

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR PALOTINA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM BIOCOMBUSTÍVEIS

**ESTUDO SOBRE A COMBUSTÃO DE BLENDA DE
HIDROGÊNIO E DIESEL EM MOTORES CICLO DIESEL**

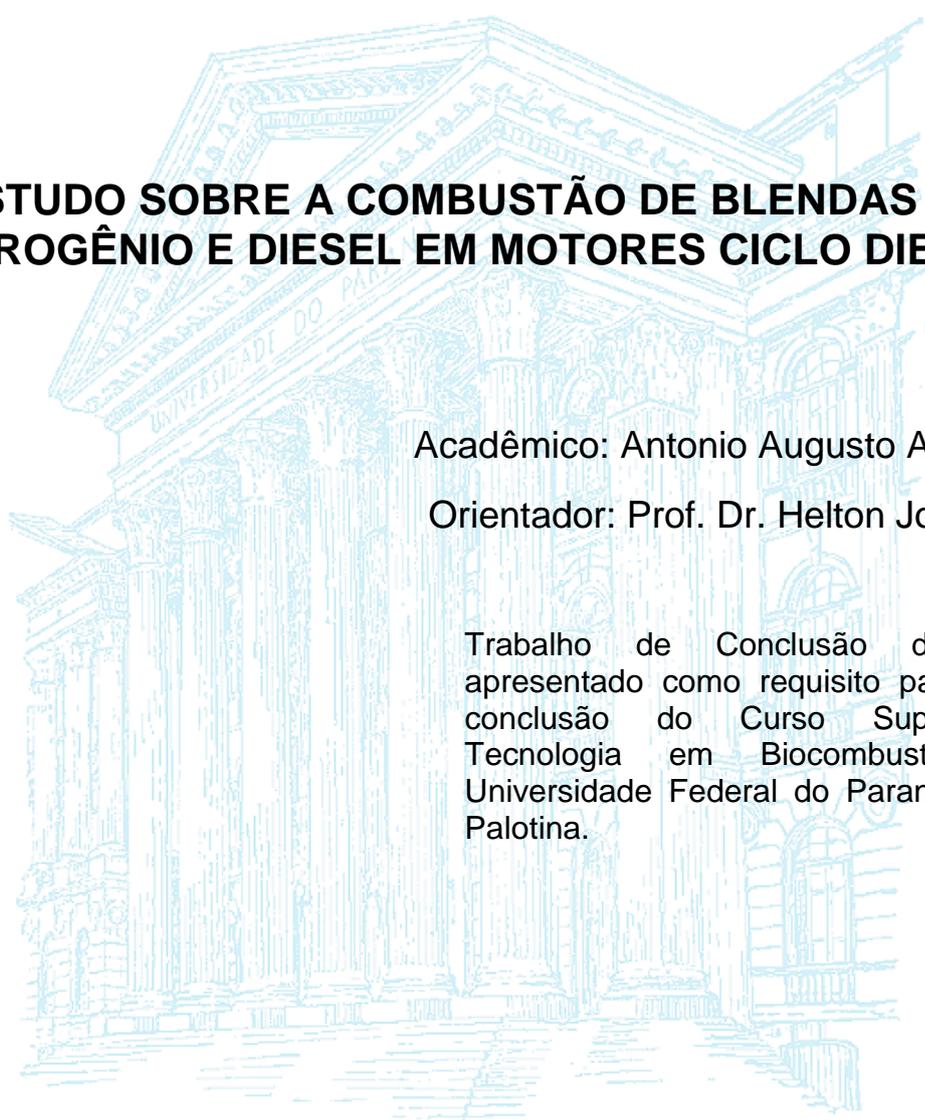
Acadêmico: Antonio Augusto Angheben

Orientador: Prof. Dr. Helton José Alves

PALOTINA - PR
Dezembro de 2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR PALOTINA

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM BIOCOMBUSTÍVEIS



**ESTUDO SOBRE A COMBUSTÃO DE BLENDA DE
HIDROGÊNIO E DIESEL EM MOTORES CICLO DIESEL**

Acadêmico: Antonio Augusto Angheben

Orientador: Prof. Dr. Helton José Alves

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
conclusão do Curso Superior de
Tecnologia em Biocombustíveis da
Universidade Federal do Paraná – Setor
Palotina.

