento associado a um conjunto de condições, tais como: as características atmosféricas do local de operação (temperatura e umidade); as características das cargas a serem atendidas; o layout da instalação (proximidade entre as unidades); a qualidade do óleo combustível entregue e armazenado; o processo de filtragem; a modulação da carga; o tipo de regime de trabalho (motor de emergência, regime limitado ou regime contínuo); a curva de carga da localidade; a vida útil do equipamento; o processo/programa de manutenção das unidades geradoras; entre outros fatores.

No cenário de todos esses fatores ocorre um distanciamento no rendimento dos motores obtido na bancada de testes do fabricante em relação ao obtido no local da instalação, fazendo com que o mesmo varie de 15 a 25 %.

Quando se trata de usinas termoelétricas a diesel, um parâmetro importante que deve ser obtido é a curva característica de consumo específico. Ela tem como finalidade definir a faixa de operação ótima do grupo gerador e é obtida através de testes de comissionamento conforme as normas NBR 6376, NBR 8422 e NBR 5477.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS PARA A REDUÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL FÓSSIL

3.1.1 Uso do biodiesel

A introdução de biodiesel na matriz energética brasileira ocorreu por meio do Plano Nacional de Produção de Biodiesel (PNPB). Com isso, passou-se a utilizar valores percentuais mínimos obrigatórios de adição de biodiesel ao óleo diesel comercializado aos consumidores finais. De início, a adição foi de 2,0% em 2008, passando pelos atuais 7% e podendo chegar a 10% em 2019 (ANP, 2016). Essas misturas binárias de biodiesel e óleo diesel são designadas pela abreviação BX, em que X representa a porcentagem de biodiesel na mistura. Por exemplo, B2 é uma mistura binária cuja porcentagem de biodiesel é igual a 2%. Por outro lado, B5 possui 5% de biodiesel e assim por diante até alcançar o biodiesel puro denominado por B100.

De acordo com a Agência Nacional de Petróleo (ANP), o biodiesel é um combustível composto de alquil ésteres de ácidos graxos de cadeia longa, derivados de óleos vegetais diversos ou de gorduras animais, conforme a especificação contida no Regulamento Técnico, parte integrante da Resolução ANP Nº 7 (ANEXO I), de 19/3/2008 (ANP, 2016), cujo principal processo utilizado no Brasil para a sua produção é a transesterificação.

Por apresentar características relativamente semelhantes, o biodiesel pode ser considerado um substituto natural do óleo diesel e pode ser usado diretamente nos motores diesel sem que estes sofram modificações significativas (Hoekman, Broch *et al.*, 2012). Por ser oriundo de fontes renováveis, é considerado um combustível “ecologicamente correto”, pois reduz de maneira significativa a emissão de poluentes, tais como, os hidrocarbonetos não queimados, monóxido de carbono e material particulado. Acrescenta-se a isso o fato de ser praticamente isento de enxofre e substâncias aromáticas cancerígenas, comuns aos derivados de petróleo (Rakopoulos, Antonopoulos *et al.*, 2006). Ademais o uso do biodiesel (que possui maior viscosidade) melhora a capacidade de lubrificação do motor, influenciando em sua vida útil (Lanjekar e Deshmukh, 2016).

Em virtude da grande compatibilidade do biodiesel com o diesel convencional, ele pode ser uma alternativa capaz de atender à maior parte da frota de veículos a diesel já existente no mercado, sem qualquer necessidade de investimentos tecnológicos no desenvolvimento dos motores. O biodiesel é perfeitamente miscível e físico-quimicamente semelhante ao óleo diesel mineral, podendo ser utilizado puro ou misturado em quaisquer proporções.

Em relação às desvantagens do uso do biodiesel em motores, citam-se a sua instabilidade química, que provoca rápida oxidação e degradação, o seu menor poder calorífico, em relação ao diesel convencional e a sua elevada viscosidade. Logo, elas ocasionam condições desfavoráveis ao funcionamento do motor durante a combustão e influenciam diretamente na queda de eficiência, provocando aumento do consumo de combustível (Datta e Mandal, 2016).

Além das desvantagens supracitadas em relação às propriedades físico-químicas do biodiesel, há problemas também em relação a sua produção, pois esses processos são caros e demandam mão de obra especializada, assim como equipamentos sofisticados. Tudo isso, associado ao custo com transporte, seja ele com deslocamento de matéria prima até a usina ou do produto até o consumidor final, o que eleva os custos finais do biodiesel (Verma e Sharma, 2016).

3.1.2 Processo de Produção do Biodiesel

Para a produção do biodiesel utilizam-se os processos de a pirólise, de microemulsão e de transesterificação, entre outros. A pirólise, ou craqueamento térmico, consiste na conversão de uma substância em outra pela aplicação de energia térmica, isto é, pelo seu aquecimento, na ausência parcial ou total de um agente oxidante (oxigênio), em temperaturas superiores aos 400 °C, podendo o processo ser ou não catalisado. Apesar da pirólise ser um processo rápido (tempo de residência no reator em torno de 2 a 5 segundos), são necessárias elevadas taxas de aquecimento, elevados coeficientes de transferência de calor e massa e temperaturas moderadas da fonte de aquecimento (Gomes, 2005). Durante a produção, o craqueamento dos triglicerídeos produz uma substância chamada de bio-óleo que, na verdade, é um “alcatrão” primário composto por alcanos, alcenos, alcadienos, compostos aromáticos e ácidos carboxílicos. Essa substância possui um elevado teor de água em sua composição, assim como maior densidade comparada ao diesel convencional. Sua utilização como óleo combustível em motores de combustão por compressão é possível, entretanto faz-se necessário resolver problemas de corrosão, baixo valor de aquecimento e reações de polimerização que ocorrem durante o armazenamento (Barreto, 2009).

As microemulsões são dispersões termodinamicamente estáveis, opticamente isotrópicas e límpidas de óleo vegetal ou óleo diesel, álcool (metanol ou etanol) e um surfactante. Um dos objetivos desse processo é aumentar a área de contato do óleo com o álcool e, com isso, diminuir a alta viscosidade característica dos óleos vegetais. Apesar das microemulsões apresentarem boas características, o processo de separação dos produtos formados é mais difícil devido à

presença do surfactante. Identificou-se que a longo prazo pode ocorrer deposição de carbono no motor através da combustão incompleta e ainda o aumento da viscosidade dos óleos lubrificantes (Ma & Hanna, 1999).

Entre os processos químicos anteriormente citados, a transesterificação é o mais utilizado atualmente para a produção do biodiesel, obtendo melhor resultado em relação a redução da viscosidade dos triglicerídeos, melhorando ainda as propriedades físicas dos combustíveis para o motor a diesel (Al-Widyan e Alshyoukh, 2002). Para que ocorra o processo é necessária a reação de um álcool com o óleo vegetal escolhido. O triglicerídeo reage com este álcool formando glicerol e uma mistura de ésteres alquílicos (biodiesel). A transesterificação é o processo, dentre os citados, que apresenta melhores resultados do ponto de vista das características físico-químicas do biodiesel. Os ésteres formados a partir desses óleos possuem propriedades termofísicas próximas as do óleo diesel, credenciando-os a serem utilizados como combustível.

3.1.3 Óleo vegetal

Atualmente, a necessidade de se obter novas fontes energéticas está mais voltada para a preocupação com o meio ambiente, ou seja, a busca por uma “energia mais limpa” oriunda de fontes renováveis. E, neste contexto, os óleos vegetais e as gorduras animais vêm tomando espaço no mercado com o intuito de substituir parcialmente, a princípio, a demanda por combustível líquido, mais precisamente o óleo diesel.

A ideia de usar óleos vegetais como combustível em motores surge no final do século XIX com Rudolf Diesel. Em meados do século XX, os óleos vegetais ganham destaque no cenário internacional tornando-se o principal combustível utilizado em motores de ignição por compressão (motor diesel). Mas, com o passar dos anos e o avanço tecnológico na extração de petróleo, os óleos vegetais perderam espaço para o óleo diesel que começou a ser produzido em grande escala (Bialkowski, 2009).

Como os recursos das jazidas de petróleo são limitados e as preocupações ambientais crescem a cada ano, tem-se renovado o foco na utilização de novas matérias primas (de origem vegetal ou animal) para produção de combustíveis “mais limpos”, ou até mesmo adequações dessas fontes para uso em forma direta *in natura* como combustível. Em vários países, o uso tem se tornado cada vez mais comum, como é o caso dos EUA e Brasil que usam o óleo de soja, da Europa com o uso do óleo de colza e girassol, do sudeste asiático onde se usa muito o óleo de palma, da Índia com o pinhão manso e do Japão através do uso do óleo de frituras reciclado

(Rakopoulos *et al.*, 2006; Agarwal e Agarwal, 2007; Haldar *et al.*, 2009; Purushothaman e Nagarajan, 2009); Qi *et al.*, 2014.

Hodiernamente, tem-se reconduzido as pesquisas na utilização dos óleos vegetais, seja para a sua utilização na forma *in natura* como combustível em motores (automotivos ou grupo geradores) ou como matéria prima para a produção de biocombustível (Datta e Mandal, 2016). Esse interesse tem crescido em virtude das preocupações ambientais, sob os aspectos de emissões que agravam o efeito estufa, de risco à saúde humana seja por emissões desses gases ou por derramamento acidental em rios e mares; além da busca por alternativas que visem a minimizar o uso de derivados de petróleo, especialmente o óleo diesel.

A região Amazônica possui uma enorme variedade de plantas oleaginosas com potencial exploráveis na forma extrativista para serem utilizadas como combustíveis na geração de energia elétrica para as comunidades isoladas, contribuindo para o desenvolvimento regional e sustentável.

3.1.4 Características físico-químicas dos óleos vegetais

Os óleos vegetais são substâncias insolúveis em água, hidrofóbicas e formadas principalmente por triglicerídeos (ésteres). Eles estão presentes nos óleos vegetais em proporções de 90-98%, juntamente com uma percentagem menor (1-5%) de ácidos graxos livres (Bialkowski, 2009). Os triglicerídeos são produtos originários da condensação de uma molécula de glicerol (glicerina) e duas (ou até três) moléculas de ácidos graxos; e são classificados em simples e mistos, de acordo com sua composição (LABECKI, 2010). No geral, os óleos vegetais são compostos formados por 98% de triglicerídeos mistos, que se classificam assim por apresentarem os três grupos dos ácidos graxos (radicais) distintos em sua estrutura molecular. O óleo diesel mineral é uma mistura complexa de hidrocarbonetos formado por parafinas, naftalenos, olefinas e aromáticos. As estruturas químicas do biodiesel, diesel e óleo vegetal são apresentadas na Figura 3.1.

3.1.5 Propriedades dos óleos vegetais

No estudo de novos combustíveis é muito importante quantificar suas propriedades físicas e químicas que estão ligadas intimamente às características do processo de combustão. Sendo assim, para a utilização de óleos vegetais como combustível é necessário identificar essas características. Na Tabela 3.1, são observados alguns óleos vegetais, o óleo diesel e algumas de suas principais propriedades.

Tabela 3.1 - Principais propriedades de diferentes óleos vegetais comparadas com as do óleo diesel

Matéria prima	Massa específica [kg/m ³]	Viscosidade cinemática [cSt]	Número de cetano [-]	PCS [MJ/kg]
Diesel	820 - 850	2,0 a 4,5	≥48	≥45,0
Mamona	955	251	42	37,4
Coco	918	27	41	37,1
Milho	910	33	38	39,5
Semente de algodão	915	34	42	39,1
Palma	918	43	42	39,5
Colza	912	36	41	39,7
Soja	914	31	38	39,6
Girassol	916	35	37	39,6

Fonte: (Blin *et al.*, 2013)

3.1.5.1 Poder calorífico

A quantidade de energia contida no combustível por unidade de massa ou volume é o que caracteriza o seu poder calorífico, o qual pode ser apresentado de duas formas: o poder calorífico superior (PCS) e o poder calorífico inferior (PCI). O primeiro é determinado pela quantificação da energia térmica liberada na vaporização e combustão completa do combustível. Geralmente ele é obtido usando uma bomba calorimétrica. O segundo é obtido matematicamente subtraindo-se do valor do poder calorífico superior a quantidade de energia gasta com a vaporização da água contida no combustível.

No geral, o PCI dos óleos vegetais é menor que o do diesel, indicando que maior massa de óleo vegetal deve ser queimada para produzir a mesma quantidade de energia liberada pelo óleo diesel. Entretanto, essa diferença de energia pode ser compensada pelo maior valor de massa específica encontrada no óleo vegetal.

3.1.5.2 Atraso de ignição e número de cetano

O tempo transcorrido do momento da injeção de combustível no interior do cilindro até o início da combustão é chamado de atraso de ignição. O número de cetano (NC) é a propriedade do combustível que está relacionada ao atraso de ignição em motores diesel. Combustíveis com baixo número de cetano apresentam maior atraso de ignição, o que influencia no desempenho do motor, causando baixa eficiência térmica, queda de potência, elevadas emissões de hidrocarbonetos e material particulado, entre outros (Ferrari, 2014).

A capacidade que esse óleo tem de sofrer auto-inflamação e combustão tem relação direta com o índice de Cetano. Esse número influencia no desempenho geral do motor, através dos gradientes de pressão, partida a frio e ruídos.

Para determinar o número de cetano geralmente é utilizado um motor padrão com razão de compressão variável que mede o atraso da ignição. Na maioria das vezes é usado o motor CFR (*Cooperative Fuel Research*), no qual são testadas misturas de dois combustíveis: um com alta qualidade e outro com baixa qualidade de ignição, determinando uma curva representativa da variação do NC em função do percentual da mistura (Reif, 2014).

3.1.5.3 Calor específico

Define-se calor específico como a quantidade de energia necessária para elevar a temperatura em 1°C de 1g de uma determinada substância. Os valores do calor específico dos óleos vegetais geralmente são maiores do que o do óleo diesel. Isso implica ser mais difícil aumentar a temperatura do óleo vegetal que a do óleo diesel, podendo-se obter maiores tempos de vaporização no interior do cilindro com o óleo vegetal (Kegl *et al*, 2013). Trabalhos, como os de Morad *et al*, (2000) e Olasheu *et al*, (2015), verificaram que o calor específico dos óleos vegetais tende a aumentar em função do elevado grau de instauração (número de ligações duplas) existentes nos ácidos graxos.

3.1.5.4 Viscosidade cinemática e massa específica

A viscosidade, que é sempre maior nos óleos vegetais (ver Tabela 3.7) é uma das principais propriedades que devem ser observadas para a utilização do óleo vegetal como combustível em motores diesel. Ela está associada à medida da resistência interna ao escoamento de um fluido que reflete diretamente no mecanismo de atomização do combustível pelo bico injetor (aumenta o atraso de ignição) e no processo de combustão dentro da câmara, que

dependendo da qualidade influenciará na potência desenvolvida pelo motor.

A temperatura é uma propriedade que tem a capacidade de modificar drasticamente a viscosidade. Como se trata de grandezas inversamente proporcionais, o aumento da temperatura diminui o valor da viscosidade. Trabalhos que utilizaram óleos vegetais como combustível em motores têm como base o pré-aquecimento do óleo para reduzir a viscosidade, como identificado em Pereira (2011). Um aspecto positivo referente ao elevado valor da viscosidade dos óleos vegetais é que agem como excelentes agentes de lubrificação, reduzindo as perdas por atrito, melhorando a eficiência mecânica do motor.

Por outro lado, a massa específica é definida como a massa por unidade de volume. O valor encontrado nos óleos vegetais é sempre superior ao do óleo diesel (ver Tabela 3.7). Isso implica que uma gotícula de óleo vegetal injetada no cilindro do motor possui maior massa em comparação com uma gotícula de óleo diesel do mesmo volume, podendo liberar inclusive maior quantidade de energia dependendo do seu poder calorífico. Ao mesmo tempo, a maior massa específica do óleo vegetal permite uma separação mais eficaz da umidade que possa estar contida no combustível.

Para a utilização de óleos vegetais como combustível é de vital importância a determinação de suas propriedades físicas, químicas e térmicas, sendo que cada oleaginosa possui características únicas e distintas, que as permitem utilizá-las em substituição total ou parcial do óleo diesel.

Até então, todas as propriedades que se pretendiam analisar eram feitas sem o auxílio de alguma norma que pudesse servir de referência para tais resultados obtidos. Porém, a partir de 2010 surge na Alemanha a norma DIN 51605 que estabelece algumas faixas de valores das principais propriedades a serem observadas quando se pretende utilizar óleos vegetais *in natura* como combustível. Essa norma passou a ser utilizada por vários pesquisadores de todo o mundo como ponto de partida para a análise das propriedades físico-químicas dos óleos vegetais que são usados como combustível.

3.1.6 Norma DIN 51605:2010 para o uso de óleo vegetal como combustível

Na Alemanha, as companhias de navegação e a agricultura exigem cada vez mais a utilização de óleo de colza como combustível. Assim, como no caso do biodiesel, para tornar possível a utilização em motores diesel, é necessário determinar os valores das principais características físico-químicas e das substâncias que comprometem sua utilização como substituto ao óleo diesel (Remmele e Thuneke, 2007).

Por esse motivo, sob a liderança do Centro de Tecnologia e Apoio (Technologieund Förderzentrum), em 1996, foi iniciada a proposta da criação da norma DIN V 51605, a qual definiria a qualidade exigida para o uso do óleo de colza como combustível em motores diesel. Finalmente, após diversas modificações e adequações, foi criada e publicada a norma DIN 51605:2010 (ver Tabela 3.2) que define os requisitos para o óleo de colza ser usado como combustível em motores diesel (Remmele e Thuneke, 2007; Blin *et al.*, 2013).

Entretanto, apesar da norma ter sido criada para analisar a utilização do óleo de Colza, inúmeros trabalhos utilizaram-na para verificar a qualidade do óleo vegetal antes do uso como combustível em motores (Kumar *et al.*, 2010; Hartmann *et al.*, 2012; Labecki *et al.*, 2012; Karabektas *et al.*, 2013).

Tabela 3.2 - Propriedades dos óleos vegetais - Norma DIN 51605:2010

Densidade a 15°C	DIN EN ISO 3675 DIN EN ISO 32185	910,0	925,0	kg/m ³
Viscosidade a 40°C	DIN EN ISO 3104	-	36,0	mm ² /s
Poder Calorífico Inferior	DIN 51900-1.2 DIN 51900-1.3	36,0	-	MJ/kg
Índice de Iodo	DIN EN 14111	-	125,0	gI ₂ /100g
Acidez	DIN EN 14104	-	2,0	mg KOH/g
Ponto de fulgor	DIN EN ISO 2719	101,0	-	°C
Número de cetano	DIN EN 15195	40,0	-	-
Estabilidade à oxidação a 110 °C	DIN EN 14112	6,0	-	h
Contaminantes totais	DIN EN 12662-1998-10	-	24,0	mg/kg
Teor de enxofre	DIN EN ISO 20884 DIN EN ISO 20846	-	10,0	mg/kg
Teor de fósforo	DIN 51627-6	-	3,0	mg/kg
Teor de cálcio	DIN 51627-6	-	1,0	mg/kg
Teor de magnésio	DIN 51627-6	-	1,0	mg/kg
Conteúdo de água	DIN EN ISO 12937	-	750,0	mg/kg

Fonte: Adaptado de (Deustches-Institut-Für-Nurming, 2010)

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 UTILIZAÇÃO DE ÓLEO VEGETAL *IN NATURA* EM MOTORES DIESEL

Como identificado na literatura, os principais problemas para que os óleos vegetais puros sejam diretamente utilizados como combustíveis são: a sua elevada viscosidade; o menor PCI, juntamente com a alta concentração de ácidos graxos; a formação de material sólido em suspensão; e a longa estrutura química que requer tempos maiores para vaporização e combustão no interior do cilindro (Hartmann *et al.*, 2012; Blin *et al.*, 2013 e Rakopoulos *et al.*, 2014). Pesquisas realizadas mostraram que grande parte desses problemas foi solucionada através da filtração e neutralização química do óleo, redução de viscosidade via aquecimento, e do aumento da pressão de injeção e da temperatura interna na câmara de combustão (Pereira, 2011 e Rakopoulos *et al.*, 2014). Apesar da solução desses problemas, surgiram novos inconvenientes para a utilização do óleo vegetal *in natura* como combustível: o custo de instalação e manutenção de outros equipamentos instalados no motor (trocadores de calor, misturadores, filtros, etc.) e, principalmente, o aumento da frequência de manutenção do motor, tornando o uso em motores diesel uma atividade economicamente limitada.

O trabalho de revisão realizado por Ramadhas *et al.* (2004) mostrou que pesquisadores de vários países realizaram trabalhos experimentais utilizando óleos vegetais como substitutos ao combustível para motores diesel. Os resultados mostraram que a eficiência térmica é comparável com a do óleo diesel, com pequena redução da energia liberada durante o uso de óleos vegetais. As emissões de NO_x reduzem consideravelmente, confirmando que o óleo vegetal bruto pode ser usado como combustível nos motores diesel. Algumas modificações devem ser realizadas durante seu uso e, assim, contribuir para reduzir o impacto ambiental causado pelos combustíveis fósseis.

Chauhan *et al.* (2010), realizaram testes em um motor com o óleo vegetal puro sem pré-aquecimento. Por essa razão, o motor apresentou uma eficiência térmica menor, além do aumento nas emissões de CO, HC e CO₂, quando comparados ao uso com óleo diesel. Resultados semelhantes foram encontrados nos trabalhos de Rakopoulos *et al.* 2014, que evidenciaram os cuidados a serem seguidos com algumas propriedades dos óleos vegetais.

Entretanto, alguns problemas surgem apenas quando o motor funciona com óleo vegetal puro por longos períodos de tempo, de acordo com os resultados apresentados por Duca, (2014). A pesquisa analisou o desempenho e o desgaste do motor em função da avaliação do consumo específico de combustível e da análise das características do óleo lubrificante após muitas horas

de funcionamento, utilizando como combustível diferentes óleos vegetais que foram filtrados e pré-aquecidos. Os resultados mostraram que o óleo de palma apresentou melhor desempenho em termos do consumo específico de combustível e da necessidade de troca do óleo lubrificante em comparação aos outros óleos.

No trabalho apresentado por Hellier, Ladommatos *et al*, 2015, observou-se a relação existente entre a composição de ácidos graxos presentes nos óleos vegetais e os impactos de sua utilização como combustível no funcionamento dos motores. Foram utilizados diferentes óleos vegetais pré-aquecidos e os que apresentaram melhores resultados foram o óleo de palma e o óleo de alga, chegando a eficiências térmicas próximas as do diesel.

A utilização de óleos vegetais em motores diesel deve garantir que as emissões de gases estejam de acordo com as normas regulamentadoras vigentes e também garantir que não exista redução da vida útil do motor ou aumento da frequência de sua manutenção, já que a violação desses requisitos tornaria inviável a utilização como combustível, principalmente em sistemas isolados.

4.2 UTILIZAÇÃO DE MISTURAS DE ÓLEO VEGETAL COM DIESEL

Com a utilização do óleo vegetal puro, mostrou-se a necessidade de fazer modificações/adequações importantes, seja no combustível ou no motor, caso contrário, acontecerá combustão inadequada e queda de eficiência térmica durante o funcionamento do motor, refletindo no aumento das emissões. Uma alternativa mais interessante é a utilização parcial do óleo vegetal em misturas com o óleo diesel em diferentes proporções. Já que, mesmo usando pequenas proporções de misturas, é possível diminuir as emissões de CO₂ produzidas pela utilização de combustíveis fósseis. Com isso, é possível obter-se grandes benefícios na introdução de um combustível renovável, tanto no setor energético, ambiental, quanto no social e econômico.

Diante do exposto, inúmeros trabalhos foram realizados utilizando misturas diesel óleo vegetal em diferentes proporções. As pesquisas realizadas por Rakopoulos *et al*, 2014, Wander *et al*, 2013, Kibbey *et al* (2014) e Rocha (2016) mostraram que concentrações iguais ou superiores a 50% em volume de óleo vegetal misturados ao diesel ocasionam os mesmos problemas quando se utiliza óleo vegetal puro. Isso leva a concluir que para melhorar os resultados com as misturas é necessário o pré-aquecimento.

O uso de misturas com 30% de óleo vegetal adicionados ao diesel mostraram resultados satisfatórios em comparação ao funcionamento do motor sem misturas, Sidibé *et al*, (2010) e

Leenus Jesu *et al.* (2012). Foi identificado redução na potência efetiva e na taxa de liberação de calor pela queima da mistura, assim como redução nas emissões de NOx e HC. Misra e Murthy (2011) também encontraram resultados similares, com diminuição no valor das emissões de NOx e eficiência térmica semelhante a do motor funcionando com óleo diesel como combustível.

No trabalho apresentado por Leenus Jesu Martin *et al.* (2012) foram realizados testes, utilizando óleo de semente de algodão em um motor de ciclo diesel monocilíndrico de 5,2 kW, com injeção direta e usando diferentes tempos de injeção de combustível e misturas de óleo vegetal com diesel. Os testes ocorreram com e sem pré-aquecimento da mistura. E os resultados encontrados identificaram que, com o ajuste do tempo de injeção do motor, a mistura que obteve melhor eficiência térmica foi a de 30% de óleo de Colza. Ao mesmo tempo, foi verificado que o aquecimento dessa mistura até 90°C provocou aumento na eficiência em 2%. Outro resultado obtido foi a redução da eficiência térmica do motor ao se utilizar o óleo vegetal puro. Entretanto, quando se aqueceu esse óleo a 110°C, houve aumento da eficiência térmica, ficando próxima da obtida com a mistura de 30% de óleo de Colza com diesel.

Labecki *et al.* (2012) desenvolveram trabalhos testando misturas de óleo de Colza com óleo diesel em um motor de injeção direta. Um sistema *common-rail* foi utilizado para melhorar a combustão da mistura, analisando variações na pressão e nos tempos de injeção. Os testes experimentais mostraram que ajustando a pressão e o tempo de injeção foi possível alcançar resultados equivalentes aos do óleo diesel para misturas em até 30% de óleo de Colza. Os autores identificaram que em misturas até 15% de óleo vegetal com óleo diesel não há necessidade de modificações no motor.

Os trabalhos realizados por Rakopoulos *et al.*, 2014 e Daho, Vaitilingom *et al.* (2013) identificaram que a maior proporção de óleo vegetal misturada ao diesel em que se obteve melhores resultados no motor, foi a de 20%. Os valores de potência e eficiência térmica obtidas nos testes foram próximos aos do diesel. O consumo específico de combustível, ao utilizar-se a mistura de 20% de óleo vegetal, foi superior, assim como as emissões de monóxido de carbono e de NOx quando comparadas aos resultados obtidos com óleo diesel puro.

Karabektas, Ergen *et al.*, (2013) demonstraram experimentalmente que misturas de 15% de óleo de colza com óleo diesel, utilizadas sem pré-aquecimento, apresentaram resultados próximos aos do motor funcionando com óleo diesel puro. Os resultados apontaram para uma pequena redução na eficiência térmica e no aumento do consumo específico de combustível.

Conforme os trabalhos identificados na literatura, entre eles o realizado por Rocha, (2016), optou-se pela utilização de misturas de óleo de palma (dendê) com diesel, na proporção

de 20x80 (20% vegetal e 80% óleo diesel). Para a escolha do percentual ideal a ser utilizado no trabalho, foram realizadas diversas misturas em diferentes proporções e guardadas por um período de trinta dias. Após esse tempo, realizou-se a análise da estabilidade da mistura e identificou-se que o melhor resultado foi para o uso de 20% de óleo vegetal.

4.3 MISTURAS DIESEL/OLEO VEGETAL COM ADIÇÃO DE HIDROGÊNIO

Os estudos citados anteriormente mostram que misturas iguais ou superiores a 50% de óleo vegetal em volume ao óleo diesel necessitam sofrer pré-aquecimento para que suas propriedades se adequem às necessárias ao correto funcionamento do motor. Contudo, a utilização de misturas de até 20% de óleo vegetal ao diesel pode ser usada sem a necessidade de pré-aquecimento, porém os problemas da combustão incompleta, do aumento do consumo específico e das emissões ainda continuam presentes, embora menores, comparadas ao funcionamento com o óleo vegetal *in natura*.

Uma forma de amenizar esses problemas é a utilização de um combustível auxiliar que melhore o processo de combustão desses óleos vegetais, refletindo no aumento de desempenho. Uma alternativa eficiente identificada na literatura foi a utilização de pequenas quantidades de hidrogênio injetados no ar de admissão do motor.

No trabalho apresentado por Senthil Kumar, Ramesh *et al.* (2003), foi testado óleo de Jathopra como combustível e pequenas quantidades de gás hidrogênio, injetado no ar de admissão do motor, chegando ao valor máximo de 5% em massa de H₂. Nos resultados dessa injeção, observou-se a redução das emissões de CO e HC, aumento da pressão dos gases e da temperatura, refletindo no aumento do desempenho do motor, com redução do consumo específico de combustível.

Outra alternativa de melhorar a combustão dos óleos vegetais foi analisada por Li, Biller *et al.* (2013), que investigou o enriquecimento de oxigênio no ar de admissão de um motor diesel, utilizando óleo de colza como combustível. O motor utilizado possuía uma potência nominal de 134 kW e os ensaios foram realizados a 50% dessa potência. Inicialmente, foi testado o óleo de colza sem enriquecimento de oxigênio, para posteriormente aumentar as concentrações de oxigênio até atingir uma concentração em volume de 24% no ar de admissão. Com os resultados, observou-se redução no atraso de ignição e na duração da combustão pré-misturada. Houve também aumento na temperatura e pressão no interior do cilindro e nas emissões de NO_x. Já o material particulado, as emissões de CO e de hidrocarbonetos foram significativamente reduzidos, enquanto que as emissões de NO_x aumentaram em grande proporção.

4.4 USO DE HIDROGÊNIO PARA A REDUÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVEL – UTILIZAÇÃO DE GÁS HHO

Identificado que o uso de gás hidrogênio melhora o processo de combustão de motores de ignição por compressão, reduzindo o consumo específico e emissões, optou-se por utilizá-lo neste trabalho. Entretanto é importante descrever as características deste elemento, suas propriedades físico-químicas e energéticas, a forma como se apresenta na natureza e seus métodos de obtenção e uso.

4.4.1 Hidrogênio

O hidrogênio é um elemento químico representado pelo símbolo H e com um número atômico igual a 1. Em condições normais de temperatura e pressão, é um gás diatômico (H₂) incolor, inodoro, insípido, não metálico, altamente inflamável, difícil para liquefazer e solidificar. Com massa atômica de 1,00794 u, o hidrogênio é o elemento químico mais leve e também o mais abundante, constituindo cerca de 75% da matéria visível no universo.

Algumas informações referentes às propriedades físico-químicas do hidrogênio em condições normais de temperatura e pressão são fornecidas na Tabela 4.1, entre elas destacam-se a baixa massa específica e o elevado poder calorífico que o torna um combustível muito eficiente. Os limites de explosão são amplos, o que o torna um combustível perigoso de ser manuseado.

Tabela 4.1 - Principais propriedades físicas do hidrogênio nas CNTP

Densidade	0,0899 kg/Nm ³ (gás) / 0,0708 kg/l (líquido)
Poder calorífico Inferior – PCI	119,972 MJ/kg
Poder calorífico Superior - PCS	141,890 MJ/kg
Limite de explosão	4-75% de H ₂ em ar
Calor específico	C _p = 14,33 J/kg. K c _v = 10,12 J/kg K
Energia mínima de ignição	0,02mJ
Temperatura de ignição no ar	585 °C

Adaptado de - (TECNALIA, 2006)

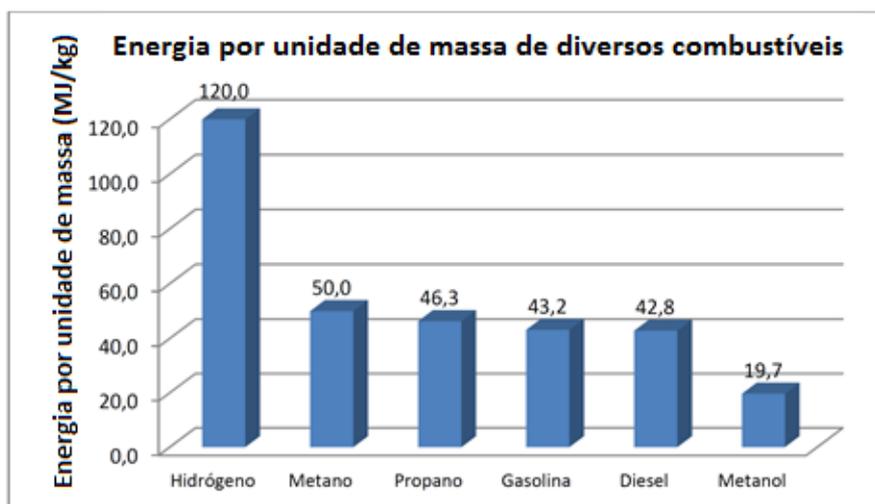
Por se tratar de um gás, é conveniente armazenar o hidrogênio no estado líquido, entretanto é necessário pressurizá-lo e resfriá-lo a uma temperatura de 250 °C abaixo de zero,

chegando a ocupar a milésima parte do seu volume. Também pode ser armazenado comprimido em tanques.

Em relação a outros combustíveis, o hidrogênio apresenta vantagens e desvantagens. Na Figura 4.1, observa-se que a densidade energética por unidade de massa do hidrogênio é muito maior do que os outros combustíveis, como diesel e gasolina por exemplo, e isso lhe imprime excelentes condições para seu uso como combustível.

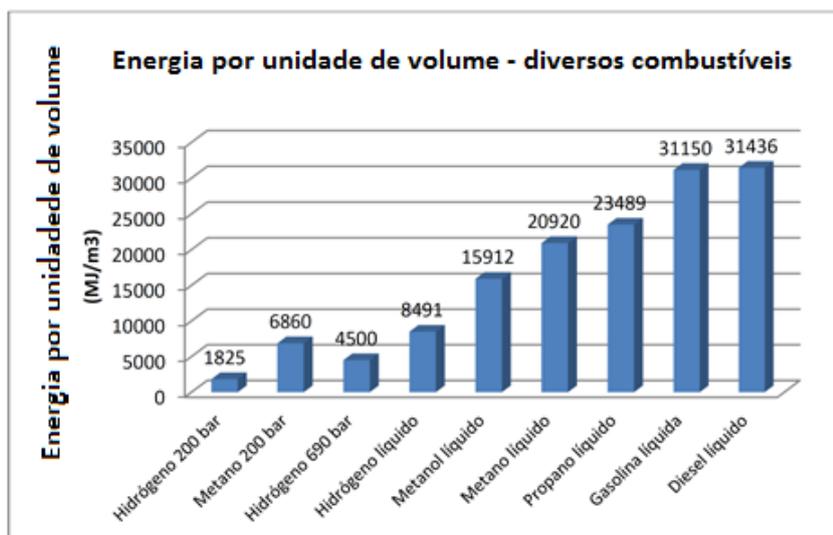
Na Figura 4.2 observa-se que o teor de energia do hidrogênio por unidade de volume é muito menor em relação a outros combustíveis. Esse é um dos grandes problemas em relação ao armazenamento, uma vez que deverá ocupar volumes sob elevadas pressões para que consiga equiparar-se a outros combustíveis no estado líquido.

Figura 4.1 - Energia por unidade de massa de diversos combustíveis



Adaptado de TECNALIA (2016)

Figura 4.2 - Energia por unidade de volume de diversos combustíveis



Adaptado de TECNALIA (2016)

Com essas propriedades, ele tem a maior relação de energia por peso de todos os combustíveis observados: 1 kg de hidrogênio contém a mesma quantidade de energia de 2,1 kg de gás natural ou 2,8 kg de gasolina. A energia por volume, alcança cerca de $\frac{1}{4}$ da obtida pelo petróleo e $\frac{1}{3}$ da obtida com o gás natural.

O hidrogênio queima no ar na faixa de concentração de 4 a 75% por volume, o metano a concentração de 5,3 a 15% e o propano a 2,1 a 9,5%. A mais alta temperatura de queima do hidrogênio de 2.318 °C é alcançada em concentrações de 29% por volume, enquanto que o hidrogênio em uma atmosfera com oxigênio pode alcançar temperaturas de queima de até 3.000 °C (a mais alta temperatura alcançada pelo metano é 2.148 °C e pelo propano é 2.385 °C). As temperaturas para a combustão espontânea do hidrogênio, metano e propano são de 585 °C, 540 °C e 487 °C, respectivamente (Morais ,2013).

Com a identificação de algumas das características do hidrogênio, é necessário verificar o vasto campo de aplicação ao qual está inserido, que se estende às mais diversas áreas tecnológicas.

4.4.2 Aplicações para o Hidrogênio

Aplicações para o hidrogênio são encontradas na fabricação de amônia, na hidrogenação de gorduras vegetais (produção de margarinas), entre outras. Ele também é utilizado como gás de maçarico para soldas a altas temperaturas, na produção de combustível para foguetes espaciais e

na produção de ácidos, como o ácido sulfúrico, H_2SO_4 , que são muito utilizados na indústria petroquímica para aprimoramento de combustíveis fósseis.

Outras aplicações relevantes para o hidrogênio estão ligadas a pesquisas relacionadas a investigações criogênicas e estudos de supercondutividade, assim como usado como elemento constituinte na formulação da chamada “água pesada”, utilizada em fissão nuclear como moderadora de nêutrons.

Além das diversas aplicações dadas ao hidrogênio, a mais relevante delas no contexto da otimização de processos de combustão, está o seu uso como combustível (Rocha, 2016). O hidrogênio pode ser usado como um aditivo para melhorar a eficiência em motores de combustão interna. Para Al-Rousan (2010), a preocupação em reduzir o consumo de recursos provenientes de jazidas fósseis e das rigorosas restrições ambientais enfrentadas, a demanda por melhoria na eficiência dos motores à combustão interna tem crescido nos últimos anos, e o hidrogênio tem se mostrado como uma alternativa viável a se encaixar neste cenário.

O uso do hidrogênio tem revelado através de pesquisas pelo mundo, que pode ser uma fonte promissora de energia limpa, ao ser, por exemplo, utilizado em motores de combustão interna, sem que para isso, haja a necessidade de alterar radicalmente a concepção dos motores (Ghazal, 2013). Outra aplicação para a geração de energia está em sistemas com células a combustível. Embora, a célula a combustível tenha mais vantagens em relação ao motor de combustão interna, devido a elevada eficiência e emissões praticamente zero, existem alguns problemas a serem superados, especialmente em relação ao alto custo, com o uso de materiais nobres na concepção dos eletrodos nessas células.

Uma solução seria unir as características do hidrogênio ao motor de combustão interna, objetivando melhorar a eficiência do processo de combustão, graças ao elevado poder calorífico e à rápida combustão provocada pelo uso hidrogênio Morais (2013); Ghazal (2013); Sandalc e Karagöz (2014).

Apesar de ser o elemento mais abundante no universo, o hidrogênio precisa ser produzido a partir de outras fontes de energia. Existem diversas rotas para produção de hidrogênio, que incluem ciclos termoquímicos, reforma de combustíveis orgânicos como o gás natural, álcool, biomassa, entre outros, e a eletrólise da água.

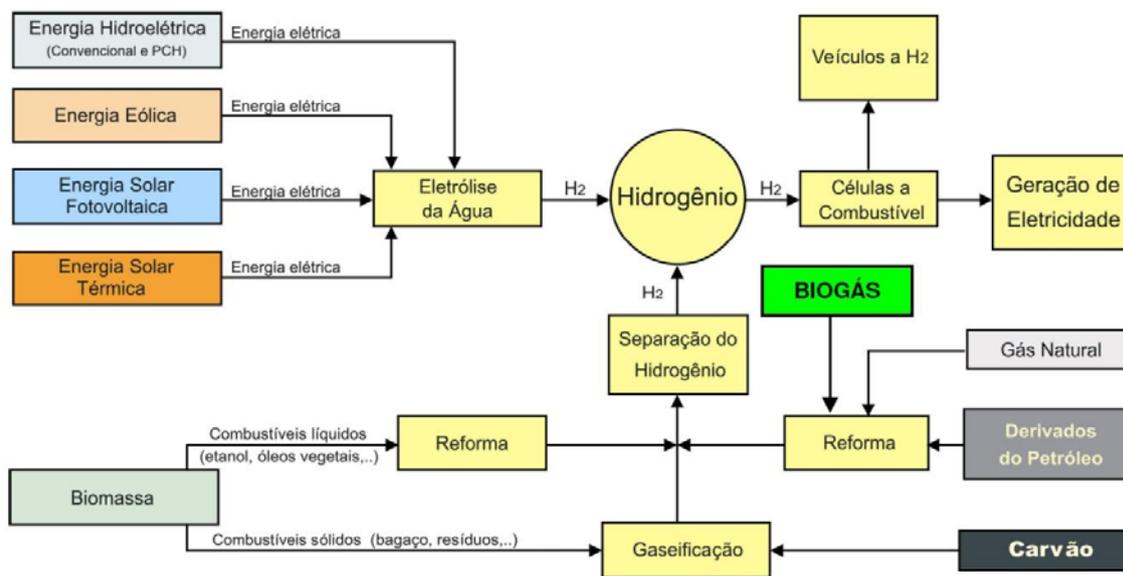
4.4.3 Métodos de produção de hidrogênio

Uma das principais vantagens da utilização do hidrogênio como uma fonte de energia, é a diversidade de formas que existem para a sua obtenção. Entre essas fontes primárias de energia

pode-se destacar: carvão, energia solar e eólica, biogás a partir da biomassa ou do lixo urbano; gás natural; petróleo e derivados; etanol e metanol; biodiesel; amônia; entre outros.

Para que o hidrogênio se torne uma fonte de energia ecologicamente correta, a sua produção deve ser a partir de fontes renováveis de energia, o que atualmente não acontece com tanta intensidade. De acordo com o Doe (2012), atualmente somente 5% (20 bilhões de m³) do hidrogênio é produzido a partir de fontes renováveis de energia. Na Figura 4.4 observa-se de forma esquemática a produção de hidrogênio através do uso de diversas formas de energia, assim como suas formas de separação e aplicação final.