PALOTINA - PR
Dezembro de 2013

Dedico este trabalho à minha família e amigos, de forma especial ao meu pai, minha mãe, meus irmãos e à minha namorada.

“Há homens que lutam um dia e são bons, há outros que lutam um ano e são melhores, há os que lutam muitos anos e são muito bons. Mas há os que lutam toda a vida e estes são imprescindíveis” Bertold Brecht

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a **Deus**, por me conceder o dom da vida e por estar presente a todos os momentos de minha vida.

Aos meus familiares, de modo especial a meu pai **Artemio** e minha mãe **Vera Lúcia** por todo o apoio recebido, e, principalmente pela fonte de força, a qual durante esta caminhada não foi responsável por não me deixar desistir, agradeço todo dia por ter pais como vocês, obrigado. Aos meus irmãos **Luis Henrique** e **João Victor** pelo companheirismo, carinho, alegria e descontração presente em todos os momentos de nosso convívio familiar. As minhas avós **Eloíde** e **Gládis Maria**, bem como meu avô **Emidio** pelos conselhos e apoio recebidos. E em especial a minha namorada, **Amábile**, agradeço por sempre estar presente e dedicando seu tempo à mim, pelo amor, amizade e alegria que todos os dias me motiva a seguir em frente.

Ao Professor Doutor **Helton**, pelo companheirismo e ensinamentos desde o início do curso, os quais foram muito valiosos para meu desenvolvimento acadêmico, além da amizade, compreensão e apoio recebidos.

Aos integrantes do NUPHI - Núcleo de Pesquisas em Hidrogênio do Parque Tecnológico Itaipu, em especial ao **Ricardo José** pela ajuda, companheirismo, amizade e orientação no estágio.

A todos meus amigos, em especial ao **Fábio, Daniel, Geovane, João Carlos Pagnoncelli, Martim e Cristie** pelo companheirismo e momentos de descontração.

A todos meus professores que me ajudaram em minha ampliação de conhecimento, em especial ao professor **Carlos Coimbra** pela dedicação, companheirismo e amizade recebidos ao longo da graduação, aos professores **Joel Gustavo** e **Jonathan**, os quais tive a oportunidade de trabalhar em projetos ao longo da graduação, pelo apoio recebido e amizade.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Óleo Diesel	4
2.1.1. Definição	4
2.1.2. Método de obtenção.....	4
2.1.3. Controle de Qualidade	6
2.2. Motores ciclo Diesel.....	8
2.2.1. Histórico	8
2.2.2. Tipos de motores diesel e seu funcionamento	9
2.3. Hidrogênio	13
2.3.1. Definição	13
2.3.2. Histórico	14
2.3.3. Obtenção a partir da Energia Vertida Turbinável de Itaipu.....	15
2.3.4. Aplicações.....	15
2.3.5. Propriedades físico químicas	16
2.4 Blendagem de hidrogênio e diesel.....	18
2.4.1. Definição	18
2.4.2. Blendagem de diesel e hidrogênio	19
3. OBJETIVOS	23
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
6. CONCLUSÃO.....	34
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Esquema de alguns processos da refinação do petróleo.	5
FIGURA 2. Motor diesel inventado por Rudolf Diesel.	9
FIGURA 3. Funcionamento do motor Diesel 2 tempos: a) 1º tempo; b) 2º tempo. ...	11
FIGURA 4. Funcionamento do motor Diesel 4 tempos: a) admissão; b) compressão; c) combustão; d) escape.	12
FIGURA 5. Esquema de injeção indireta de combustível.....	13
FIGURA 6. Esquema de injeção direta de combustível.	13
FIGURA 7. Sistema de injeção de hidrogênio em motores diesel acoplado ao coletor de admissão.	20
FIGURA 8. Sistema de injeção de hidrogênio acoplado ao motor diesel.	21

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Propriedades físico químicas do diesel comparada a outros combustíveis.	8
TABELA 2. Propriedades físicas do hidrogênio comparadas a outros combustíveis.	17
TABELA 3. Poder calorífico de diferentes combustíveis.	18
TABELA 4. Quilometragens médias rodadas por caminhões em suas respectivas regiões.	26
TABELA 5. Consumo médio de combustível do caminhão Volkswagen 24-250.....	26
TABELA 6. Consumo médio obtido nas misturas de 30% de hidrogênio.	30
TABELA 7. Dimensionamento da mistura e o potencial de Itaipu utilizando rendimento de Saravanan	31
TABELA 8. Dimensionamento da mistura e o potencial de Itaipu utilizando rendimento de Saravanan	32
TABELA 9. Dimensionamento médio da mistura, e o potencial de Itaipu utilizando rendimento dos autores base.	32
TABELA 10. Capacidade de Itaipu em absorver demanda de hidrogênio em litros no ano de 2012.	33