Figura 4.4 - Esquema de produção de hidrogênio a partir de diferentes formas de energia



Fonte: adaptado de Doe, 2012.

Conforme Kordesch e Simader (2006) os principais processos de geração do hidrogênio são:

1. Reforma do metano (CH₄), ou de outro hidrocarboneto leve, com vapor de água. Esse processo é realizado em duas fases: em uma primeira fase, Equação 4.1 o metano reage com o vapor de água na presença de um catalisador à elevada pressão e temperatura, para produzir hidrogênio e monóxido de carbono.



Na segunda fase, ocorre uma reação catalítica exotérmica (reação *shift*), na qual o monóxido de carbono produzido na primeira fase é combinado com vapor de água para obter dióxido de carbono e hidrogênio



O balanço final deste processo pode ser expresso pela seguinte reação:



Para a geração de hidrogênio via reforma de vapor, o Brasil apresenta elevado potencial, considerando a enorme capacidade instalada de produção de etanol, o desenvolvimento de reformadores a etanol parece ser uma estratégia adequada à realidade do país.

2. Oxidação parcial de hidrocarbonetos pesados: o processo de reforma por oxidação parcial é um dos métodos mais antigos de produção de hidrogênio e se torna cada vez mais popular. Nesse processo, para produzi-lo, o combustível reage com uma quantidade limitada de oxigênio, conforme apresentado na Equação 4.4, que depois é purificado. As variáveis x e y representam números inteiros relacionados às quantidades molares de cada elemento da reação.



A oxidação parcial é semelhante ao processo de reforma por vapor, mas nela é possível efetuar a reação *shift* sem a necessidade de catalisadores. Também pode ser aplicada em diferentes tipos de hidrocarbonetos, incluindo combustíveis pesados e hidrocarbonetos sólidos (menos nobres). Reagem em uma faixa de temperatura que varia entre 1.300 e 1.500°C e em pressões da ordem dos 30 a 100 bar, com liberação de calor. Atualmente a Shell e a Texaco destacam-se na produção de hidrogênio via oxidação parcial (Gupta, 2009).

3. Eletrólise da água: o processo consiste em passar uma corrente elétrica na água, com o uso de eletrodos inertes em meio condutor básico ou ácido. As reações produzidas têm como resultado a decomposição da água em seus elementos constituintes.

4. Gaseificação: esse processo que permite extrair o hidrogênio a partir do carvão mineral. Consiste na decomposição térmica do combustível gasoso, formando-se oxigênio, hidrogênio, vapor de água, monóxido de carbono ou uma mistura destes gases. De uma forma simplista a reação que traduz a gaseificação pode ser expressa por:



Além do carvão mineral, a biomassa e diversos combustíveis líquidos pesados também podem sofrer gaseificação, fornecendo como produto o gás hidrogênio.

5. Processos biológicos: com esta tecnologia alguns micróbios fotossintéticos produzem H_2 em suas atividades metabólicas, mediante o uso da energia luminosa. A desvantagem desses processos é que ainda não chegaram a uma etapa industrial de produção e seu rendimento é

muito baixo. Entretanto, tem como vantagem, ser um método de produção de H_2 considerado totalmente limpo (Longo *et al.*, 2008)

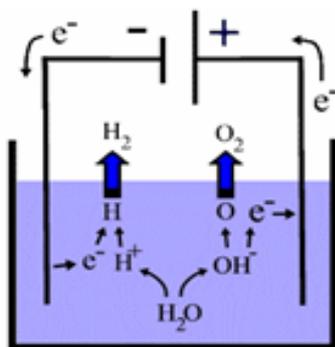
Analisando todos os processos anteriormente descritos, segundo Kordesch e Simader (2006) a geração de hidrogênio que apresenta melhores características para a implementação no uso em motores de combustão interna é o processo de eletrólise da água, o qual será mais detalhado a seguir.

4.4.4 Eletrólise da água

A eletrólise é um método utilizado na obtenção de reações de oxirredução. Em soluções eletrolíticas, este processo se baseia na passagem de uma corrente elétrica através de um sistema líquido que contenham íons presentes, gerando assim, reações químicas.

Com esse processo eletroquímico de dissociação, os produtos finais das reações desencadeadas são hidrogênio e oxigênio moleculares, e o balanço mássico destas reações acusa somente a decomposição da água. Quando se aplicada uma força eletromotriz acima de um determinado potencial mínimo, há passagem de corrente elétrica entre os eletrodos, desencadeando as reações eletrolíticas. Os elementos resultantes desse processo serão o gás hidrogênio e oxigênio. A Figura 4.5 ilustra de forma simplificada a passagem da corrente elétrica e a decomposição da água em gás H_2 e O_2 .

Figura 4.5 - Eletrólise da água



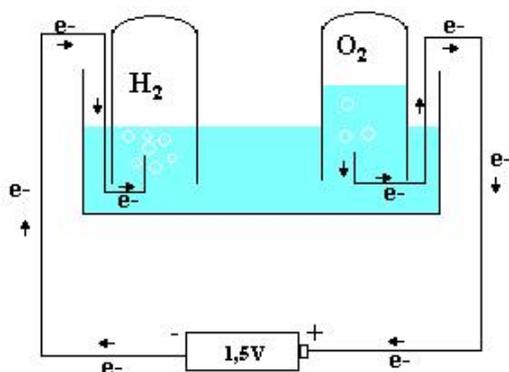
Fonte: adaptado de Doe, 2012

A reação de decomposição de água para se obter hidrogênio e gás oxigênio não ocorre espontaneamente, mas se faz necessário aplicar uma energia correspondente à mudança na energia livre de Gibbs. Em condições normais, o valor corresponde a $474,4 \text{ kJ} / \text{kmol}$ (Boyce,

2013). Para vencer essa energia, aplica-se um potencial elétrico à célula eletrolítica, utilizando geralmente uma bateria.

Na Figura 4.6, observa-se o esquema de um sistema eletrolítico básico. Ele compreende uma fonte de energia responsável por gerar a corrente elétrica entre os eletrodos (ânodo e cátodo) e uma solução contendo eletrólitos dissolvidos, que aumentam a condutividade elétrica da água. Assim, a partir do potencial elétrico aplicado, um fluxo de elétrons é gerado a partir do ânodo para o cátodo, passando pela solução, quebrando a molécula de água, formando com isso o gás hidrogênio e oxigênio.

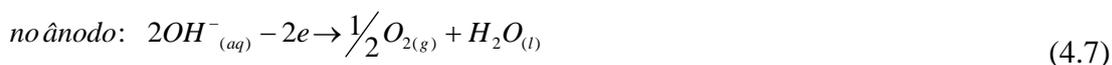
Figura 4.6 - Sistema de uma célula eletrolítica básica



Fonte: adaptado de Doe, 2012

No caso da eletrólise da água, geralmente é adicionado uma base que atua como um eletrólito, que aumenta condutividade elétrica, criando um ambiente favorável à ocorrência da reação.

As equações (4.6), (4.7) e (4.8) apresentam as reações que ocorrem com a água e o eletrólito na célula (Souza *et al.*, 2010):



Gás de Brown, gás hidróxi ou gás HHO são nomes dados ao gás hidrogênio e oxigênio, produzidos juntos em por uma célula eletrolítica. A mistura estequiométrica é relacionada com a da água. O gás HHO foi produzido e patenteado pelo professor Yull Brown em 1977 com a

finalidade de demonstrar a possibilidade de produzir calor através da queima do gás, proveniente da quebra da molécula de água (Al-Rousan, 2010).

O gás HHO é formado por H_2 e O_2 separados por moléculas distintas, em seu estado monoatômico (um único átomo por molécula) gerado pelo processo de eletrólise da água, com uso de uma célula eletrolítica. Os elementos mais usados para aumentar a condutividade da água são o NaOH, KOH ou aditivos como o NaCl (Yilmaz *et al.*, 2010a).

Existem basicamente dois tipos de células eletrolíticas usadas para produzir o gás HHO, as chamadas células secas e as células úmidas. As células secas são mais fáceis de manipular e desenhar (Figura 4.7). A água encontra-se no interior da célula, separada por placas com anéis de retenção, que evitam que escape e entre em contato com os bornes de alimentação. A célula seca permite a utilização de menor quantidade de eletrólito, refletindo na redução do peso e volume final do equipamento.

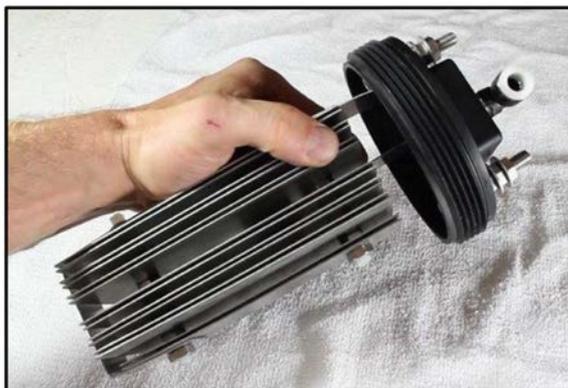
As células úmidas (Figura 4.8), caracterizam-se pelo fato de estarem submersas na solução eletrolítica dentro de um recipiente qualquer. Esse modelo é pouco eficiente, pois traz várias desvantagens na operação, como por exemplo: o oxigênio produzido começa a reagir com a superfície do metal, causando oxidação no ânodo, e o calor gerado nessa reação não consegue ser dissipado e acaba produzindo vapor que é misturado com o gás HHO.

Figura 4.7 - Célula geradora seca



Fonte: autoria própria.

Figura 4.8 - Célula geradora úmida



Fonte: mad-scienc (adaptado)

O desempenho e a eficiência de uma célula eletrolítica dependem da boa atividade eletrocatalítica e da estabilidade dos eletrodos. Outros parâmetros importantes são: a geometria da célula, a separação entre os eletrodos, a forma destes e o desenho das tubulações de saída dos gases. Em resumo, o projeto de engenharia de um dispositivo desta natureza exerce grande influência em seu desempenho e o correto funcionamento depende também dos reativos (água, eletrólito e metal dos eletrodos) utilizados no processo químico da eletrólise (Boyce, 2013).

E por fim, de acordo com as propriedades físico-químicas do hidrogênio, há alguns cuidados que devem ser seguidos, principalmente em relação à segurança. Também é importante ressaltar as características que imprimem ao hidrogênio algumas vantagens, entre elas:

- A devido à sua baixa densidade. O hidrogênio é altamente volátil, de modo que tende a se expandir a alta velocidade, evitando a formação de elevadas concentrações. Isso o torna um combustível seguro, especialmente quando se trabalha em espaços abertos;
- O hidrogênio não é tóxico, e os produtos de sua combustão não geram grandes riscos à saúde humana, comparada a toxicidade de outros combustíveis;
- O hidrogênio tem baixa densidade de energia por unidade de volume, de modo que a energia libertada pela combustão de um determinado volume de hidrogênio a certa pressão é menor do que a de outros combustíveis (esta propriedade que dificulta o armazenamento de hidrogênio é uma vantagem do ponto de vista da segurança).
- A elevada temperatura de combustão espontânea do hidrogênio é outra vantagem adicional.

Entre as desvantagens mencionam-se:

- A alta densidade energética por unidade de massa, que o torna um excelente combustível. Entretanto é uma desvantagem em termos de segurança, devido ao risco de explosão.
- O hidrogênio possui uma energia de ativação muito baixa em comparação a outros combustíveis, ou seja, deve-se adicionar pouca energia a uma mistura potencialmente inflamável para início da combustão. Esta é uma grande vantagem em processos de combustão e em processos eletroquímicos, mas torna-se uma enorme desvantagem do ponto de vista da segurança, porque qualquer faísca pode provocar uma reação indesejada.
- Sua baixa temperatura de liquefação complica nos aspectos de armazenamento e de uso do hidrogênio líquido.
- O fato do hidrogênio ser um gás invisível e inodoro, o vazamento em instalações é indetectável aos sentidos, sendo indispensável o uso de equipamentos para a sua detecção.
- Como o hidrogênio tem alta inflamabilidade e grandes faixas de detonação, é mais perigoso do que outros combustíveis ou misturas de combustíveis.

Devido a essas propriedades mencionadas acima, pode-se concluir que o hidrogênio oferece mais riscos em seu manuseio e uso do que outros combustíveis, principalmente ao se trabalhar em espaços confinados que possam produzir acumulações do gás potencialmente perigosas.

4.5 USO DE HIDROGÊNIO EM MOTORES CONSUMINDO ÓLEO DIESEL

A busca por aumento de eficiência e desempenho em motores de ignição por compressão, tem levado pesquisadores a desenvolver diversas metodologias para alcançar esses objetivos. Entre elas está o uso de hidrogênio como combustível auxiliar para melhorar o processo de combustão. O hidrogênio é um combustível limpo, renovável e reciclável e seu uso como combustível permite reduzir as emissões de gases poluidores por não conter carbono em sua composição (o produto da combustão é vapor d'água), melhorando substancialmente a qualidade do ar (Karagöz *et al.*, 2016).

Para utilizar o hidrogênio em motores é preciso introduzi-lo até a região de combustão (interior do cilindro) e conforme Köse (2013) e Rocha (2016) existem três formas de adicioná-lo no motor: por injeção direta na câmara de combustão, por injeção contínua e por injeção controlada, ambas no coletor de ar de admissão do motor.

O método de injeção direta de hidrogênio na câmara de combustão do motor é o que apresenta melhores resultados Köse *et al.*, (2013). Entretanto o projeto de construção e instalação do injetor é complexo, pois deve ser capaz de injetar o hidrogênio a elevada pressão. Além disso, o material do qual é constituído, deve suportar elevadas temperaturas. E para a sua adequada instalação, devem ser realizadas modificações no cabeçote do motor.

O método de injeção contínua de hidrogênio no coletor de ar de admissão do motor é o mais simples de ser implementado. Porém ao utilizá-lo, é indispensável o uso de dispositivos corta chama, que evitam risco de explosão caso aconteça o retorno da chama (*backfire*). Quando se pretende alcançar melhores resultados, o método de injeção controlada é o mais indicado. Nesse método, é possível controlar a quantidade e o tempo da injeção exata do hidrogênio no momento da abertura da válvula de admissão (Batmaz, 2013); Köse e Ciniviz, 2013). Sua concepção necessita de um projeto de injetor de gás devidamente calibrado e sincronizado com a bomba injetora de combustível do motor. De acordo com Hamdan *et al.*, (2015) os dois métodos contribuem para a redução da eficiência volumétrica do motor.

Na pesquisa realizada por Morais *et al.* (2013), em que se usou a injeção controlada de hidrogênio, o consumo de combustível e a eficiência térmica não sofreram mudanças significativas. Como o hidrogênio melhora o processo de combustão, houve redução nas emissões de monóxido de carbono (CO caracteriza combustão incompleta) e nas emissões de dióxido de carbono, alcançando valores de até 12%.

No trabalho apresentado por Deb *et al.*, 2015, mostrou-se que utilizando a injeção controlada de hidrogênio, as emissões de dióxido de carbono, monóxido de carbono e hidrocarbonetos não queimados foram reduzidas, assim como o consumo específico de combustível. As emissões de NO_x cresceram em função do aumento da temperatura, provocada pela aceleração da combustão durante a queima do hidrogênio.

Karagöz *et al.* (2016), encontraram reduções nas emissões de CO, CO₂ e HC e aumento nas emissões de NO_x, ao utilizarem o método de injeção controlada. Os resultados mostraram que houve aumento do consumo específico de combustível, fato que foi associado à redução da eficiência volumétrica do motor, causada pela injeção do hidrogênio no coletor de admissão de ar.

Quando se utilizam motores diesel funcionando a baixas cargas, a injeção contínua de hidrogênio aumenta o consumo específico de combustível Morsy *et al.* (2015). Essa situação é modificada quando se eleva a carga para valores acima de 50% da potência nominal. Os autores também afirmam que aumentando a carga e o teor de hidrogênio injetado, o processo de

combustão melhora significativamente, alcançando valores maiores no pico de pressão e na taxa de liberação de calor.

Zhou *et al*, (2015) apresentaram resultados em relação ao material particulado (MP), mostrando que o aumento no teor de hidrogênio provoca redução do tamanho da partícula e da massa do MP. A adição de hidrogênio aumenta a temperatura no interior do cilindro, favorecendo a oxidação das partículas de fuligem oriundas da combustão do óleo diesel, com redução em seus diâmetros médios.

Os estudos citados anteriormente mostram que a quantidade e a forma como hidrogênio é injetado podem melhorar ou comprometer o desempenho dos motores diesel, quando funcionando com óleo diesel puro. Entretanto, ainda há poucas pesquisas que retratam o funcionamento dos motores com injeção de hidrogênio, principalmente quando se utilizam outros combustíveis, como o biodiesel, óleos vegetais ou misturas destes com óleo diesel.

4.5.1 Experiências realizadas utilizando gás HHO em motores de Combustão Interna.

Identificado que o uso do hidrogênio melhora o desempenho dos motores de ignição por compressão, foi necessário identificar o método mais adequado para a sua produção. Entre os métodos apresentados, optou-se pela eletrólise da água via célula eletrolítica. Para o desenvolvimento dos ensaios experimentais no motor, buscou-se na literatura trabalhos relacionados ao uso do hidrogênio, produzido via eletrólise da água, em motores de combustão interna. Ressaltando-se, que para ser considerado um combustível limpo o hidrogênio deve ser produzido a partir de uma fonte renovável de energia, tornando-se assim um método mitigatório do uso de combustíveis fósseis.

Entre os trabalhos que utilizaram o gás HHO para melhorar o desempenho dos motores, tem-se o desenvolvido por Musmar e Al-Rousan (2011). Eles desenvolveram um sistema de geração de gás HHO que foi conectado diretamente ao motor. Foram testados dois tipos de células eletrolíticas (tipo B e C) de HHO que injetavam o gás em um motor monocilíndrico de 197cc (Honda G 200). A célula foi construída com placas quadradas (de aço inoxidável 316L) e um eletrodo em espiral, todos eles, alocados dentro de uma caixa de acrílico com os acessórios e tubulações necessárias. A célula utilizava água destilada e bicarbonato de sódio como eletrólito. Esta célula foi projetada e construída nos laboratórios da Universidade de Mutah com uma capacidade volumétrica de 6 litros. O gás HHO produzido foi injetado diretamente no filtro de ar do motor, a fim de estimular e queima. Obtiveram como resultado o aumento na eficiência

térmica em cerca de 3% para a célula B e de 8% para a célula C. Houve também redução do consumo específico de combustível quando o motor funcionou com o gás produzido pela célula.

No estudo realizado por Yilmaz *et al.* (2010b), o gás HHO foi produzido pelo processo de eletrólise, usando diferentes eletrólitos (KOH, NaOH, NaCl) e vários projetos de eletrodos em modelo de reator em acrílico. O gás hidróxi foi usado como um combustível suplementar, num motor de quatro cilindros, quatro tempos, de ignição por compressão (ciclo diesel), sem qualquer modificação. Seus efeitos sobre as emissões dos gases de escape e as características do desempenho do motor foram investigadas. As experiências mostraram que com uma taxa de fluxo constante de HHO, em baixas rotações (abaixo da rotação crítica), provocou-se diminuição no torque do motor, nas emissões de monóxido de carbono (CO) e de hidrocarbonetos (HC) e no aumento no consumo específico de combustível. Esses resultados ocorreram devido ao acúmulo de gás HHO no interior dos cilindros, o que reduziu a quantidade de ar admitido pelo motor, resultando na diminuição da eficiência volumétrica. Dentre todos os eletrólitos que foram testados, o que apresentou melhor resultado foi NaOH. Quando o motor trabalhou a rotações elevadas, observou-se que a introdução de gás HHO resultou num aumento de 19,1% na produção de potência ao torque do motor, na redução de 13,5% nas emissões de CO, de 5% nas emissões de HC e em torno de 14% no consumo específico de combustível.

No trabalho realizado por Rajaram *et al.* (2014), foi verificada a influência da adição de oxigênio enriquecido com gás HHO num motor diesel de injeção direta. Os principais parâmetros analisados foram: a eficiência térmica ao freio e emissões. Nos ensaios o oxigênio foi enriquecido com gás de hidrogênio (HHO), produzido pelo processo de eletrólise da água. A mistura gasosa foi aspirada para dentro do cilindro, juntamente com o ar de admissão, a taxas de 1 l/min e 3,3 l/min. Os resultados mostraram que introduzindo o gás HHO, a eficiência térmica ao freio do motor teve aumento de 11,06%, o monóxido de carbono diminuiu 15,38%, os hidrocarbonetos não queimados diminuíram em 18,18% e o dióxido de carbono aumentou em 6,06%. No entanto, as emissões de NOx aumentaram em 11,19%.

No trabalho de Le Anh *et al.* (2013), o gás HHO foi produzido pelo processo da eletrólise da água destilada e armazenado em um tanque de alta pressão antes de ser injetado no coletor de admissão do motor. O estudo experimental foi realizado em um motor de 97 cc de ignição por centelha, equipado com dois sistemas de injeção (gás HHO e injeção de ar) no coletor de admissão.