LISTA DE ABREVIações

ANP: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

BDTD: Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações

Denatran: Departamento Nacional de Trânsito

EPE: Empresa de Pesquisa Energética

EVT: Energia Vertida Turbinável

PMQC: Programa de Monitoramento da Qualidade dos Combustíveis

CO₂: Fórmula química do Dióxido de Carbono

CH₄: Fórmula química do Metano

SO₂: Fórmula química do Dióxido de Enxofre

N₂: Fórmula química do gás Nitrogênio

H₂: Fórmula química do gás Hidrogênio

°C: Unidade de Temperatura grau Celsius

K: Unidade de Temperatura Kelvin

(%.V): Porcentagem em Volume

mg/Kg: Miligramas por Quilograma

cm²/s: Centímetros quadrados por segundo

m/s: Metros por segundo

m³: Metros cúbicos

MJ/s: Mega Joules por segundo

MW: Mega Watts

KJ/g: Quilo Joules por grama

Km/L: Quilômetros por Litro

Kw/h: Quilowatts hora

RESUMO

A partir dos grandes problemas atualmente gerados pela elevada utilização de combustíveis fósseis, os quais contribuem para poluição ambiental, tornou-se necessária a procura de novas formas de obtenção de energia, energias estas que devem ter como requisito principal baixos níveis de emissão atmosférica e que possa ser sustentável. Tais ideias inovadoras já despontam como formas alternativas e ecologicamente corretas e diante deste contexto foram descobertos diferenciados tipos de bioenergia, como: i) biometano; ii) bioetanol; e iii) biodiesel; todos estes com o intuito de substituir os combustíveis fósseis e promover a descarbonização dos mesmos, e hoje são amplamente utilizados. Porém, devido a grande demanda de combustíveis fósseis e a pouca utilização das energias renováveis, acredita-se que tais fontes são finitas em relação ao consumo nacional e mundial de energia. Através desta problemática a proposta em questão é através do uso do hidrogênio, combustível gasoso de grande poder calorífico, o qual quando entra no processo de combustão resulta em água, levando em conta que o oxigênio é imprescindível na conversão de energia. Um dos objetivos deste trabalho foi estudar a utilização de hidrogênio na forma de blendas com o óleo diesel para a utilização em motores ciclo diesel, onde a partir de pesquisas foi constatado que sua utilização resulta no aumento da autonomia do veículo automotor que o utiliza, bem como também reduz os problemas de emissões atmosféricas. Outro objetivo é demonstrar a possibilidade de se utilizar a energia vertida turbinável da Usina Hidrelétrica de Itaipu para a produção de hidrogênio e posterior utilização em caminhões.

Palavras chave: Hidrogênio, Combustão, Óleo Diesel, Motores Ciclo Diesel, Energia vertida turbinável

1. INTRODUÇÃO

O atual cenário energético brasileiro concentra-se ainda na larga utilização de fontes não renováveis para suprir a grande demanda energética. Porém, a velocidade com que tais fontes são consumidas não permite que se renovem para que voltem a ser utilizadas, o que se pressupõe que estas se esgotem em um prazo relativamente curto. Este fator está associado à grande poluição ambiental causada pelos combustíveis fósseis, uma vez que a combustão proveniente deste tipo de combustível gera uma quantidade significativa de gases de efeito estufa, sendo os principais constituintes o dióxido de carbono (CO₂) e o dióxido de enxofre (SO₂) (POMPELLI *et al.*, 2011).

Sendo assim, são investigadas fontes alternativas capazes de suprir a demanda energética cada vez mais crescente a partir da utilização de energias consideradas limpas e recicláveis, alavancando as fontes de energia provenientes de fontes renováveis, os chamados biocombustíveis.

Segundo a EPE (2013), através do balanço energético nacional, é demonstrado o consumo final de energias no panorama mundial, o qual demonstra que a maior fonte de energia utilizada atualmente são as energias fósseis, sendo o petróleo o combustível mais utilizado, com cerca de 41,2% do total. As energias renováveis estão na terceira posição de utilização de energia, com cerca de 12,7% do total, na utilização do petróleo que é de cerca de 41,2%, a maior parte deste petróleo, ou seja, cerca de 45,4% é dedicada ao transporte e 19,9% ao uso da indústria.

A poluição veicular gerada pela utilização de combustíveis fósseis é vasta, uma vez que, a facilidade de aquisição de automóveis permite um número cada vez maior destes. No estado do Paraná, no ano de 2012, segundo o IBGE (2012) havia uma frota de cerca de 5.954.243 veículos automotores.

A queima desenfreada de combustíveis de origem fóssil com a finalidade de produzir energia, gera como consequência a emissão de gases poluentes, os quais degradam o meio ambiente e impulsionam a contaminação do ar, agravando ainda mais o efeito estufa, o qual gera o aquecimento global (MELLO, 2007).

Segundo IEA (2009) através do relatório da World Energy Outlook, o qual apresenta diversas projeções, as quais demonstram um acréscimo na demanda energética mundial em torno de 40% até o ano de 2030.

Segundo He *et al.*, (2003) e Lee *et al.*, (2002), motores ciclo diesel são um dos principais contribuintes para as emissões de poluentes, tais como material particulado, óxidos de nitrogênio e óxidos de enxofre que são responsáveis pela chuva ácida e contaminação fotoquímica. Em geral os combustíveis líquidos são derivados principalmente do petróleo bruto (MACALLISTER, 2011).

Os motores ciclo diesel, utilizam como combustível para o seu funcionamento o óleo diesel, um derivado do petróleo, de constituição oleosa, sendo este o produto de maior abundância existente no petróleo, obtido a partir do processo de refino da matéria-prima bruta. Sua composição apresenta, basicamente, hidrocarbonetos (compostos orgânicos que contêm átomos de carbono e hidrogênio) e, em baixas concentrações, enxofre, nitrogênio e oxigênio. É um produto inflamável, com nível médio de toxicidade, pouco volátil, sem material em suspensão, límpido, com cheiro forte e característico (CNT, 2012).

Com o intuito de reduzir a poluição gerada por veículos automotores, tornou-se necessário a pesquisa e o desenvolvimento de novos tipos de energias, energias estas que permitem a mitigação da poluição do meio ambiente. Para isso iniciou-se pesquisas referentes a utilização de combustíveis provenientes de plantas, como é o caso do etanol e de plantas oleaginosas como o biodiesel. Porém, a obtenção e utilização destes dois biocombustíveis ainda não é o suficiente.

A Lei nº 12.490 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) estabelece que os biocombustíveis são substâncias derivadas de biomassa renovável, tal como biodiesel, etanol e outras substâncias que podem ser empregadas diretamente ou mediante alterações em motores à combustão interna ou para outros fins de geração de energia em substituição parcial ou total aos combustíveis derivados do petróleo.

Segundo Santos (2009), o desenvolvimento de combustíveis limpos e fontes energéticas alternativas e sustentáveis é um grande desafio, devido ao aumento da demanda energética atual, pois os combustíveis provenientes de matérias sustentáveis não podem comprometer o desenvolvimento humano, já que os biocombustíveis de maior ênfase são produzidos a partir de matérias-primas utilizadas na alimentação humana.

Sabendo disso, tornou-se necessária a utilização de outra matriz energética, de uma matriz que não afetaria a alimentação humana, além também de um biocombustível que amenizasse as atuais poluições causadas pelos combustíveis fósseis. A partir deste apelo está sendo indicada uma nova forma de se utilizar um

combustível gasoso, de grande abundância no planeta terra e que não possuísse carbono em sua estrutura, o hidrogênio (SARAVANAN, 2010).

O hidrogênio é um elemento químico muito simples e de baixa massa molecular. Em temperatura ambiente e pressão atmosférica este elemento não costuma ser inflamável ou tóxico sendo inodoro e incolor, além também de ser um combustível que quando entra em combustão resulta na formação de água. Reações de dissociações são necessárias com propósito de liberar o hidrogênio de fontes primárias (Santos & Santos).