Os testes foram divididos em três estudos de caso:

Caso 1: Funcionamento do motor sem nenhuma modificação ou adaptação.

Caso 2: Funcionamento do motor com gasolina e injeção de HHO

Caso 3: Funcionamento do motor com gasolina, injeção de HHO e injeção de ar, a partir de uma segunda injeção após o carburador.

Os experimentos mostraram que, em ambas as situações, em comparação com o funcionamento do motor sem nenhuma adaptação, o desempenho melhorou e o consumo de combustível (gasolina) foi reduzido depois da introdução de gás HHO. Houve aumento nas emissões de NOx e redução nas emissões de HC não queimados. As emissões de CO e CO₂ apresentaram comportamentos diferentes entre os dois casos. Quando foi injetado unicamente gás HHO, houve redução no fornecimento de ar, e as emissões de CO aumentaram e, conseqüentemente as emissões de CO₂ reduziram.

Em sua pesquisa, Sur *et al.* (2014) verificou as mudanças na utilização do gás HHO em um motor monocilíndrico de motocicleta. O motor possuía potência nominal de 5.4kw, rotação de 8000 rpm e taxa de compressão 8,8:1. Os resultados mostraram que houve redução no consumo específico de combustível pela adição de gás HHO, possibilitando ao veículo, percorrer maiores distâncias comparadas ao funcionamento utilizando apenas gasolina como combustível. Além disso, verificou-se também a redução nas emissões de CO, caracterizando maior eficiência na combustão. O autor afirma que usando o gás HHO como aditivo houve melhora no desempenho do motor e redução nas emissões dos gases de escape.

Conforme os trabalhos analisados, a produção de gás HHO por meio de eletrólise da água representa uma alternativa eficiente para a redução do consumo de combustível em motores de combustão interna. Todos os trabalhos mostraram um aumento na eficiência e redução do consumo de combustível, quando usado o gás HHO injetado no ar de admissão. Entretanto, ainda existem problemas importantes a serem resolvidos, como a redução da eficiência volumétrica do motor devido à introdução do gás HHO. Atualmente, diversas pesquisas são realizadas para encontrar soluções para melhorar os resultados com o uso das células eletrolíticas.

Diante deste cenário, propõe-se com base na literatura, a construção de uma célula eletrolítica para produzir o gás HHO e utilizá-lo, injetando-o no tubo de admissão de ar de um grupo gerador a diesel, utilizando como combustível mistura de biodiesel B7 e óleo de palma *in natura* na proporção 80% B7 e 20% óleo vegetal. Com essa metodologia, avaliar o impacto dessa mistura e da adição de gás HHO no consumo específico de combustível e emissões. Verificar a viabilidade técnica dessa metodologia, quando utilizada em grupo gerador diesel para suprimento de energia elétrica em usinas pertencentes aos sistemas isolados.

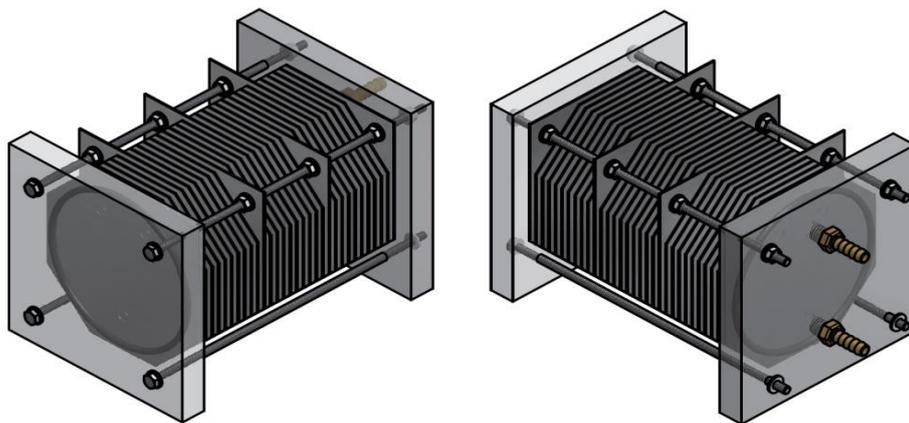
5. METODOLOGIA

O desenvolvimento do trabalho seguiu por algumas etapas importantes até a sua conclusão. Entre elas está o projeto e construção da célula eletrolítica; identificação do óleo vegetal a ser usado nas misturas de 20% óleo vegetal e 80% óleo B7 (que chamaremos de V20); instrumentação da bancada experimental para realização dos ensaios e aquisição dos dados de funcionamento do grupo gerador; testes operando com B7 e misturas V20 utilizando o gás HHO gerado pela célula e a avaliação dos resultados com perspectiva de aplicação em uma usina térmica do sistema isolado do Estado do Pará.

5.1 CONSTRUÇÃO DA CÉLULA.

A primeira parte da pesquisa consiste na construção da célula eletrolítica para a produção do gás HHO. Com base em informações obtidas na literatura a célula foi conformada por chapas de aço inoxidável 316L com espessura de 1 mm para obter maior resistência à corrosão, lâminas de acrílico e anéis de vedação como se mostra na Figura 5.1.

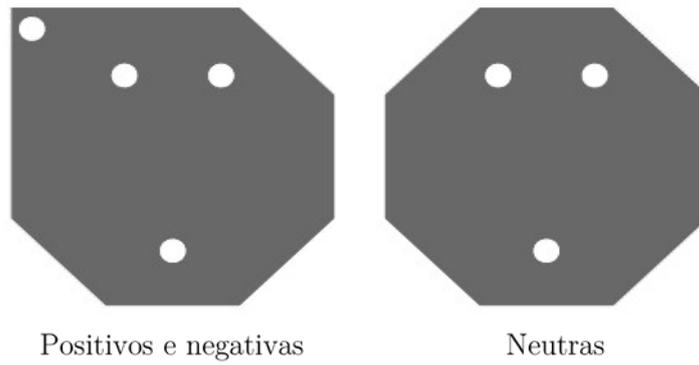
Figura 5.1 - Projeto da célula eletrolítica



Fonte: autoria própria.

A melhor solução encontrada para o formato das lâminas que conformam a célula é apresentada na Figura 5.2. Como se observa, as chapas apresentam diversos furos utilizados para fixação e alimentação da carga elétrica, circulação do eletrólito e circulação do gás produzido:

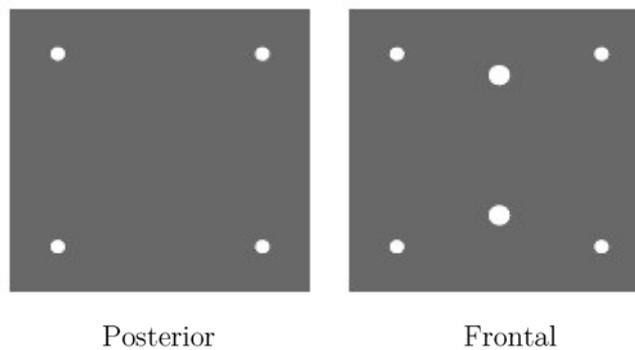
Figura 5.2 - Lâminas de aço inoxidável



Fonte: autoria própria.

Foram usadas lâminas de acrílico transparente (Figura 5.3) para controle de nível qualidade do eletrólito, e para estrutura de suporte e isolamento elétrico.

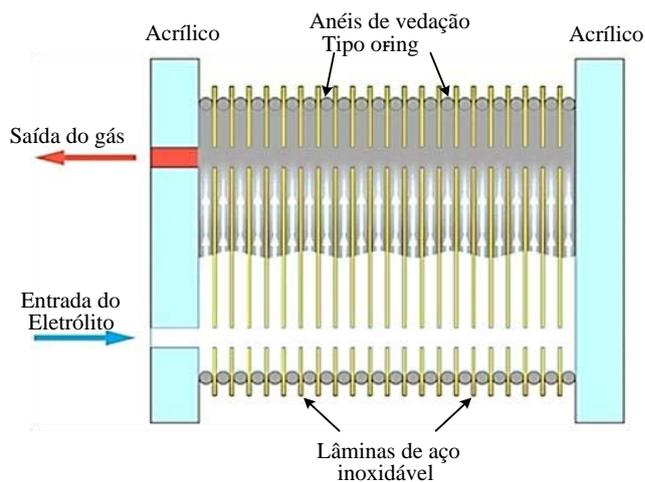
Figura 5.3 - Laminas de acrílico



Fonte: autoria própria.

Foram utilizados anéis de vedação do tipo O-ring para separação das lâminas, retenção do eletrólito e evitar vazamentos do gás como apresentado na Figura 5.4.

Figura 5.4 - Forma construtiva da célula HHO



Fonte: autoria própria.

Finalmente para fixação de todos os elementos (lâminas de aço inoxidável, anéis de vedação e lâminas de acrílico) foram fixados parafusos nas lâminas de aço inoxidável por meio de porcas nos locais onde se deseja circular uma carga elétrica na lâmina (ver Figura 5.4).

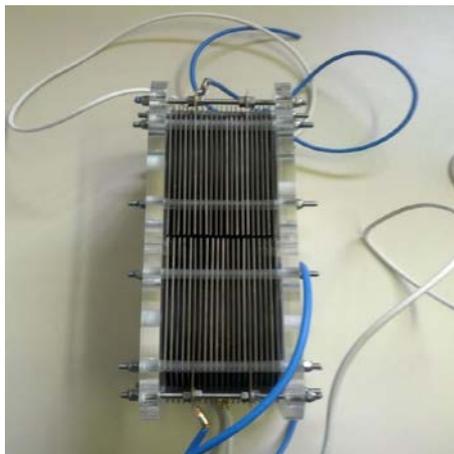
A bancada experimental foi composta por uma célula eletrolítica, um borbulhador, uma válvula corta fogo e uma bateria de 12V CC que pode ser a mesma usada para dar partida ao motor. O gás HHO produzido foi injetado diretamente no coletor de admissão do motor em diversas quantidades e variadas de acordo com a corrente elétrica utilizada na célula a fim de reduzir o consumo de combustível B7.

5.2 MONTAGEM DA CÉLULA

A segunda etapa foi a aquisição e a montagem da célula de acordo com as características encontradas na literatura.

Na montagem do corpo da célula, foram fixadas placas de aço inox 316 L, com seus respectivos parafusos e sistema de vedação, *vide* Figura 5.5.

Figura 5.5 - Célula eletrolítica para a produção de gás HHO

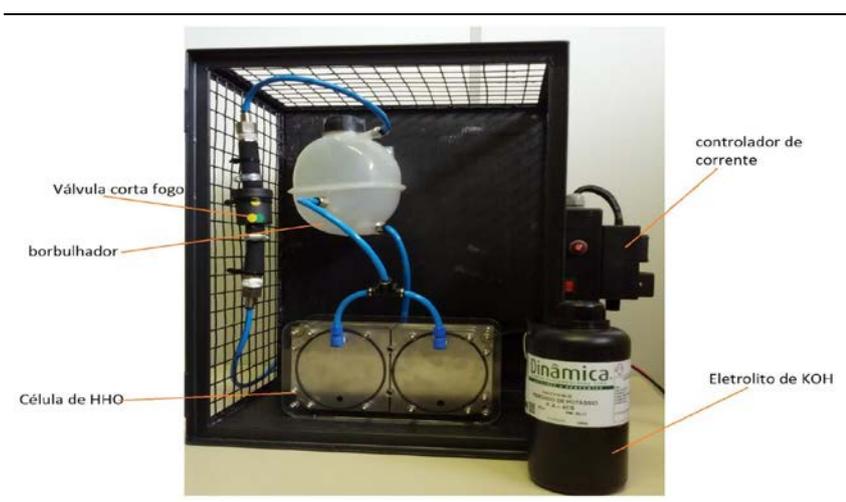


Fonte: autoria própria.

Efetuiu-se a aquisição do tanque para armazenamento da solução de KOH (eletrólito) e dos demais acessórios necessários para funcionamento adequado da célula (conexões para as mangueiras, válvula corta fogo, silicone e cabos elétricos). Após a aquisição iniciou-se a montagem final da célula, fixando todos os acessórios do equipamento em uma caixa metálica que foi construída para acondicioná-los.

A montagem final da célula de gás HHO e seus acessórios instalados são apresentados na Figura 5.6. Nesta figura é possível identificar a válvula corta fogo, o controlador de corrente, o borbulhador que irá conter o eletrólito, a célula e os acessórios.

Figura 5.6 - Kit da célula de gás HHO



Fonte: autoria própria.

Após a conclusão da montagem do kit da célula HHO no grupo gerador, foram realizados testes de vedação na célula e de produção de gás HHO.

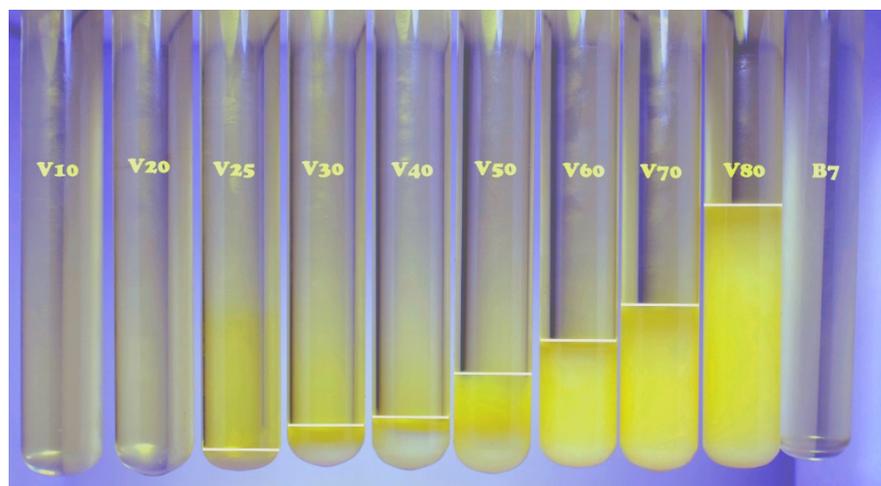
5.3 IDENTIFICAÇÃO DO ÓLEO VEGETAL UTILIZADO NAS MISTURAS V20

Após a pesquisa bibliográfica realizada com a temática do uso de óleos vegetais utilizados como combustíveis, observou-se que três óleos vegetais apresentaram melhores resultados: o óleo de colza, o óleo de alga e o óleo de palma. Entre esses óleos, optou-se pelo uso do óleo de palma, por ser abundante na região e de fácil aquisição.

Quando utilizado como combustível os óleos de alga e de palma comparados a outros óleos vegetais apresentaram melhores resultados em termos de eficiência térmica e desempenho do motor, obtendo ainda menores atrasos de ignição (Hellier *et al* 2015).

Em relação ao percentual de óleo vegetal utilizado nos testes, optou-se por misturas de 20% em volume adicionados ao diesel B7. Antes, efetuaram-se várias misturas utilizando diversos percentuais de óleo vegetal de palma ao diesel B7 (Figura 5.7), deixando-as armazenadas em temperatura ambiente por um período de trinta dias para avaliar sua miscibilidade e estabilidade.

Figura 5.7 - Estabilidade das diferentes misturas diesel e óleo vegetal



Fonte: autoria própria

Na análise dos resultados constatou-se que, de fato, a mistura de 20% óleo de palma e 80% diesel foi a que apresentou melhor resultado. Observou-se ainda que para valores acima de

25% de óleo de palma, a mistura começou a separar-se em fases, com cristalização do óleo vegetal e deposição no fundo do tubo de ensaio.

5.4 APARATO EXPERIMENTAL

Para a realização dos testes utilizando o kit HHO e as misturas diesel/óleo vegetal, foi montada uma bancada de teste composta por um grupo gerador diesel, instrumentos de medição (termopares, balança digital, anemômetro, analisadores de gases e medidor de grandezas elétricas) e sistema de aquisição de dados. Para cada ensaio foram avaliados os seguintes parâmetros:

- Vazão volumétrica e mássica de combustível;
- Potência elétrica;
- Emissões dos gases de escape;
- Temperatura dos gases de escape e do motor.

Para a realização dos testes utilizou-se um grupo gerador com motor monocilíndrico da marca BRANCO BD-6500 CF3E de quatro tempos, resfriado a ar e injeção direta de combustível. As especificações gerais do grupo gerador encontram-se na Tabela 5.1. O gerador está ligado a um banco de resistências de 5kW que é utilizado para variar a carga elétrica. Para os testes, utilizou-se uma potência de 60% da carga nominal do grupo gerador. Conforme RIBEIRO, (2016) grande parte das usinas dielelétricas operam com despacho de potência na faixa de 60 a 80% do seu valor máximo.

Tabela 5.1 - Parâmetros do grupo gerador

Parâmetro	
Fabricante	Branco
Modelo	BD-6500
Motor:	
Aspiração	Natural
Injeção de combustível	Direta
Ângulo de injeção de combustível	16° APMS
Refrigeração	Ar induzido
Número de cilindros	1
Diâmetro [mm] × Curso [mm]	86 × 70
Cilindrada [cm ³]	406
Razão de compressão [-]	19:1
Rotação [rpm]	3600

Gerador:

Frequência elétrica [Hz]	60
Tensão [V]	220
Número de fases	2
Eficiência [%]	85,0
Potência nominal máxima (<i>prime</i>) [kW]	4,0
Potência nominal máxima (<i>stand-by</i>) [kW]	4,5

Fonte: Manual do equipamento

Para o monitoramento e aquisição das grandezas elétricas foi utilizado o equipamento SAGA 4500 da empresa Landis+Gyr. Com ele é possível medir corrente elétrica, potência ativa e reativa, fator de potência e tensão elétrica. O equipamento é mostrado na Figura 5.8.

Figura 5.8 - Analisador Saga 4500



Fonte: autoria própria.

Com este medidor é possível avaliar e registrar sistemas elétricos monofásicos ou trifásicos, equilibrados ou não. Com uma exatidão do conjunto (analisador + sensores) de 1%.

Todos os valores medidos pelo analisador SAGA 4500 são enviados a um computador onde conjuntamente com seu próprio programa de monitoramento é possível visualizar e armazenar em tempo real as grandezas elétricas medidas e monitorar o comportamento do gerador.

Para o monitoramento da vazão mássica de combustível consumida pelo motor utilizou-se uma balança digital de precisão. A Tabela 5.2 apresenta informações deste equipamento.

Tabela 5.2 - Características da balança digital de precisão

Parâmetros	
Fabricante	DIGIMED
Modelo	DG-15WT
Capacidade	15 kg
Resolução	0,1 g
Reprodutibilidade	± 0,2 g
Linearidade	± 0,2 g
Saída digital	RS232

Fonte: Manual do equipamento

De posse das informações da vazão mássica de combustível e da potência elétrica gerada, calculou-se o consumo específico de combustível (C_{spc}) como mostra a equação 5.1. O consumo específico de combustível é um dos principais parâmetros utilizados para comparar o desempenho de grupo geradores.

$$C_{spc} = \frac{\dot{m}_{B7}}{P_{el}} \quad (5.1)$$

Para monitorar a temperatura dos gases de exaustão, do combustível injetado e do ar de admissão foram instalados termopares tipo K. Na medição dos gases de exaustão foi realizado um furo na saída do pleno do motor para a fixação do termopar, com o intuito de medir a temperatura o mais próximo possível do cilindro. Na Tabela 5.3 observa-se algumas características dos termopares utilizados.

Tabela 5.3 - características dos termopares

Parâmetros	
Fabricante	OMEGA
Modelo	TJ-CASS-14U
Tipo de termopar	K
Material da bainha	Aço inox 304
Junção	Isolada
Precisão (T_{ar} e T_{comb})	± 0,5 °C
Precisão (T_{gases})	± 1,0 °C

Fonte: Manual do equipamento

Para a medição dos gases de exaustão foi utilizado o analisador de gases Greeline 8000. Com ele é possível medir as emissões de CO, CO₂, O₂, NO₂, NO e HC. A coleta de dados foi

realizada a cada um minuto durante o tempo de cada ensaio, utilizando diesel puro e a mistura com óleo vegetal. Na Tabela 5.4 observam-se algumas características do equipamento.

Tabela 5.4 - Características do analisador de gases

Parâmetro	
Fabricante	EUROTRON
Modelo	Greenline 8000
Precisão do sensor O ₂ (Eletroquímico)	± 0,1%
Precisão do sensor CO ₂ (NDIR)	± 0,3%
Precisão do sensor CO (NDIR)	± 3% da leitura
Precisão do sensor NO (Eletroquímico)	± 5 ppm
Precisão do sensor NO ₂	± 5 ppm
Precisão do sensor HC (NDIR)	±4% da leitura

Fonte: Manual do equipamento

Para medir a vazão mássica de gás HHO produzido pela célula de hidrogênio foi utilizado um rotâmetro da marca Omega. Suas principais características de funcionamento são observadas na Tabela 5.5. O gás produzido pela célula foi introduzido de forma no coletor de admissão de ar.

Tabela 5.5 - Características do rotâmetro.