Segundo Barreto (2003) o conceito de utilizar o hidrogênio como combustível alternativo para motores diesel é recente. A temperatura de auto ignição do hidrogênio corresponde a 858 K, ou seja, de 585 °C. Devido a sua alta temperatura de auto ignição, torna-se inválida a utilização de somente hidrogênio na combustão em motores ciclo diesel.

Para a utilização do hidrogênio em motores diesel é necessário o seu enriquecimento através da utilização de outros compostos, compostos estes com grande inflamabilidade e poder de auto ignição de menor temperatura, porém, sabe-se que o hidrogênio encontra-se em fase gasosa. A partir disso, iniciou-se a sua injeção diretamente ao ar que entra no motor para completar a combustão do diesel, onde somente haverá o encontro dos combustíveis na câmara de combustão, fazendo neste modo, com que o diesel continue sendo o combustível principal devido a este possuir menor temperatura de auto ignição, tornando-se assim o combustível piloto (BUCKEL, 1996).

Os motores que utilizam hidrogênio enriquecido, ou seja, blendagens de combustível diesel com hidrogênio produzem aproximadamente a mesma força e rendimento térmico e eficiência dos motores diesel mais elevados (HARAGOPALA RAO, 1983).

A partir deste panorama, é possível, através de blendas, a mitigação de emissão de poluentes, contribuindo para a conservação do mesmo o melhor aproveitamento energético dos combustíveis utilizados e a descarbonização dos combustíveis. Foi realizado este estudo com o intuito de demonstrar que a utilização de hidrogênio em motores diesel pode permitir a amenização das emissões de poluentes atmosféricos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Óleo Diesel

2.1.1. Definição

Óleo Diesel é um combustível oleoso, derivado do petróleo, inflamável, de baixa volatilidade, límpido, isento de material em suspensão, levemente tóxico e com odor forte e característico, sendo constituído basicamente por hidrocarbonetos, ou seja, é um composto formado principalmente por átomos de carbono e hidrogênio, além de pequenas concentrações de enxofre, nitrogênio e oxigênio, os quais conferem características de ignição e de escoamento adequadas ao funcionamento dos motores diesel (BORSATO, 2009).

O óleo diesel é utilizado em motores de ignição por compressão (motores ciclo diesel) e em motores de combustão interna, os quais são empregados nas mais diversas e variadas aplicações, como: motores estacionários (produção de energia elétrica por geradores, por exemplo), aplicação também em ônibus, caminhões, veículos de passeio ou utilitários, pequenas embarcações marítimas, locomotivas e navios.

2.1.2. Método de obtenção

O processo de obtenção do diesel ocorre a partir do refino do petróleo, consistindo em um processo de beneficiamento do petróleo bruto, onde ocorre a separação das diversas frações desejadas para posterior processamento e industrialização dos subprodutos, os quais, após este processo podem ser vendidos (PETROBRÁS, 2004).

Segundo Baptista (2009), existem hoje vários processos de refino de petróleo, os quais são utilizados nas indústrias petrolíferas mais modernas, e dentre os processos destacam-se: destilação atmosférica e a vácuo, polimerização, craqueamento, alquilação, dessulfurização, dessalinização e desidratação.

Na Figura 1 são apresentados alguns dos processos de refino do petróleo.

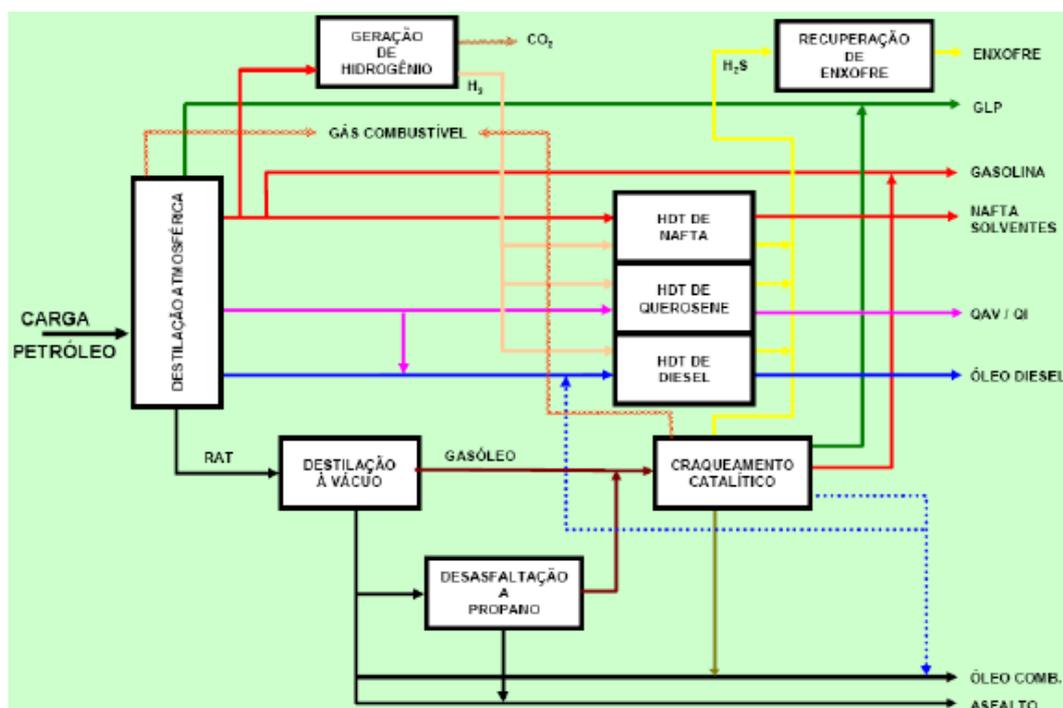


FIGURA 1. Esquema de alguns processos da refinação do petróleo. BAPTISTA (2009)

A destilação é a primeira etapa do processo de refino, onde o petróleo é fracionado e aquecido dentro de uma torre de destilação, onde, com a elevação das temperaturas os hidrocarbonetos entram em ebulição fazendo com que os hidrocarbonetos gasosos subam pela torre de destilação, passando por pratos perfurados, que possuem por finalidade a condensação e posterior separação dos produtos pelo seu grau de volatilização. Nesta etapa do processo são extraídos gases combustíveis, GLP, gasolina, nafta, querosene, solventes, óleo diesel e um resíduo, o qual pode ser extraído no fundo da torre.

O resíduo proveniente da destilação atmosférica é posteriormente reaquecido em outra torre de destilação, onde será realizado o processo de destilação a vácuo, onde novamente ocorrerá seu fracionamento, porém agora em pressões abaixo da pressão atmosférica, havendo, a partir deste segundo processo, a obtenção de óleo diesel e gásóleo.

Este pode ser utilizado como matéria-prima para a produção de gases combustíveis, como é o caso do GLP e da gasolina. Os resíduos provenientes desta destilação poderão ser utilizados para a confecção de asfalto ou como óleo combustível pesado.

O craqueamento é outro processo de refino de petróleo, o qual faz com que as moléculas de hidrocarbonetos pesados quebrem-se, convertendo-se em gasolina e outros destilados com maior valor comercial.

O processo de craqueamento pode ser dividido em dois tipos, sendo eles térmico ou catalítico. O processo térmico faz com que ocorra a conversão de moléculas grandes em moléculas menores através do calor e altas pressões. Já o processo catalítico, além de utilizar altas temperaturas para o processo, este utiliza catalisadores como: platina, alumina e sílica, porém, ao invés de utilizar altas pressões como o craqueamento térmico, este utiliza pressões mais baixas.

Os processos de polimerização e alquilação são processos que possuem por finalidade o melhor aproveitamento dos hidrocarbonetos presentes no petróleo, ocasionando assim a melhora na qualidade e maior octanagem do combustível gerado.

Outros processos como a dessulfurização, dessalinização e a desidratação tem por finalidade a melhora da matéria-prima para a produção de produtos finais com maior qualidade.

2.1.3. Controle de Qualidade

Para que o combustível utilizado nos motores ciclo diesel obtenha os melhores rendimentos sem prejudicar o motor e que esteja em conformidade com a legislação vigente, é necessário que o combustível atenda alguns requisitos de qualidade (QUELHAS *et al.*, 2011):

- Boa qualidade de ignição;
- Ser estável à oxidação;
- Não ser corrosivo, permitindo maior tempo de vida às peças do motor;
- Oferecer segurança no manuseio e no armazenamento;
- Vaporizar-se adequadamente no interior da câmara de combustão;
- Apresentar combustão de forma limpa e completa;
- Proporcionar boa partida a frio do motor;
- Apresentar ausência de água e/ou materiais em suspensão.