Parâmetros	
Fabricante	OMEGA
Modelo	FLDH3304ST
Máxima pressão de operação	13,8 bar
Faixa de medição da velocidade	0,3 a 42 l/min
Precisão da temperatura	± 0,3 l/min

Fonte: Manual do equipamento

Para medir a vazão mássica de ar do motor utilizou-se um anemômetro tipo turbina instalado em um mangote que foi conectado ao air box (câmara de expansão). O air box ou câmara de expansão é utilizado para evitar as flutuações do ar devido a abertura e fechamento das válvulas, mantendo em seu interior uma pressão aproximadamente constante. A característica principal do air box é que ele deve conter um volume de ar superior a 500 vezes o volume da cilindrada do motor. O utilizado nos ensaios possuía um volume de 200l, representando em torno de 500 vezes a cilindrada do motor utilizado nos testes.

Tabela 5.6 - Características do anemômetro

Parâmetros	
Fabricante	KIMO
Modelo	AMI 300
Diâmetro da sonda	70 mm
Faixa de medição da velocidade	0,3 a 35 m/s
Faixa de medição da temperatura	-20 a 80 °C
Resolução da velocidade	0,01 m/s
Resolução da temperatura	0,1 °C
Precisão da velocidade	3% ± 0,1m/s
Precisão da temperatura	0,4% ± 0,3°C

Fonte: Manual do equipamento

Para o registro e monitoramento de todos os equipamentos de medição como termopares, balança digital, anemômetros, entre outros, as variáveis foram concentradas no Aquisitor de dados da marca COMTEMP, modelo A202 (Figura 5.8). Esses dados são convertidos para o formato digital e enviados ao computador para o monitoramento em tempo real.

Figura 5.9 - Aquisitor de dados



Fonte: Manual do equipamento

Para a interface entre o computador e barramento de comunicação do Aquisitor foi necessária a utilização de um conversor USB-RS485, esse permite a comunicação rápida e segura do Aquisitor com a porta USB do PC detectado e instalado como uma porta COM nativa. As características principais do Aquisitor de dados são apresentadas na Tabela 5.7.

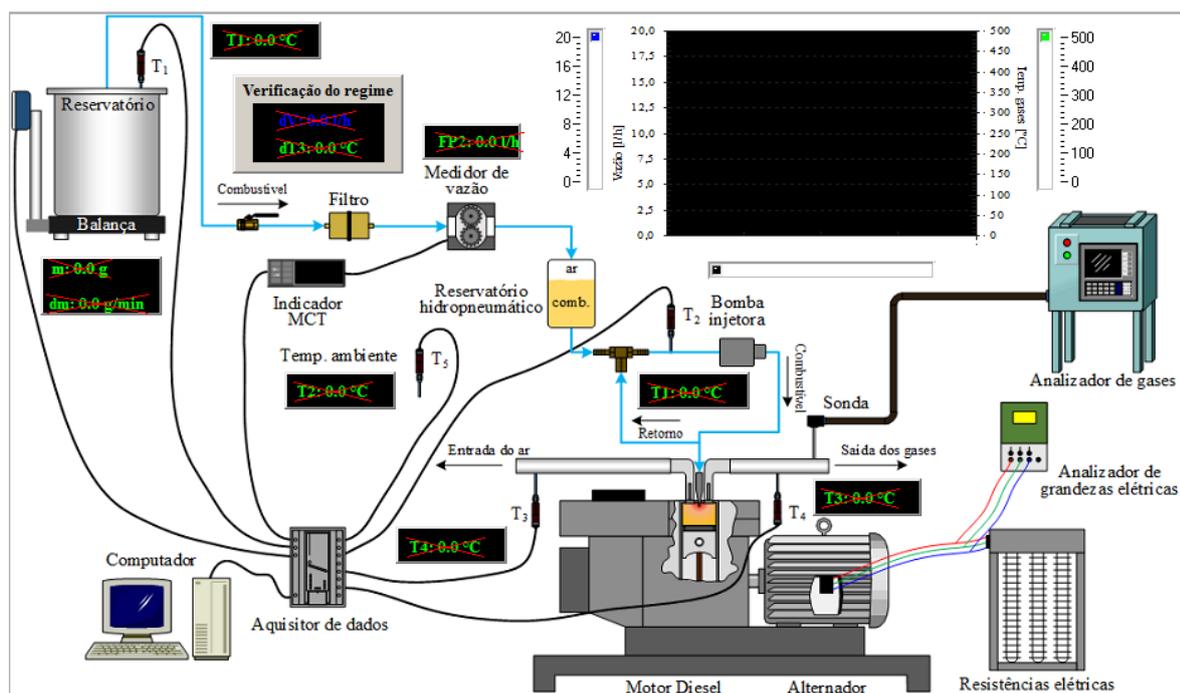
Tabela 5.7 - Características do Aquisitor de dados

ESPECIFICAÇÕES	
Número de entradas	8
Entrada de corrente	0 a 20 [mA]
Exatidão da leitura	$\pm 0,3\%$ F.E. ± 1 dígito a 25°C
Leitura	170 ms / 8 canais
Protocolo	Modbus RTU

Fonte: Manual do equipamento

Para a aquisição e tratamento dos dados encaminhados pelo aquisitor de dados foi necessária a criação de uma ferramenta computacional de supervisão e controle, desenvolvida com a ajuda do programa DAQFactory Pro. V16.2 (Figura 5.10). Com esta ferramenta foi possível supervisionar todos os parâmetros de interesse do grupo gerador.

Figura 5.10 - Visão geral do sistema de monitoramento.



Fonte: autoria própria.

Através do programa é possível monitorar em tempo real todos os valores de temperatura, vazão mássica e volumétrica de combustível e potência elétrica. Todos os dados são salvos automaticamente em formato de planilhas durante os testes. Há uma interface gráfica que

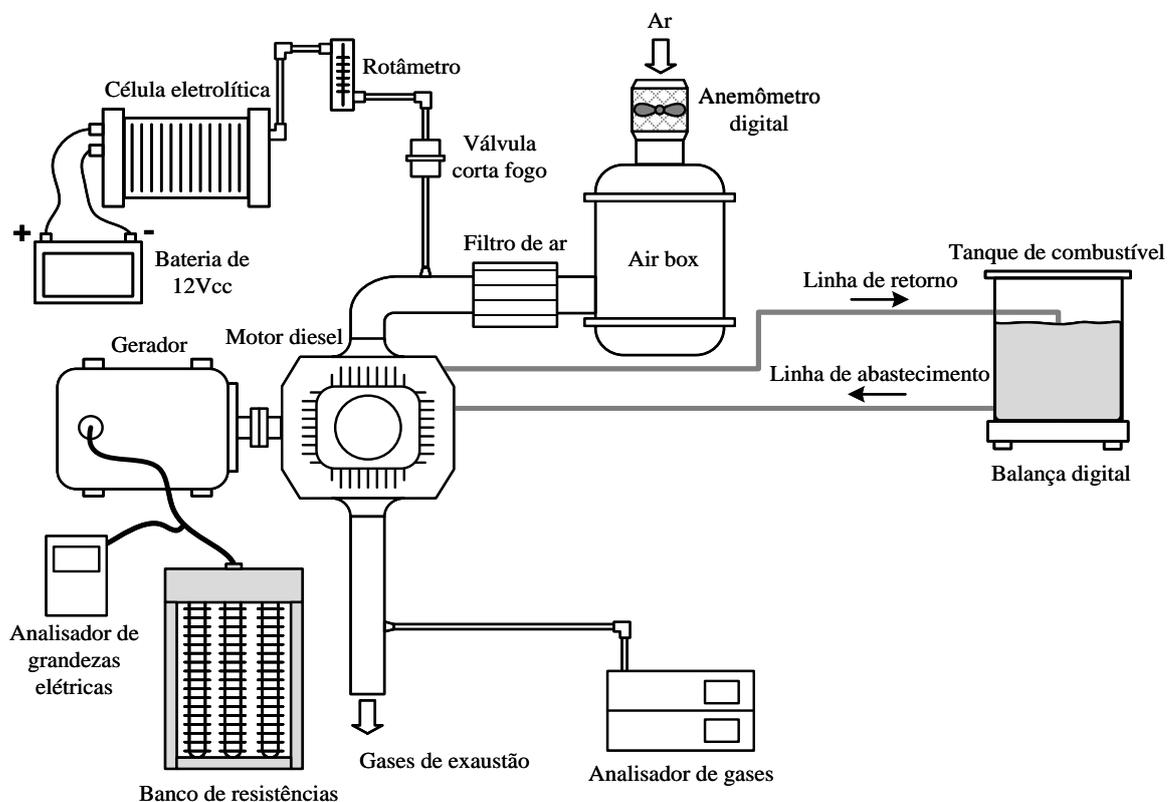
apresenta o comportamento da vazão de combustível e das temperaturas ao longo do tempo durante o período de ensaio, o que possibilita identificar possíveis incoerências nas medições.

Descritos os equipamentos, foram realizados testes no grupo gerador, operando a 60% da carga nominal com misturas diesel/óleo vegetal e adição de gás HHO, como mecanismo de redução do consumo de diesel e inserção de uma fonte renovável na matriz energética local. A utilização dessas misturas poderá beneficiar o Brasil por meio da redução dos custos na produção de biodiesel, além de viabilizar alternativas para a redução no de derivados de petróleo.

5.5 METODOLOGIA DOS TESTES

Inicialmente foi realizado um teste no grupo gerador operando apenas com B7. Em seguida, foram realizadas medições na vazão mássica de combustível, temperaturas, emissões e potência elétrica, para se gerar uma linha base que servirá de comparação para os resultados obtidos com a injeção de gás HHO e as misturas diesel óleo vegetal. A Figura 5.11 apresenta um esquema da bancada experimental, localizada no Laboratório de Motores, na Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará, local onde os ensaios foram realizados.

Figura 5.11 - Bancada experimental



Fonte: autoria própria

Em seguida, foram realizados testes no motor operando com diesel e injeção de gás HHO no ar de admissão do motor.

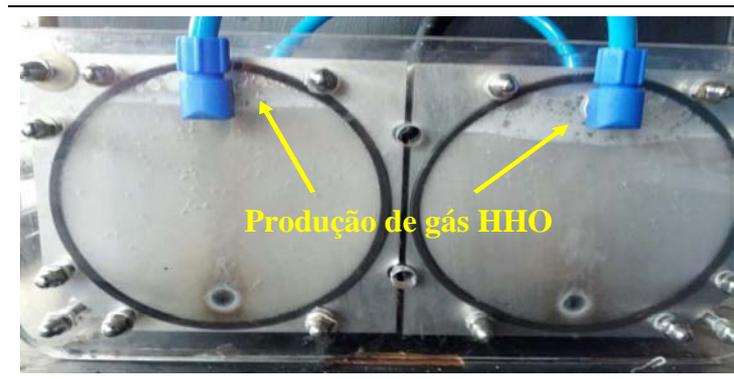
Antes do início dos testes, preparou-se a solução eletrolítica a ser colocada no interior da célula. Essa solução foi composta de 400 g de KOH diluídos em 4 litros de água destilada. Posteriormente, a alimentação elétrica da célula foi ligada aos bornes da bateria do próprio grupo gerador. A célula foi acionada por meio de um botão liga/desliga instalado próximo ao controlador de corrente. Através desse, variou-se a corrente de alimentação e identificou-se que a 30A conseguiu-se a maior vazão de gás. Logo, esse valor passou a ser usado como parâmetro para a realização dos ensaios com o combustível B7 e as misturas V20. E finalmente, utilizou-se um rotâmetro para controlar a vazão de gás a ser injetada no ar de admissão do motor.

O gás HHO gerado foi direcionado até o borbulhador que tem a função de lavar o fluido, seguindo para o filtro seco e a válvula corta fogo, até chegar ao rotâmetro e ao tubo coletor de admissão de ar.

Identificado o valor da corrente de operação, os testes foram iniciados injetando quantidades de gás HHO produzido pela célula em valores de 4, 8,5 e 12 l/min, controladas pelo rotâmetro. Cada valor de vazão de gás foi injetado por um período de teste de duas horas no motor. Para garantir a confiabilidade dos resultados, foram repetidos três ensaios para cada valor de vazão de gás e o resultado final é a média desses ensaios. Durante o funcionamento do motor, coletavam-se as informações de temperatura, consumo de combustível, emissões e potência do grupo gerador em funcionamento para serem comparadas com a linha base de B7.

A Figura 5.12 ilustra a produção de gás HHO pela célula eletrolítica e o seu direcionamento até o borbulhador. As adaptações realizadas no tubo de admissão de ar do grupo gerador são apresentadas na Figura 5.13, identificando principalmente a entrada para a injeção do gás hidrogênio.

Figura 5.12 - Produção de gás HHO



Fonte: autoria própria

Figura 5.13 - Injeção de gás HHO no motor.



Fonte: autoria própria

Os testes com as misturas V20 foram feitos em ensaios que duraram duas horas e os parâmetros de funcionamento do motor foram sendo coletados e armazenados. Após esse período, injetou-se o gás HHO no ar de admissão do motor em diferentes quantidades controladas pelo rotâmetro.

Para todos os testes realizados no grupo gerador, foi utilizada uma carga de 60% da potência nominal (2,43 kW) a uma rotação de 3600 rpm. De forma a garantir a confiabilidade

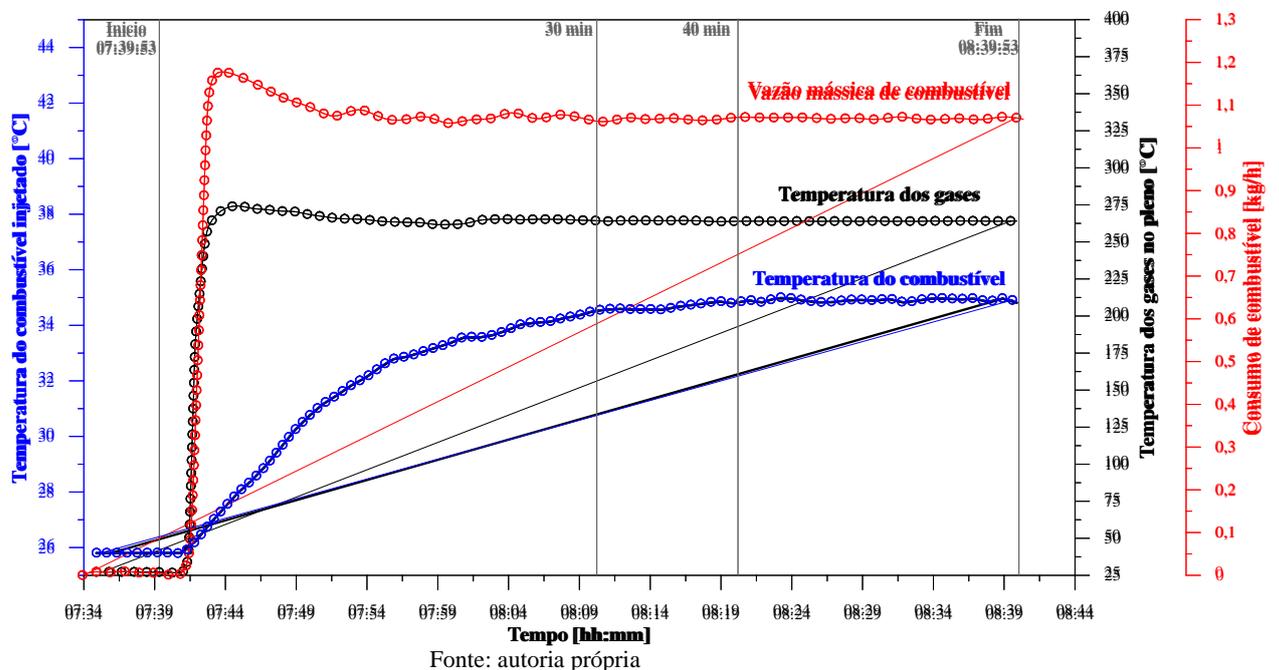
dos testes, os ensaios no grupo gerador foram repetidos três vezes para cada quantidade de gás HHO injetado, utilizando diesel B7 e mistura diesel B7 e óleo vegetal.

5.6 DETERMINAÇÃO DA DURAÇÃO DE CADA ENSAIO

Quando se realiza medição experimental em motores de combustão interna é necessário definir uma metodologia padrão que deve ser repetida para todos os ensaios realizados, a fim de manter as mesmas condições de operação e funcionamento do motor. Neste trabalho, foi preciso determinar o tempo necessário para que o motor entrasse em regime permanente de funcionamento. E para alcançar este estado escolheram-se como parâmetros de monitoramento a temperatura dos gases de escape (T_{gas}), temperatura do combustível (T_{comb}) e a vazão mássica do combustível consumida pelo motor (\dot{m}_{comb}).

Para se determinar qual seria esse tempo a alcançar o regime permanente, foi realizado um teste no motor consumindo B7 a 60% da carga durante uma hora. E, durante esse período, foram coletados os dados de temperatura dos gases e do combustível, bem o consumo de B7, considerando os valores médios a cada 5 minutos, cujos valores são apresentados na Figura 5.14.

Figura 5.14 - Parâmetros avaliados para duração dos ensaios



Observando a Figura 5.14 que apresenta os parâmetros a serem analisados para se alcançar o regime permanente, verificou-se que transcorridos 30 minutos de ensaio a temperatura

dos gases e a vazão mássica de combustível apresentaram uma boa estabilidade. Entretanto a temperatura do combustível continuava subindo. Após os 40 minutos de teste, observou-se a estabilidade das três variáveis analisadas, indicando que o grupo gerador entrou em um regime “quase permanente” a partir desse período.

Os dados foram obtidos com o motor operando em regime permanente e a carga aplicada ao grupo gerador foi produzida por um banco de resistências elétricas, mantendo a potência constante de 2,43 kW (aproximadamente 60% da potência nominal máxima) e a rotação em 3.600 rpm. A incerteza foi calculada aplicando o mesmo método usado por DEB, SASTRY (2015) e os resultados são apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Incertezas médias dos parâmetros medidos e calculados

Parâmetros	Incerteza
Potencia elétrica	±1.0 %
Varição da massa de combustível	±1.3 %
Vazão mássica de ar.	±0.7 %
CO ₂	±0.18 %
CO	±0.32 %
NO _x	±1.08 %
HC	±0.45 %
Temperatura dos gases	±0.4 %
Vazão mássica de B7	±1.39 %
Consumo específico de combustível	±1.92 %

Fonte: autoria própria.

O sucesso dessa pesquisa implicará em uma proposta de redução do consumo específico de combustível, utilizando métodos extrusivos nos motores. Isso permitirá a usina termoelétrica diminuir as perdas com combustível e mitigar subsídios do fundo setorial da CCC, reduzindo ainda a dependência do diesel nesses sistemas isolados, utilizando uma fonte de energia renovável e barata. Essa metodologia poderá ser aplicada a qualquer grupo gerador do país para suprimento de energia elétrica que se encontram em sistema isolado ou no SIN. E ainda há possibilidade de serem usados em motores veiculares.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Um ponto importante para o desenvolvimento do projeto foi identificar as propriedades físico-químicas do óleo diesel B7, do óleo de palma (dendê) e da mistura V20 (B7 e óleo de palma). Na Tabela 5.1, apresentam-se as principais propriedades dos combustíveis utilizados. As análises experimentais desses óleos foram realizadas pelo Laboratório de Caracterização de Combustíveis (LacBio), da Universidade Federal do Pará.

Observando a Tabela 6.1, as propriedades que estão fora dos limites estabelecidos na norma DIN 51605:2010 são o índice de iodo e o número de cetano. Entretanto, observa-se que ainda assim esses valores estão próximos dos estabelecidos pela norma. Considerando que a norma sugere esses limites para a utilização de óleo vegetal puro em motores diesel, o uso de misturas de óleos vegetais com diesel pode melhorar suas propriedades passando a adequar-se à norma.

Tabela 6.1 - Propriedades físicas e químicas dos combustíveis utilizados

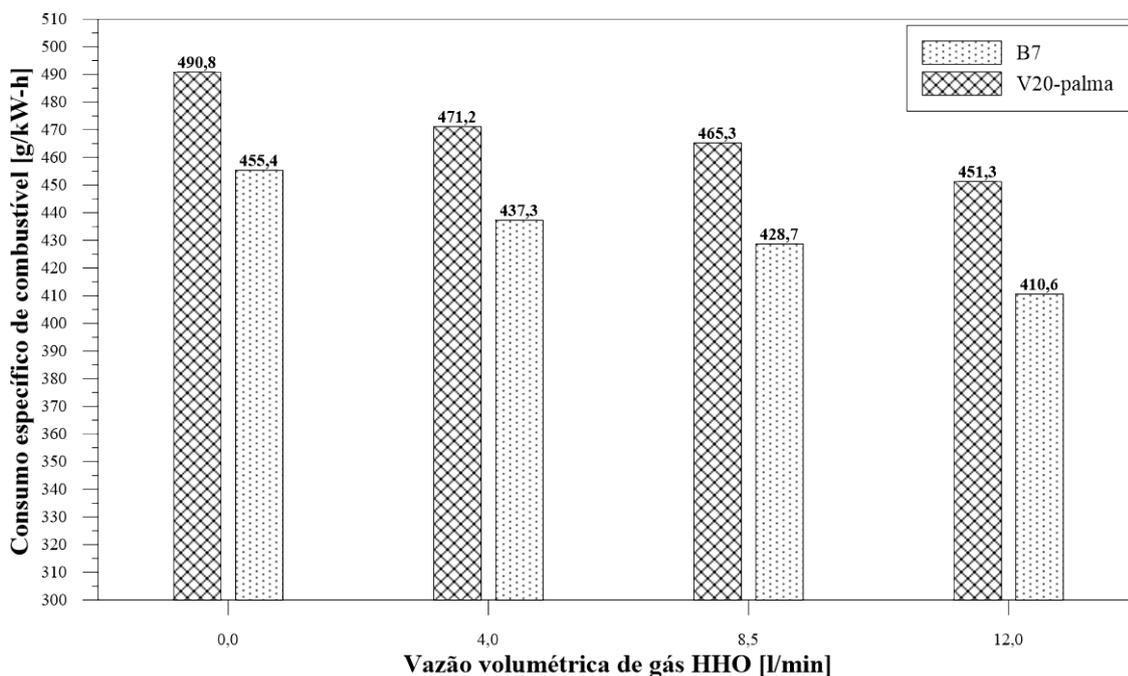
Propriedades	Óleo diesel (B7)	Óleo de palma	V20	Hidrogênio
Fórmula química	$C_{6,9}H_{14,8}O_{0,05}S_{0,026}$	$C_{6,4}H_{11,4}O_{0,74}$	$C_{6,8}H_{14,1}O_{0,2}S_{0,021}$	H_2
Massa esp. 20°C	872,7	962,3	894,0	0,082
Viscosidade a 40°C	2,9	38,5	6,8	-
PCS [kJ/kg]	43942	39150	42913	141.807
PCI [kJ/kg]	40687	36639	39819	119.975
Δh^0 [kJ/kmol]	-461218,3	-228894,2	-410332,1	0,0
AFRest [-]	14,7	12,2	14,2	34,2
Análise elementar				
C [%]	83,42	76,70	81,98	-
H [%]	14,91	11,50	14,17	99,99
O [%]	0,81	11,80	3,17	-
N [%]	0,00	0,00	0,00	-
S [%]	0,84	0,00	0,66	-

Fonte: Laboratório de Caracterização – EBMA – UFPA e Rocha, 2016.

Os resultados apresentados na Figura 6.1 mostram que o consumo específico de combustível foi reduzido conforme se injetava no ar de admissão do motor diferentes valores de vazão de gás HHO para cada combustível utilizado nos testes (B7 e V20). Quando o grupo

gerador funcionou apenas com B7, o valor do consumo específico de combustível foi de 455,4 g/kW-h. Quando foram injetados valores de 4,0, 8,5 e 12 l/min de gás HHO, a redução foi de 4,04, 5,86 e 9,83% respectivamente, comparado ao valor base de B7. Na operação com V20, o valor foi de 490,8 g/kW-h. Porém quando foram adicionadas as quantidades de gás HHO, a redução foi de 3,6, 5,1 e 8,2% à medida que se aumentava a vazão de gás, conforme observa-se na Figura 5.1. Isso ocorreu devido ao PCI da mistura dos combustíveis (B7 + HHO e V20+HHO) aumentar em função da adição do gás HHO no ar de admissão, o que permitiu a elevação da temperatura média dos gases no interior do cilindro. Essa injeção permitiu o crescimento dos picos máximos de pressão e temperatura e, conseqüentemente, a aceleração do processo de combustão, além do aumento da pressão média indicada, o que reflete na redução do consumo específico de combustível. Esses resultados encontrados são semelhantes aos identificados nos estudos de Hamdan, Selim (2105) e Deb, Sastry (2015) e Rocha, (2016) quando utilizaram o gás hidrogênio puro.

Figura 6.1 - Consumo específico de combustível para B7 e V20 em função da adição de gás HHO

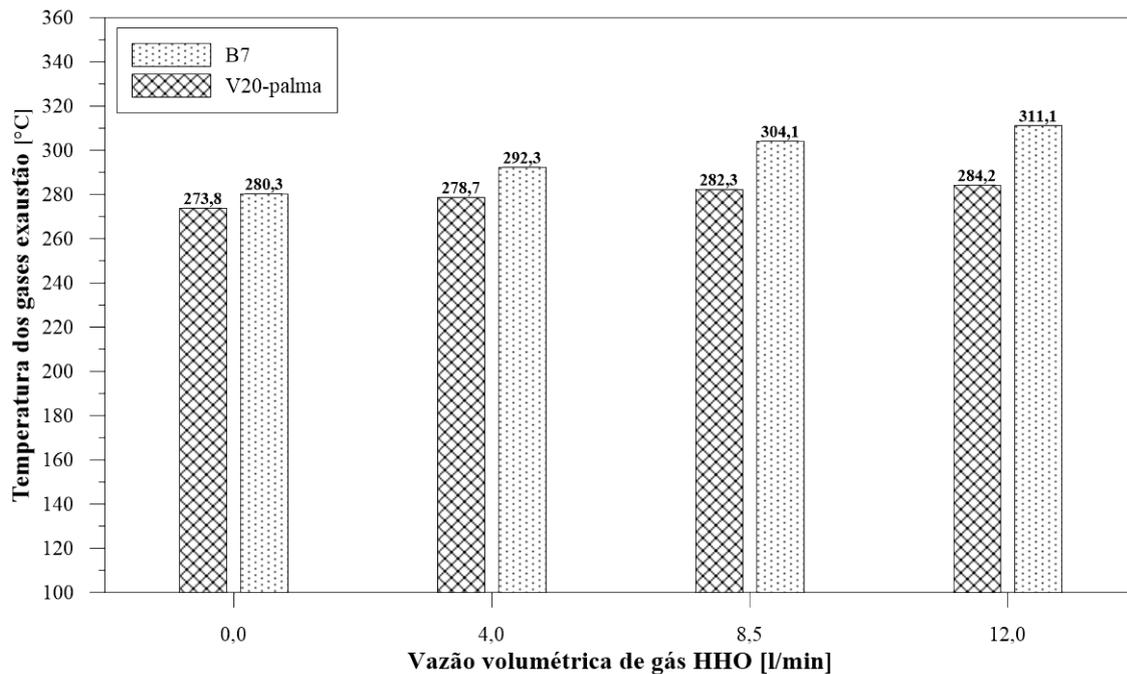


Fonte: autoria própria

A temperatura dos gases de escape para os testes realizados com adição de gás HHO para os combustíveis B7 e V20 aumentou em relação aos valores de linha base, conforme se observa na Figura 6.2. Como esperado, o aumento da vazão de gás HHO, que contém o hidrogênio, influencia no aumento da temperatura média do gás no cilindro do motor, ocasionando aumento

da temperatura dos gases de escape. Comparadas ao B7 puro, as temperaturas cresceram em torno de 4,28, 8,49 e 10,98%, respectivamente. Quando o grupo gerador utilizou V20, a adição de gás provocou aumento na temperatura de 1,78, 3,10 e 3,79%. Esses resultados convergem para os encontrados nos trabalhos de Hamdan, Selim (2105), Morsy, El-Leathy (2015) e Rocha, (2016) em que utilizaram o gás hidrogênio comercial como aditivos em motores.

Figura 6.2 - Temperatura dos gases de escape para B7 e V20

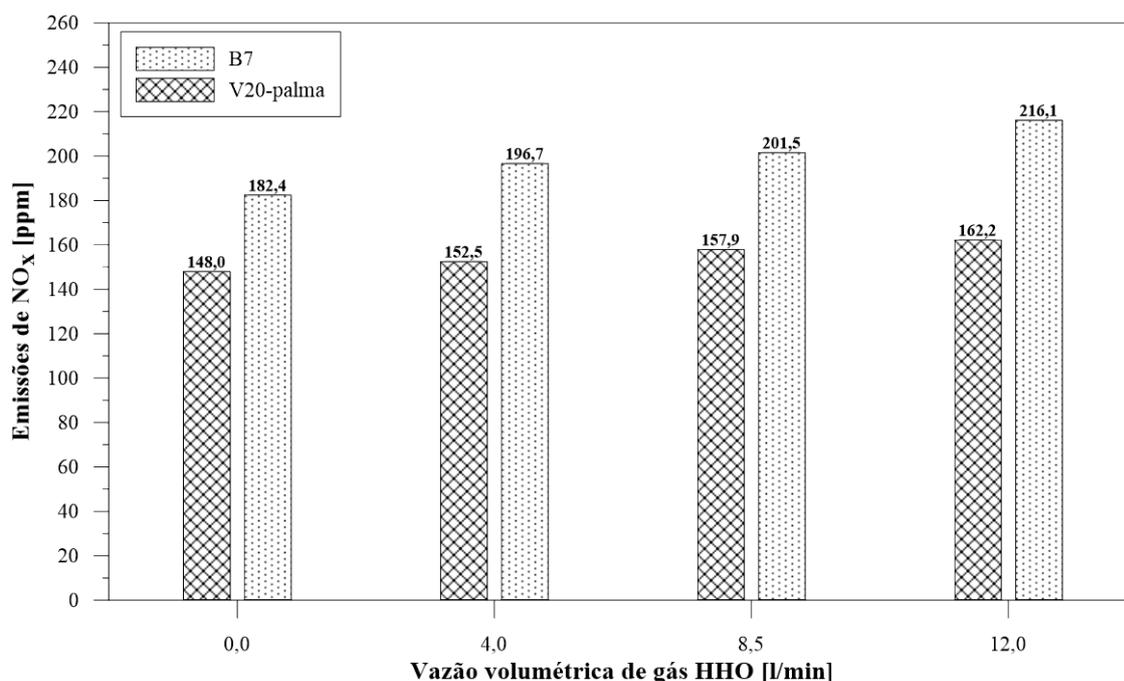


Fonte: autoria própria

No geral, as emissões de NO_x dependem da duração da reação, da temperatura do gás no interior do cilindro e da disponibilidade de nitrogênio e oxigênio na reação. Observou-se na Figura 6.2 que a adição de gás HHO provoca aumento na temperatura dos gases de exaustão e esse aumento reflete diretamente na formação de NO_x, como ilustrado na Figura 6.3. Outro fator que contribui para esse aumento é que os motores de ignição por compressão operam com baixas razões de equivalência, implicando em altos teores de oxigênio e nitrogênio. Para o motor funcionando com B7, o aumento identificado nas emissões de NO_x associado à injeção crescente de gás HHO foi de 7,83, 10,47 e 18,47%. Para o resultado com V20, os valores nas emissões cresceram 3,04, 6,68 e 9,57% à medida que se aumentava a vazão de gás HHO. Os resultados encontrados são similares aos relatados, com o uso de hidrogênio puro, por Deb, Sastry (2105), Jhang, Chen (2016) e Rocha, (2016).

Observa-se ainda que houve redução nas emissões de NO_x quando se utilizou a mistura V20 como combustível comparada ao B7. E a medida que se injetava o gás HHO os valores obtidos com a mistura V20 foram sempre menores, quando comparados com o grupo gerador funcionando com B7.

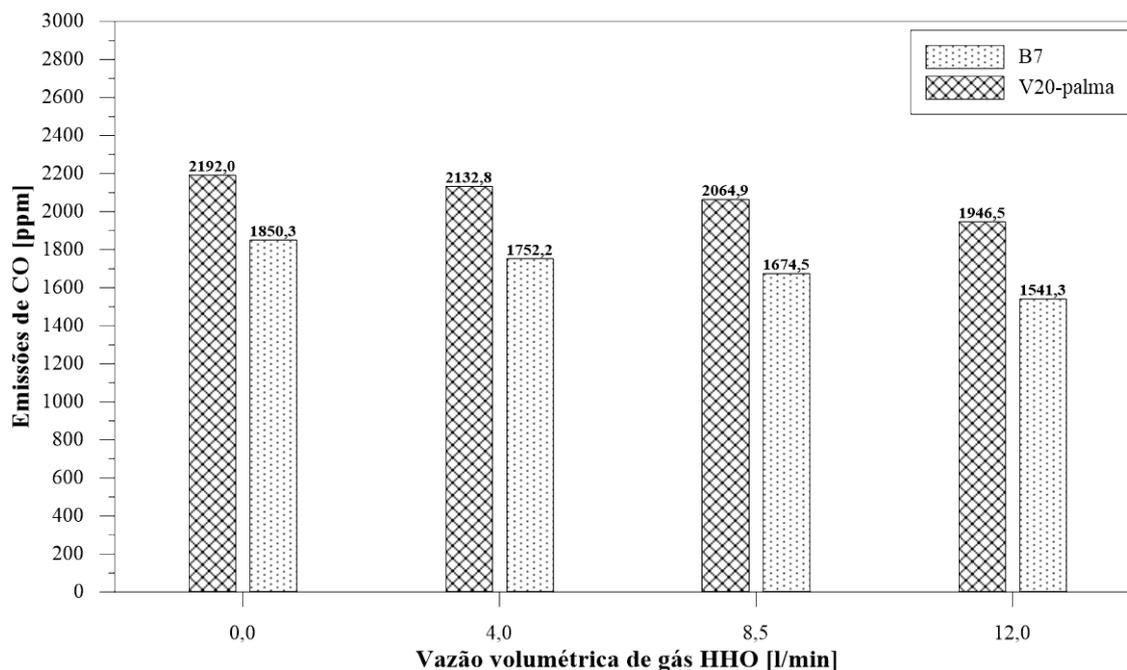
Figura 6.3 - Emissões de NO_x para B7 e V20



Fonte: autoria própria

Durante o processo de combustão, o monóxido de carbono (CO) é produzido a partir da oxidação parcial do carbono existente nos combustíveis B7 e na mistura V20 (ver Tabela 6.1). A adição de gás HHO, em diferentes percentuais, ocasionou melhora no processo de combustão, como observado no gráfico da redução do consumo específico de combustível. Ao mesmo tempo, existe uma redução na quantidade de carbono injetado no cilindro, devido à redução na quantidade injetada de combustível B7 e V20, contribuindo também na redução das emissões de CO, como mostrado na Figura 6.4. As reduções percentuais médias das emissões de monóxido de carbono foram de 5,30, 9,50 e 16,68% para o combustível B7 e de 2,70, 5,79 e 11,0% para o V20, conforme aumento da vazão de gás HHO. Tendências similares foram observadas nos trabalhos de Karagöz, Güler (2106) e Rocha, (2016).

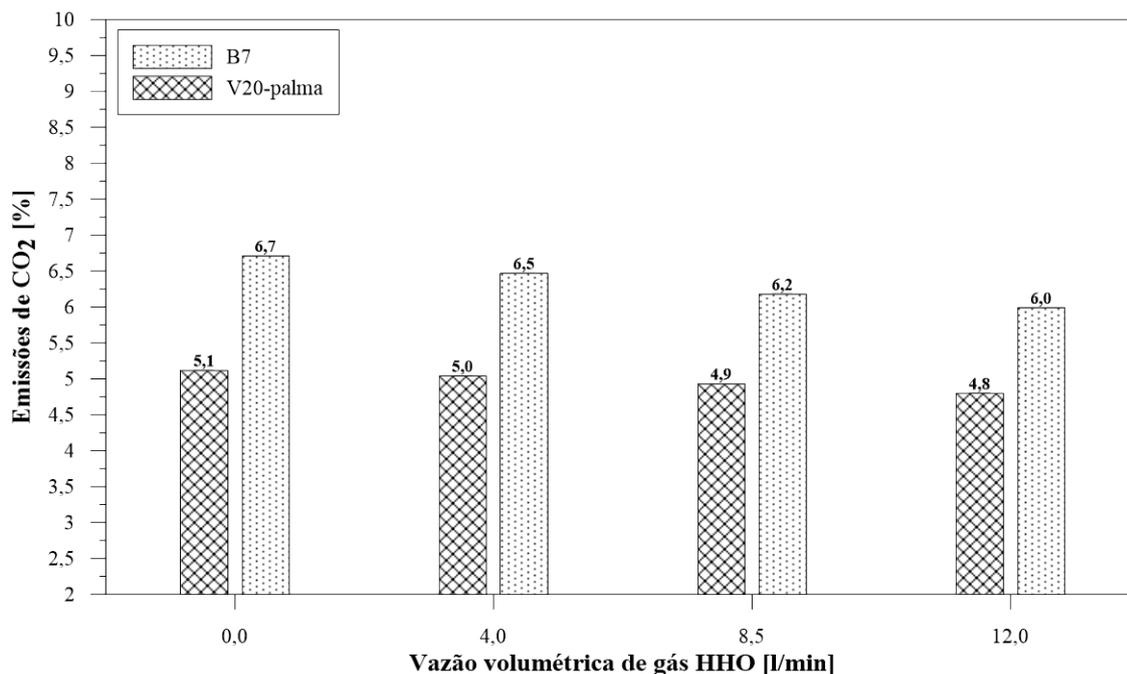
Figura 6.4 - Emissões de CO para B7 e V20 com o aumento da injeção de gás HHO



Fonte: autoria própria

As emissões de dióxido de carbono são mostradas na Figura 6.5. Os resultados apresentam reduções de 2,98, 7,46 e 10,44% quando se usou B7 como combustível, à medida que se aumentou a vazão de gás HHO. Quando o grupo gerador funcionou com o combustível V20, as reduções encontradas foram de 1,96, 3,92 e 5,88%, respectivamente ao aumento da vazão de hidrogênio. Sabe-se que há uma relação direta entre as emissões de particulado, HC, CO e de CO₂. Logo, com a diminuição desses três produtos, espera-se de forma natural o aumento nas emissões de CO₂. Entretanto foi identificado redução no teor de CO₂ na exaustão dos gases oriundo da redução da quantidade de carbono presente nos combustíveis utilizados (B7 e V20). Deb et al, (2015), assim como Karagöz, (2014) e Rocha, (2016) sinalizam para esses resultados.

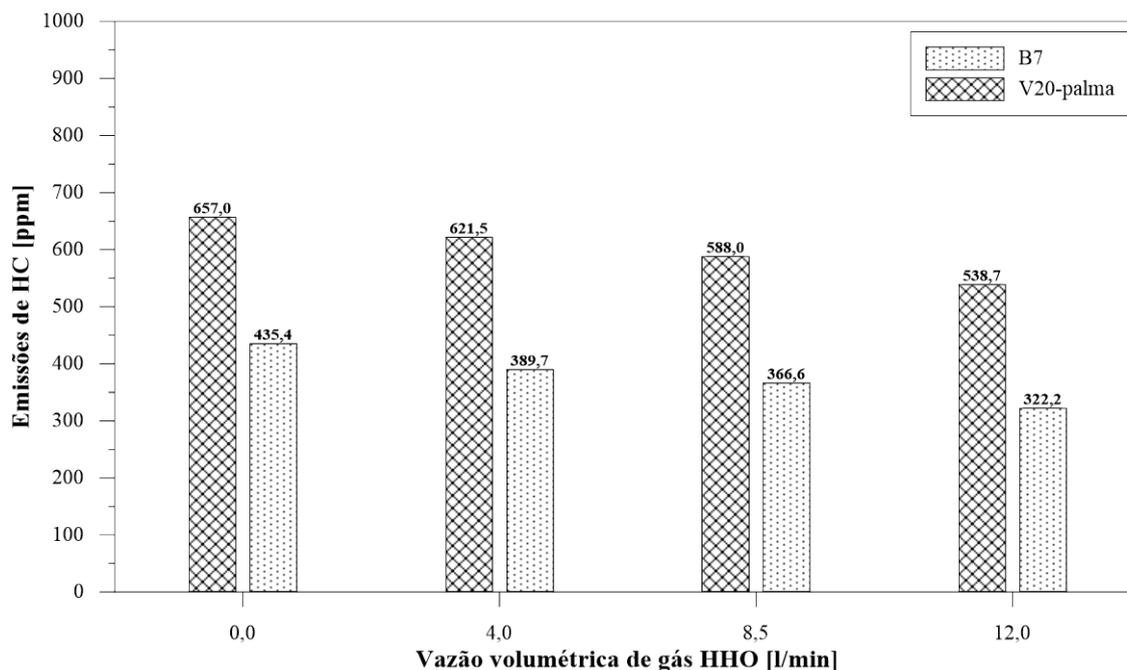
Figura 6.5 - Emissões de CO₂ para B7 e V20 com o aumento da injeção de gás HHO



Fonte: autoria própria

Assim como o monóxido de carbono (CO), as emissões de hidrocarbonetos (HC) são fruto da combustão incompleta do combustível no interior do cilindro. A Figura 6.6 apresenta significativas reduções nas emissões de HC, em virtude da injeção de gás HHO, para os dois combustíveis (B7 ou V20) utilizados. Para cada injeção de gás, observou-se redução de 10,49, 15,80 e 25,9% quando utilizado combustível B7 e de 5,4, 10,50 e 18% para o motor funcionando com V20. Essas reduções identificadas são devido à melhora do processo de combustão causado pela injeção de hidrogênio (contido no HHO) que acelerou a queima dos combustíveis utilizados nos testes. Outro aspecto que contribuiu para a redução de Hidrocarbonetos não queimados foi a ausência de carbono na composição do gás HHO, o que reduziu a oferta desse elemento durante a queima da mistura no interior do cilindro do motor do grupo gerador. Os resultados apresentados por Köse e Ciniviz (2013) e Rocha, (2016) sinalizaram pela coerência aos apresentados nesse trabalho.

Figura 6.6 - Emissões de hidrocarbonetos não queimados para B7 e V20



Fonte: autoria própria

Os resultados experimentais mostraram que a injeção de gás HHO, oriundo da célula eletrolítica, promoveu mudanças significativas durante o funcionamento do grupo gerador, utilizando tanto o combustível B7 quanto a mistura de biodiesel com óleo de palma (V20). Reduziu-se o consumo específico de combustível, as emissões dos gases de exaustão e permitiu-se a utilização de um combustível renovável (óleo vegetal) como insumo a reduzir o consumo de óleo diesel.

As tabelas 6.2 e 6.3 apresentam um resumo das mudanças nos parâmetros analisados durante o funcionamento do grupo gerador diesel utilizando como combustível o B7 e a mistura V20, os quais sofreram a injeção de gás HHO produzido pela célula eletrolítica.

Tabela 6.2 – Resumo dos resultados encontrados para o B7 + HHO

Parâmetro		B7 + 4 l/min	B7 + 8,5 l/min	B7 + 12 l/min
Consumo específico	Reduziu	4,04 %	5,86 %	9,83 %
Temperatura dos gases	Aumentou	4,28 %	8,49 %	10,98 %
NOx	Aumentou	7,83 %	10,47 %	18,47 %
CO	Reduziu	5,30 %	9,50 %	16,68 %
CO ₂	Reduziu	2,98 %	7,46 %	10,44 %
HC	Reduziu	10,49 %	15,80 %	25,90 %

Fonte: autoria própria

Tabela 6.3 – Resumo dos resultados encontrados para o V20 + HHO

Parâmetro		V20 + 4 l/min	V20 + 8,5 l/min	V20 + 12 l/min
Consumo específico	Reduziu	3,6 %	5,1 %	8,2 %
Temperatura dos gases	Aumentou	1,78 %	3,10 %	3,79 %
NOx	Aumentou	3,04 %	6,68 %	9,57 %
CO	Reduziu	2,70 %	5,79 %	11 %
CO ₂	Reduziu	1,96 %	3,92 %	5,88 %
HC	Reduziu	5,4 %	10,50 %	18 %

Fonte: autoria própria

De todos os ensaios realizados em laboratório, identificou-se que quando foi injetada a vazão de 12 l/min de gás HHO no ar de admissão do grupo gerador, obteve-se o maior percentual de redução no consumo específico de combustível, assim como os melhores resultados de emissões para essa vazão de gás. Ao aplicarmos esses resultados encontrados em laboratório aos dados reais obtidos na usina de Cotijuba, pertencente ao sistema isolado do Pará, pode-se identificar ganhos significativos em termos de consumo de combustível e emissões.

De acordo com os dados do Grupo Técnico Operacional da região Norte (GTON), o consumo de óleo diesel B7 nas usinas sob a gestão da Celpa, no ano de 2016, foi de 104.754.579 litros. A Tabela 6.4 apresenta os resultados do consumo de óleo diesel B7 para os meses de janeiro a novembro de 2016 da usina termoeletrica de Cotijuba.

Tabela 6.4 - Consumo de combustível da usina de Cotijuba - Pará

Consumo de combustível (litros) realizado 2016 – COTIJUBA										
JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV
102.079	87.498	90.081	90.748	94.120	93.565	93.565	103.757	99.481	98.932	110.140
Total para os 11 meses de 2016 foram de 1.063.965 litros										

Fonte: dados retirados da planilha do ACOMP

Conforme se observa na tabela 6.4, o total de óleo diesel consumido no mês de novembro na térmica de Cotijuba foi de 110.140 litros. Então, se utilizássemos uma redução 50% menor daquela obtida nos testes em laboratório, ou seja, uma que representasse em torno de 4% no consumo específico de combustível B7, considerando condições reais de funcionamento dos grupos geradores nas usinas, obteríamos uma redução de aproximadamente 4.405 litros de combustível B7. Como o preço médio de óleo diesel no ano de 2016 foi de R\$ 3,05, obteríamos uma economia de R\$ 13.147,08 no mês de novembro. Ao aplicarmos o percentual de redução obtido em laboratório aos outros meses do ano de 2016, alcançar-se-iam resultados

significativos. Ressaltando que o custo para a implementação do sistema com a célula eletrolítica, incluindo os acessórios e insumos é de 680 reais, e que o custo de manutenção inclui apenas a troca da água destilada com o eletrólito.

Aplicando os resultados obtidos nos testes em laboratório aos dados reais de emissões coletados na usina, conforme apresentado nas Tabelas 6.5 e 6.6, observa-se que é possível obter reduções de até 18% nas emissões de NOx, de até 16% nas emissões de CO e de até 10% nos teores de CO₂.

Tabela 6.5 - Dados de emissões coletados em campo na usina de Cotijuba

Motor	M01	M02	M03	M04
Baixa demanda (kW)	373			370
Hora (24h)	9:27			9:18
O2 (%)	10,77			9,5
CO2 (%)	6,72			7,41
CO (%)	0,01			0,04
NO (ppm)	806,67			790
NO2 (ppm)	0			29
NOX (ppm)	806,67			819
SO2 (ppm)	0			0
H2S (ppm)	0			5
Temperatura do Gás (°C)	367,67			397,20

Obs.: Pelo período da manhã, verificou-se que a demanda requerida foi de aproximadamente 371,5 kW, como foi verificado no banco de dados disponibilizado pela Celpa, esse valor corresponde ao intervalo de baixo consumo. Neste momento, verificou-se a necessidade de apenas um motor funcionando, para suprir a demanda requerida. O M04, que inicialmente estava operando sozinho, foi desligado para realização de manutenção. E em seguida, foi ligado o M01.

Tabela 6.6 - Dados de emissões coletados em campo na usina de Cotijuba

Motor	M01	M02	M03	M04
Alta demanda (kW)	304	306		
Hora (24h)	20:08	20:26		
O2 (%)	11,3	11,17		
CO2 (%)	5,63	5,25		
CO (%)	0,01	0,01		
NO (ppm)	820,67	768,67		
NO2 (ppm)	0	0		
NOX (ppm)	820,67	768,67		
SO2 (ppm)	0	0		
H2S (ppm)	0	0		
Temperatura do Gás (°C)	336,57	350,50		

Obs.: Pelo período noturno verificou-se que a demanda requerida foi de aproximadamente 610 kW. E como foi verificado no banco de dados disponibilizado pela Celpa, corresponde ao intervalo de consumo normal. Neste momento verificou-se a necessidade de dois motores em funcionamento, para suprimir a demanda requerida, grupo geradores M01 e M02.

7. CONCLUSÕES

Após a elaboração do projeto de construção da célula eletrolítica para a produção de gás HHO, a mesma foi testada e verificou-se que o gás produzido era combustível. Em seguida, pequenas quantidades do gás HHO, que representam significativas frações energéticas da mistura combustível, foram adicionadas ao B7 para verificar seus efeitos no desempenho e nas emissões de um grupo gerador a diesel. Este estudo mostrou que mesmo uma pequena quantidade de gás HHO pode alterar o desempenho e as emissões do motor. A adição de gás HHO tende a melhorar o desempenho do motor, reduzindo seu consumo específico de combustível e as emissões de CO, CO₂ e, conseqüentemente, de HC (já que na composição do HHO não contém o elemento carbono) a valores inferiores aos percentuais obtidos com a linha base, utilizando apenas B7.

A utilização de misturas de biodiesel B7 e óleo de palma *in natura* mostrou-se uma alternativa viável para a redução no consumo de óleo diesel. Os testes mostraram que em mistura de até 20%, em volume com óleo vegetal, o grupo gerador diesel funcionou dentro dos padrões normais. Com esse resultado, seria possível reduzir a utilização de biodiesel (que requer processo de produção caro e que demanda mão de obra qualificada), necessário para a realização das misturas com óleo diesel, determinadas pelo Programa Nacional de Produção do Biodiesel-PNPB, de acordo com a Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005.

Os resultados mostraram ainda que o aumento da vazão de gás HHO tende a elevar e antecipar o pico de pressão no interior do cilindro, elevando também a temperatura média dos gases, o que reflete no aumento das emissões de NO_x. Esta condição pode ser agravada em cargas elevadas do grupo gerador. Tudo isso indica que o hidrogênio presente no gás HHO tende a promover uma combustão mais rápida com maiores taxas de liberação de calor.

Vale destacar neste trabalho que a construção da célula se deu de forma simples e sem demandar muito recurso financeiro. Além disso, o gás HHO produzido foi introduzido no coletor de admissão de ar de forma contínua, sem realizar nenhuma modificação ou instalação de complexos equipamentos no motor, viabilizando assim a sua utilização comercial nas usinas termoelétricas a diesel do Estado do Pará.

Como o gás é admitido de forma contínua com o ar de admissão, este processo tende a diminuir a eficiência volumétrica do motor, pois o gás HHO desloca parte do ar admitido pelo motor. Por esse motivo, elevadas quantidades de gás HHO prejudicam o funcionamento adequado do grupo gerador pela falta de oxigênio no cilindro do motor, apesar de que o processo

de hidrólise da água já fornece uma quantidade de oxigênio, mas este não seria suficiente para compensar o que fora deslocado.

A implementação dessa metodologia possibilitará às usinas termoelétricas reduzir a dependência do óleo diesel, introduzindo duas fontes de energias renováveis (o óleo vegetal e o gás HHO, oriundo da eletrólise da água), bem como diminuir as emissões de gases poluidores (NO_x, CO e CO₂) e mitigar subsídios do Fundo Setorial da CCC.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma das sugestões para trabalhos futuros seria a quantificação/qualificação do gás produzido pela célula eletrolítica, por meio de análise cromatográfica, para que de fato se saiba os teores e elementos de sua composição.

Realizar o balanço energético durante os testes utilizando uma bateria diferente daquela utilizada para o acionamento do grupo gerador, e verificar a influência nos resultados.

Realizar estudo de caso em uma usina termoelétrica do Sistema Isolado, aplicando a metodologia proposta para a redução do consumo específico de combustível e emissões.

Realizar análise de custo aprofundada do uso dessa metodologia em sistemas termoelétricos que funcionam a óleo diesel mineral ou B7.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGARWAL, A. K. "Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines". **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 33, n. 3, p. 233-271, 2007.

AGARWAL, A. K.; RAJAMANO HARAN, K. "Experimental investigations of performance and emissions of Karanja oil and its blends in a single cylinder agricultural diesel engine". **Applied Energy**, v. 86, n. 1, p. 106-112, 2009.

AGARWAL, A.K., Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2007. 33(3): p. 233-271.

Al-Rousan AA. "Reduction of fuel consumption in gasoline engines by introducing HHO gas into intake manifold". *Int J Hydrogen Energy* 2010;35(23):12930–5.

AL-ROUSAN, A. A. Reduction of fuel consumption in gasoline engines by introducing HHO gas into intake manifold. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 35, n. 23, p. 12930-12935, 2010.

ALTIN, R.; ÇETINKAYA, S.; YÜCESU, H. S. "The potential of using vegetable oil fuels as fuel for diesel engines". **Energy Conversion and Management**, v. 42, n. 5, p. 529-538, 2001.

ALTUN, Ş.; BULUT, H.; ÖNER, C. The comparison of engine performance and exhaust emission characteristics of sesame oil–diesel fuel mixture with diesel fuel in a direct injection diesel engine. **Renewable Energy**, v. 33, n. 8, p. 1791-1795, 2008.

AL-WIDYAN, M. I; AL-SHYOUKH, A. O. Experimental evaluation of the transesterification of waste palm oil into biodiesel, *Bioresource Technology*, v. 85, p. 253-256, 2002.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (2014) – Resolução Normativa 427/11 – <http://www.aneel.gov.br/>, acessada em 21/03/2016.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (2014) – Resolução Normativa 308/08 – <http://www.aneel.gov.br/>, acessada em 24/03/2014.

ANP. Resolução ANP Nº 50, de 23.12.2013. Brasília, 2013. Disponível em: < http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2013/dezembro/ranp%2050%20-%202013.xml>. Acesso em: 10 de Agosto de 2016.

_____. **Oil, Natural Gas and Biofuels Statistical Yearbook 2015**. Rio de Janeiro: Agência nacional do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2016.

BARRETO, A.J.B.; Mendes, D.; Junior, J.A.F.; Souza, J.; Coimbra, M.D.J. 2007. "Estudo da adição de biodiesel do óleo de palma no óleo diesel". Disponível em www.biodiesel.gov.br/docs/congresso2007

BATMAZ, I. "The Impact of Using Hydrogen as Fuel on Engine Performance and Exhaust Emissions in Diesel Engines". **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and**

Environmental Effects, v. 35, n. 6, p. 556-563, 2013.

BEN - Balanço Energético Nacional. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética, 2016.

BIALKOWSKI, M. T. **Theoretical and experimental investigation of a CDI injection system operating on neat rapeseed oil - feasibility and operational studies**. 2009. Thesis (PhD). Engineering and Physical Sciences, Heriot-Watt University

BLIN, J.; BRUNSCHWIG, C.; CHAPUIS, A.; CHANGOTADE, O.; SIDIBE, S. S.; NOUMI, E. S.; GIRARD, P. "Characteristics of vegetable oils for use as fuel in stationary diesel engines—Towards specifications for a standard in West Africa". **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, n. 0, p. 580-597, 2013.

BOUSBAA, H.; SARY, A.; TAZEROUT, M.; LIAZID, A. "Investigations on a Compression Ignition Engine Using Animal Fats and Vegetable Oil as Fuels". **Journal of Energy Resources Technology**, v. 134, n. 2, p. 022202-11, 2012.

BOYCE, B. (2013). *Bob Boyce's Story*. Obtenido de Free Energy: The secret they can't kill: <http://www.viewzone.com/verichipx.html>

BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. São Paulo: Blucher, 2012.

CELPA. **Memorial descritivo: Projeto de Referência para atendimento ao mercado dos Sistemas Isolados da área de concessão da CELPA**. Belém 2013.

CELPA. Memorial descritivo: Projeto de Referência para atendimento ao mercado dos Sistemas Isolados da área de concessão da CELPA. Belém 2013.

CHAUHAN, B.; KUMAR, N.; CHO, H. "Performance and emission studies on an agriculture engine on neat Jatropha oil". **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 24, n. 2, p. 529-535, 2010.

CHIRIAC, R. and N. Apostolescu, Emissions of a diesel engine using B20 and effects of hydrogen addition. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013. 38(30): p. 13453-13462.

DAHO, T.; VAITILINGOM, G.; OUIMINGA, S. K.; PIRIOU, B.; ZONGO, A. S.; OUOBA, S.; KOULIDIATI, J. "Influence of engine load and fuel droplet size on performance of a CI engine fueled with cottonseed oil and its blends with diesel fuel". **Applied Energy**, v. 111, n. 0, p. 1046-1053, 2013.

DATTA, A.; MANDAL, B. K. "A comprehensive review of biodiesel as an alternative fuel for compression ignition engine". **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 799-821, 2016.

DE MORAIS, A. M.; MENDES JUSTINO, M. A.; VALENTE, O. S.; HANRIOT, S. D. M.; SODRÉ, J. R. "Hydrogen impacts on performance and CO₂ emissions from a diesel power generator". **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n. 16, p. 6857-6864, 2013.

DEB, M., et al., An experimental study on combustion, performance and emission analysis of a single cylinder, 4-stroke DI-diesel engine using hydrogen in dual fuel mode of operation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015. 40(27): p. 8586-8598.

DEB, M.; SASTRY, G. R. K.; BOSE, P. K.; BANERJEE, R. "An experimental study on combustion, performance and emission analysis of a single cylinder, 4-stroke DI-diesel engine using hydrogen in dual fuel mode of operation". ***International Journal of Hydrogen Energy***, v. 40, n. 27, p. 8586-8598, 2015.

DEUSTCHES-INSTITUT-FÜR-NURMING. **DIN 51605. Fuels for vegetable oil compatible combustion engines - Fuel from rapeseed oil - Requirements and test methods**. Berlim 2010.

DOE. UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. A National Vision of America's Transition to a Hydrogen Economy – To 2030 and Beyond. 2012. Disponível em: < <http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells> >. Acesso em: 12 de Junho 2016.

DUARTE, Ana Rosa Carriço de Lima Montenegro. “Análise de parâmetros de sustentabilidade para geração de energia elétrica com óleo vegetal em comunidades isoladas na Amazônia”. Tese de doutorado apresentada ao PPGEE/ UFPA. 2009.

DUCA, D.; TOSCANO, G. "Comparison among electric generators fueled with different vegetable oils by means of the antioxidant level analysis in lubricating oil". ***Biomass and Bioenergy***, v. 67, n. 0, p. 119-124, 2014.

ELETROBRAS, **Plano Anual de Operação dos Sistemas Isolados para 2014, 2014**.

EPE. **Anuário estatístico de energia elétrica 2014**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia, 2014.

FASINA, O. O.; COLLEY, Z. "Viscosity and specific heat of vegetable oils as a function of temperature: 35°C to 180 °C". ***International Journal of Food Properties***, v. 11, p. 738-746, 2008.

FERRARI, G. **Internal Combustion Engines**. 2. Società Editrice Esculapio, 2014.

FOUNTI, M. A. "Comparative environmental behavior of bus engine operating on blends of diesel fuel with four straight vegetable oils of Greek origin: Sunflower, cottonseed, corn and olive". ***Fuel***, v. 90, n. 11, p. 3439-3446, 2011.

GÓMEZ, Clara. Laboratório Química-Física I. V□□□□□□s.n., 2010.

GUPTA, H. N. **Fundamentals of Internal Combustion Engines**. 2. PHI Learning, 2013.

GUPTA, R. B. **Hydrogen Fuel-Production, Transport and Storage**. FI, USA: Taylor & Francis, 2009.

SHARON, H. P. Jai Shiva Ram, K. Jenis Fernando, S. Murali, R. Muthusamy Fueling a stationary direct injection diesel engine with diesel-used palm oil-butanol blends – An experimental study *Energy Conversion and Management* 73 (2013) 95–105 2013.

HALDAR, S. K.; GHOSH, B. B.; NAG, A. Studies on the comparison of performance and emission characteristics of a diesel engine using three degummed non-edible vegetable oils. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 8, p. 1013-1018, 2009.

HAMDAN, M.O., et al., Hydrogen supplement co-combustion with diesel in compression ignition engine. *Renewable Energy*, 2015. 82: p. 54-60.

HARTMANN, R. M.; GARZON, N. N.; HARTMANN, E. M.; OLIVEIRA, A. A. M.; BAZZO, E.; OKUDA, B. S.; PILUSKI, J. E. A. **Vegetable Oils of Soybean, Sunflower and Tung as Alternative Fuels for Compression Ignition Engines**. Proceedings of ECOS 2012 - The 25th International Conference. Perugia, Italy 2012.

HELLIER, P.; LADOMMATOS, N.; YUSAF, T. "The influence of straight vegetable oil fatty acid composition on compression ignition combustion and emissions". **Fuel**, v. 143, p. 131-143, 2015.

HOEKMAN, S. K.; BROCH, A.; ROBBINS, C.; CENICEROS, E.; NATARAJAN, M. "Review of biodiesel composition, properties, and specifications". **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 1, p. 143-169, 2012.

INMETRO. **Avaliação de dados de medição: Guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008**. Rio de Janeiro: BIPM, 2012.

JHANG, S.-R.; CHEN, K.-S.; LIN, S.-L.; LIN, Y.-C.; CHENG, W. L. "Reducing pollutant emissions from a heavy-duty diesel engine by using hydrogen additions". **Fuel**, v. 172, p. 89-95, 2016.

KARABEKTAS, M.; ERGEN, G.; HOSOZ, M. "Effects of the blends containing low ratios of alternative fuels on the performance and emission characteristics of a diesel engine". **Fuel**, v. 112, n. 0, p. 537-541, 2013.

KARAGÖZ, Y.; GÜLER, İ.; SANDALCI, T.; YÜKSEK, L.; DALKILIÇ, A. S. "Effect of hydrogen enrichment on combustion characteristics, emissions and performance of a diesel engine". **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 1, p. 656-665, 2016.

KARAGÖZ, Y.; SANDALCI, T.; YÜKSEK, L.; DALKILIÇ, A. S. "Engine performance and emission effects of diesel burns enriched by hydrogen on different engine loads". **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 20, p. 6702-6713, 2015.

KEGL, B.; KEGL, M.; PEHAN, S. **Green Diesel Engines: Biodiesel Usage in Diesel Engines**. Springer-Verlag London, 2013.

KIBBEY, T. C.G.; CHEN, L.; DO, L.D.; SABATINI, D. A. "Predicting the temperature-dependent viscosity of vegetable oil/diesel reverse microemulsion fuels". **Fuel**, v.116, p. 432-437, 2014.

KORDESCH, K.; SIMADER, G. *Fuel Cells and Their Applications*. VCH, 2006.

KÖSE, H.; CINIVIZ, M. "An experimental investigation of effect on diesel engine performance and exhaust emissions of addition at dual fuel mode of hydrogen". **Fuel Processing Technology**, v. 114, p. 26-34, 2013.

KUMAR, M. S.; RAMESH, A.; NAGALINGAM, B. "A Comparison of the Different Methods of Using Jatropa Oil as Fuel in a Compression Ignition Engine". **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v. 132, n. 3, p. 032801-10, 2010.

LABECKI, L. **Combustion and Emission Characteristics of Biofuels in Diesel Engines**. 2010. Thesis (PhD). School of Engineering and Design, Brunel University, United Kingdom.

LABECKI, L.; CAIRNS, A.; XIA, J.; MEGARITIS, A.; ZHAO, H.; GANIPPA, L. C. "Combustion and emission of rapeseed oil blends in diesel engine". **Applied Energy**, v. 95, n. 0, p. 139-146, 2012.

LABECKI, L.; GANIPPA, L. C. "Effects of injection parameters and EGR on combustion and emission characteristics of rapeseed oil and its blends in diesel engines". **Fuel**, v. 98, n. 0, p. 15-28, 2012.

LANJEKAR, R. D.; DESHMUKH, D. "A review of the effect of the composition of biodiesel on NO_x emission, oxidative stability and cold flow properties". **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 1401-1411, 2016.

LE ANH, T. et al. Improving Performance and Reducing Pollution Emissions of a Carburetor Gasoline Engine by Adding HHO Gas into the Intake Manifold. SAE International, v. 104, 2013.

LEENUS JESU MARTIN, M.; EDWIN GEO, V.; KINGSLY JEBA SINGH, D.; NAGALINGAM, B. "A comparative analysis of different methods to improve the performance of cotton seed oil fuelled diesel engine". **Fuel**, v. 102, 2012.

LI, H.; BILLER, P.; HADAVI, S. A.; ANDREWS, G. E.; PRZYBYLA, G.; LEA-LANGTON, A. "Assessing combustion and emission performance of direct use of SVO in a diesel engine by oxygen enrichment of intake air method". **Biomass and Bioenergy**, v. 51, n. 0, p. 43-52, 2013.

LONGO, M. A. V.; LAZZARIN, N.; MIGUEZ, T. A. Produção Biológica de Hidrogênio. 2008. Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis.

LORA, E. E. S. & NASCIMENTO, M. A. R. (2004) – Geração Termelétrica: Planejamento, Projeto e Operação. Volume I e II, Editora Interciência, ISBN: 85-7193-105-4, 1265 p.

MISRA, R. D.; MURTHY, M. S. "Straight vegetable oils usage in a compression ignition engine - A review". **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 9, p. 3005-3013, 2010.

_____. "Performance, emission and combustion evaluation of soapnut oil–diesel blends in a compression ignition engine". **Fuel**, v. 90, n. 7, p. 2514-2518, 2011.

MME. Boletim mensal dos combustíveis renováveis. Edição N°94. **Ministério de Minas e Energia**, 2015. Disponível em: < <http://www.mme.gov.br/> >. Acesso em: 04 de Abril de 2016.

MORAD, N. A.; KAMAL, A. A. M.; PANAU, F.; YEW, T. W. "Liquid specific heat capacity estimation for fatty acids, triacylglycerols, and vegetable oils based on their fatty acid composition". **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 77, n. 9, p. 1001-1005, 2000.

MORAIS, A. M.; JUSTINO, M. A. M.; Osmano Souza Valente, Sergio de Moraes Hanriot, Jose´

Ricardo Sodré. "Hydrogen impacts on performance and CO2 emissions from a diesel power generator". International journal of hydrogen energy v. 38 p. 6857-6864, 2013.

MORSY, M. H.; EL-LEATHY, A. M.; HEPBASLI, A. "An Experimental Study on the Performance and Emission Assessment of a Hydrogen/Diesel Fueled Engine". **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 37, n. 3, p. 254-264, 2015.

MUSMAR, S. E. A.; AL-ROUSAN, A. A. Effect of HHO gas on combustion emissions in gasoline engines. Fuel, v. 90, n. 10, p. 3066-3070, 2011.

OLASHEU, T. I.; ADEBIYI, K. A.; DUROWOJU, M. O.; ODESANYA, K. O. "Determination of Some Physical Properties of Jatropha (Jatropha Curcas) Oil". **International Journal of Engineering Research**, v. 4, n. 6, p. 331-338, 2015.

Osama H. Ghazal "Performance and combustion characteristic of CI. E□□□□ fueled with hydrogen enriched diesel" in t e r n a t i o n a l journal of hydrogen energy v. 38, p. I5469-I5476

PEREIRA, R. S. "Avaliação e desempenho de motor de injeção indireta consumindo óleo de palma in natura". Dissertação de mestrado. B□□□□/P□□□ UFPA/FEM 2016.

PLANO ANUAL DE CUSTOS – Fundo Setorial CCC. Eletrobrás 2016.

Pottmaier, D.; C.R.Melo; M.N.Sartor; S.Kuester; T.M.Amadio; C.A.H.Fernandes; D. Marinha e .E.Alarcon. "The Brazilian energy matrix: From a materials science and engineering perspective". Renewable and Sustainable Energy Reviews 2012.

PRASHANT, G.K., D.B. Lata, and P.C. Joshi, Investigations on the effect of ethanol blend on the combustion parameters of dual fuel diesel engine. Applied Thermal Engineering, 2016. 96: p. 623-631.

PURUSHOTHAMAN, K.; NAGARAJAN, G. Performance, emission and combustion characteristics of a compression ignition engine operating on neat orange oil. **Renewable Energy**, v. 34, n. 1, p. 242-245, 2009.

QI, DH., Lee, CF., Jia, C.C; Wang, P.P.; Wu, S.T. "Experimental investigations of combustion and emission characteristics of rapeseed oil–diesel blends in a two cylinder agricultural diesel engine". **Energy Conversion and Management**. v.77, p. 227 -232, 2014.

RAJARAM, P. S.; KANDASAMY, A.; REMIGIOUS, P. A. Effectiveness of oxygen enriched hydrogen-HHO gas addition on direct injection diesel engine performance, emission and combustion characteristics. Thermal Science, v. 18, p. 259-268, 2014.

RAKOPOULOS, C. D.; ANTONOPOULOS, K. A.; RAKOPOULOS, D. C. "Experimental heat release analysis and emissions of a HSDI diesel engine fueled with ethanol–diesel fuel blends". Energy, v. 32, n. 10, p. 1791-1808, 2007.

RAKOPOULOS, C. D.; ANTONOPOULOS, K. A.; RAKOPOULOS, D. C.; HOUNTALAS, D. T.; GIAKOUMIS, E. G. "Comparative performance and emissions study of a direct injection Diesel engine using blends of Diesel fuel with vegetable oils or bio-diesels of various origins". **Energy Conversion and Management**, v. 47, n. 18–19, p. 3272-3287, 2006.

RAKOPOULOS, D. C.; RAKOPOULOS, C. D.; GIAOUMIS, E. G.; PAPAGIANNAS, R. G.; KYRITSIS, D. C. "Influence of properties of various common bio-fuels on the combustion and emission characteristics of high-speed DI (direct injection) diesel engine: Vegetable oil, bio-diesel, ethanol, n-butanol, diethyl ether". **Energy**, v. 73, n. 0, p. 354-366, 2014.

RAMADHAS, A. S.; JAYARAJ, S.; MURALEEDHARAN, C. "Use of vegetable oils as I.C. engine fuels—A review". **Renewable Energy**, v. 29, n. 5, p. 727-742, 2004.

REIF, K. **Diesel Engine Management: Systems and Components**. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.

REMMELE, E.; THUNEKE, K. **Pre-Standard DIN V 51605 for Rapeseed Oil Fuel**. 15th European Biomass Conference & Exhibition. Berlin - Germany: 2612-2613 p. 2007.

RIBEIRO, G. A. G. **Desenvolvimento de uma metodologia para análise de sustentabilidade de sistemas isolados com usinas dieselétricas**. Belém - Pará: CELPA, 2016.

ROCHA, Hendrick Maxil Zárate. "Determinação dos efeitos da utilização de hidrogênio em grupos geradores a diesel operando com diferentes misturas diesel-óleo vegetal" Hendrick Maxil Zárate Rocha. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

SANDALCI, T.; KARAGÖZ, Y. "Experimental investigation of the combustion characteristics, emissions and performance of hydrogen port fuel injection in a diesel engine". **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 32, p. 18480-18489, 2014.

SANTOS, Eraldo C., Ciclo de Rotinas para Melhoria da Manutenção em Unidades Diesel, Geração de Energia Elétrica, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Itajubá - MG, 183 p., 2012.

SARAVANAN, N.; NAGARAJAN, G.; DHANASEKARAN, C.; KALAISELVAN, K. M. "Experimental investigation of hydrogen port fuel injection in DI diesel engine". **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 32, n. 16, p. 4071-4080, 2007.

SENTHIL KUMAR, M.; RAMESH, A.; NAGALINGAM, B. "Use of hydrogen to enhance the performance of a vegetable oil fuelled compression ignition engine". **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 28, n. 10, p. 1143-1154, 2003.

SHARON, H.; P. Jai Shiva Ram; K. Jenis Fernando; S. Murali; R. Muthusamy. Fueling a stationary direct injection diesel engine with diesel-used palm oil-butanol blends – An experimental study, *Energy Conversion and Management*, v.73, p. 95–105, 2013.

SIDIBÉ, S. S.; BLIN, J.; VAITILINGOM, G.; AZOUMAH, Y. "Use of crude filtered vegetable oil as a fuel in diesel engines state of the art: Literature review". **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 9, p. 2748-2759, 2010.

SILVA, E. P. *Introdução à Tecnologia e Economia do Hidrogênio*. Campinas: UNICAMP, 1991.

SOUZA, R. G. et al. Desempenho de um conjunto moto gerador adaptado a biogás. 2010. Ciências Agrotécnicas, Lavras/MG.

SUR, A. A.; WALKE, P. R.; BASAVARAJ, M. Performance analysis of mono cylinder four stroke spark ignition engine by utilizing green gas (HHO gas) as a fuel suplement. Golden Research Thoughts, v. 3, n. 11, 2014.

TECNALIA. (2006). Hidrógeno y Energías Renovables: Nuevas Tecnologías para la Sostenibilidad. España: TECNALIA Energía.

VERMA, P.; SHARMA, M. P. "Review of process parameters for biodiesel production from different feedstocks". **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 1063-1071, 2016.

VOJTÍŠEK-LOM, M.; PECHOUT, M.; BARBOLLA, A. "Experimental investigation of the behavior of non-esterified rapeseed oil in a diesel engine mechanical fuel injection system". **Fuel**, v. 97, n. 0, p. 157-165, 2012.

WANDER, P. R. □ALTAFINI, C. R. □MORESCO, A. L. □COLOMBO, A. L. □LUSA, D. "Performance analysis of a mono-cylinder diesel engine using soy straight vegetable oil as fuel with varying temperature and injection angle". **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 9, p. 3995-4000, 2011.

WANG, Y. D.; AL-SHEMMERI, T.; EAMES, P.; MCMULLAN, J.; HEWITT, N.; HUANG, Y.; REZVANI, S. "An experimental investigation of the performance and gaseous exhaust emissions of a diesel engine using blends of a vegetable oil". **Applied Thermal Engineering**, v. 26, n. 14– 15, p. 1684-1691, 2006.

YILMAZ, A. C.; ULUDAMAR, E.; AYDIN, K. Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines. International Journal of Hydrogen Energy, v. 35, n. 20, p. 11366-11372, 2010b.

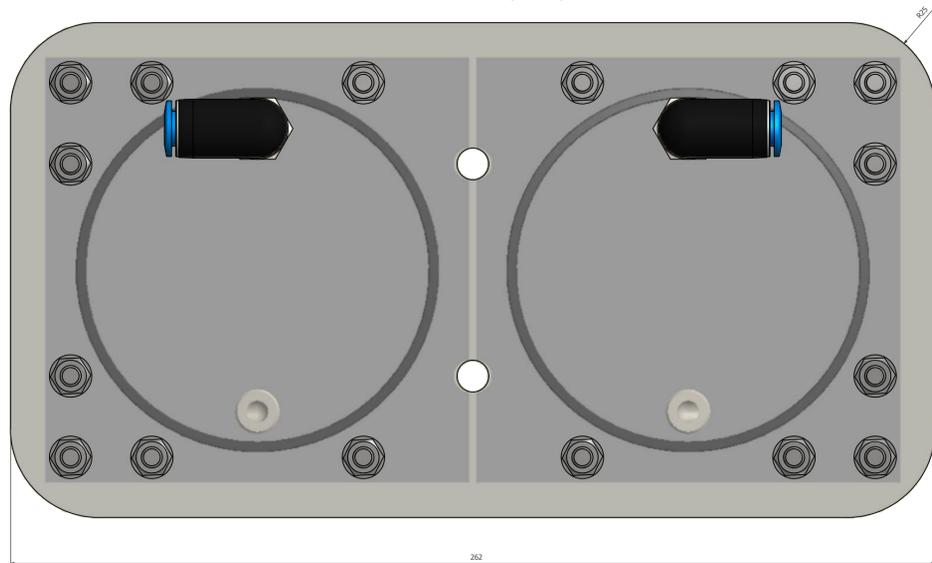
YILMAZ, N.; MORTON, B. "Effects of preheating vegetable oils on performance and emission characteristics of two diesel engines". **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 5, p. 2028-2033, 2011.

ZHOU, J. H.; CHEUNG, C. S.; ZHAO, W. Z.; NING, Z.; LEUNG, C. W. "Impact of intake hydrogen enrichment on morphology, structure and oxidation reactivity of diesel particulate". **Applied Energy**, v. 160, p. 442-455, 2015.

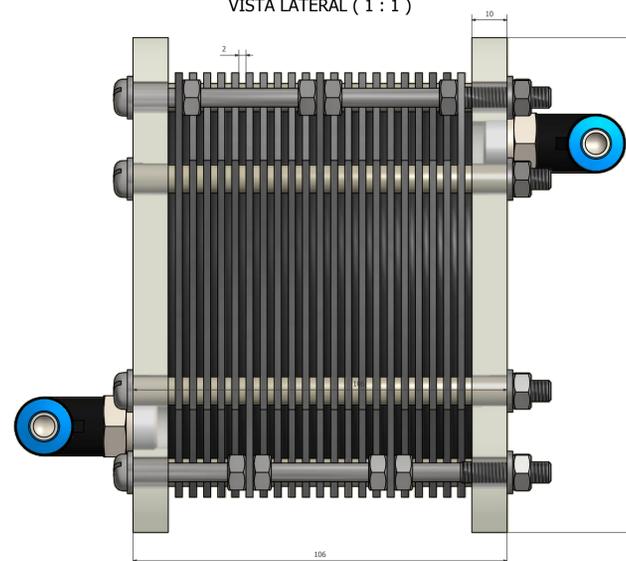
ZHU, Z.; ZHANG, F.; LI, C.; WU, T.; HAN, K.; LV, J.; LI, Y.; XIAO, X. "Genetic algorithm optimization applied to the fuel supply parameters of diesel engines working at plateau". **Applied Energy**, v. 157, p. 789-797, 2015.

9. ANEXOS

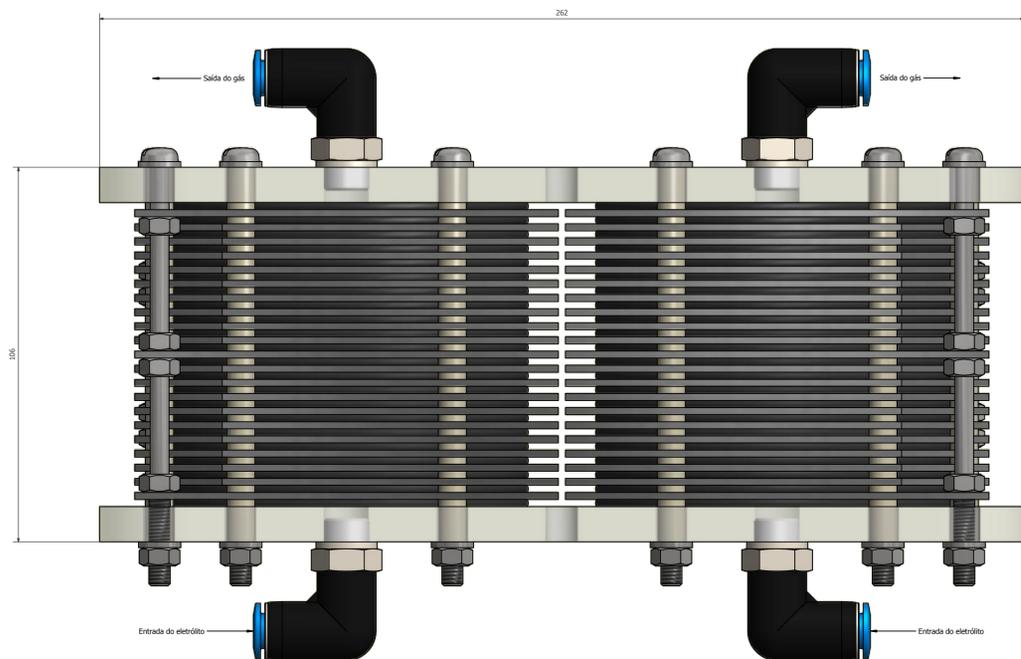
VISTA FRONTAL (1 : 1)



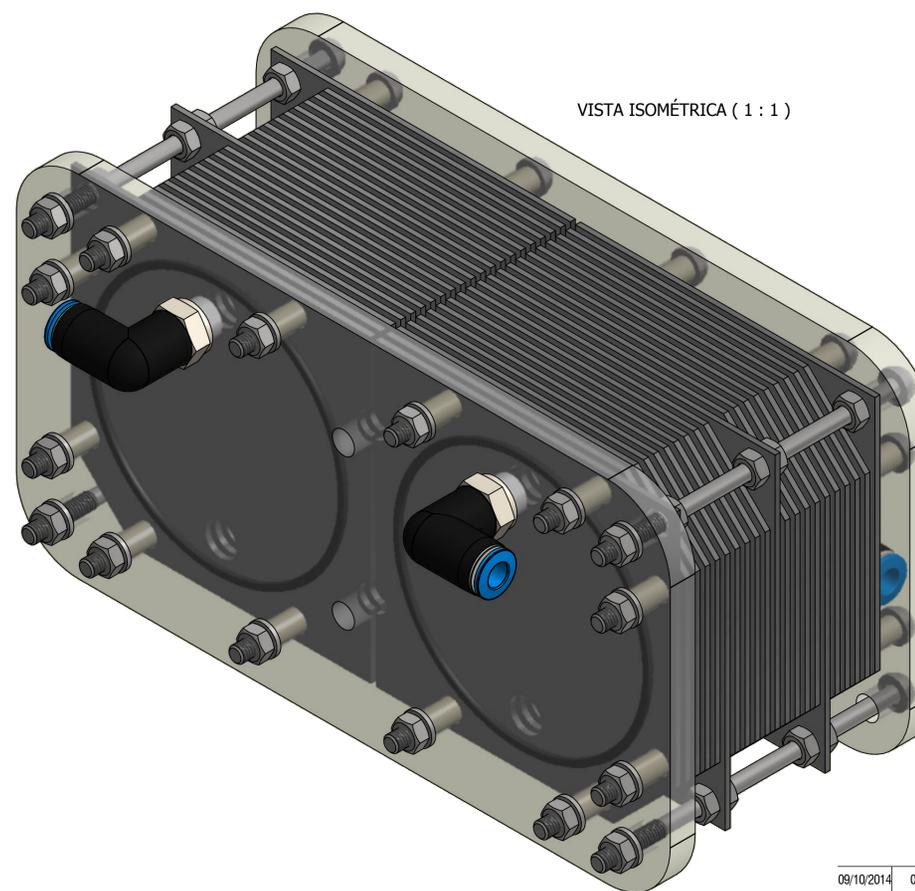
VISTA LATERAL (1 : 1)



VISTA SUPERIOR (1 : 1)



VISTA ISOMÉTRICA (1 : 1)



DIREITOS RESERVADOS - LEI 5772 DE 21/12/71
 A REPRODUÇÃO OU EXECUÇÃO NO SEU TODO OU PARTE DESTE PROJETO, SEM A PRÉVIA AUTORIZAÇÃO DE SEU
 AUTOR, É PROIBIDA SOB AS PENAS DA LEI Nº 5772 DE 21/12/71. A RESPONSABILIDADE POR QUALQUER
 DANOS OU RESPONSABILIDADES POSTERIORES.

Revisão	09/10/2014	09/10/2014	Descrição
 Centrais elétricas do Pará S.A. Núcleo de pesquisa e estudos do nordeste CELPA - NEPEN			
 PROJETO GERADOR HHO			
Responsável Técnico Prof. Gonçalo Rendeiro, Dr. Eng - CREA 35120/PA			
Conteúdo Célula para geração de hidrogênio - HHO		Fase: PROJETO BÁSICO	
Desenvolvimento: Prof. Hendrick Rocha Eng. Mec.		Escala: múltiplas	
Setor: LOCAL DE ABASTECIMENTO DE COMB.		Prancha: <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> 1 / 2 </div>	