O diesel para ser comercializado no país deve atender a uma série de especificações, as quais são atribuídas por um órgão regulador responsável, a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), de origem

nacional para o controle de qualidade a partir do Programa de Monitoramento da Qualidade dos Combustíveis (PMQC), (BRASIL, 2011a).

As especificações adotadas pela ANP são atualizadas conforme necessidade de abastecimento, atendimento a requisitos ambientais, atualização de normas entre outros.

A Resolução ANP Nº 65, DE 9.12.2011 - DOU 12.12.2011 (BRASIL, 2011b) é a mais recente, onde segundo a legislação classifica os tipos de óleo diesel de uso rodoviário em:

- Óleo diesel tipo A: é um combustível diesel produzido por processos de refino de petróleo, centrais de matérias-primas petroquímicas as quais são destinadas a veículos dotados de motores do ciclo diesel, de uso rodoviário, sem adição de biodiesel;
- Óleo diesel tipo B: óleo diesel do tipo A ao qual recebe a adição de biodiesel no teor estabelecido pela legislação vigente.

A partir desta classificação, o aumento da frota de veículos, e o aumento das taxas de poluição atmosférica tornou-se uma realidade à criação de novos tipos de diesel, onde a partir de 1º de Janeiro de 2012, os óleos diesel tipo A e B apresentam as seguintes nomenclaturas, conforme o teor máximo de enxofre:

- Óleo Diesel A S-10 e B S-10: combustíveis com teor de enxofre, máximo, de 10 mg/Kg;
- Óleo Diesel A S-50 e B S-50: combustíveis com teor de enxofre, máximo, de 50 mg/Kg;
- Óleo Diesel A S-500 e B S-500: combustíveis com teor de enxofre, máximo, de 500 mg/Kg;
- Óleo Diesel A S-1800 e B S-1800: combustíveis com teor de enxofre, máximo, de 1800 mg/Kg.

Os parâmetros a serem avaliados do combustível para posterior certificação e futura venda são: Aspecto, Cor, Teor de Biodiesel, Enxofre total, Massa específica a 20 °C, Ponto de fulgor, Viscosidade a 40°C, Número de Cetano, Ponto de entupimento de filtro a frio, Resíduo de Carbono, Cinzas, Corrosividade ao cobre, Teor de água, Contaminação total, Hidrocarbonetos poli cíclico aromático, Estabilidade à oxidação, Lubricidade, Índice de neutralização, Condutividade elétrica e Teor de água e sedimentos.

O óleo diesel é o combustível de maior oferta quando realizado os processos para a obtenção de combustíveis através do petróleo, possui propriedades físico - químicas próprias, como demonstrado na tabela a seguir:

TABELA 1. Propriedades físico químicas do diesel comparada a outros combustíveis. Souza (2005), Saravanan (2010).

Propriedades	Diesel	H2	Gasolina
Temperatura de auto ignição (°C)	257	585	257
Temperatura de chama (°C)	1200	2.045	2.200
Limite de ignição no ar (% v.)	0,7 - 5	4 - 75	1,0 - 7,6
Velocidade de propagação da chama no ar (m/s)	0,3	2,65	0,4
Coeficiente de difusão no ar (cm²/s)	-	0,61	0,05
Toxicidade	Sim	Não	Sim

2.2. Motores ciclo Diesel

2.2.1. Histórico

O primeiro modelo de motor em que ocorre a combustão através da pressão e auto ignição do combustível o qual funcionou de forma eficiente foi em 10 de agosto de 1893, foi o motor de ciclo Diesel, o qual recebeu este nome devido a seu inventor Rudolf Diesel.

Este motor se baseava na combustão de óleo de amendoim, o qual antes de ser injetado no motor passava por um processo de transesterificação do óleo, o qual obteve grande renome a partir de observar que o mesmo funcionava de forma eficiente e que possuía um melhor rendimento energético se comparado a outros tipos de motores. (KNOTHE, 2006).

Diesel não criou somente seu motor, como demonstrado na figura 2 para utilizar óleo de amendoim, mas para utilizar materiais como pó de carvão até óleo vegetal a fim de que fosse utilizado seu motor de forma que o usuário acreditasse ser mais conveniente e barato para seus negócios. Porém somente após seu falecimento que os motores se tornaram primariamente movidos a óleo, devido ao crescente poder econômico e político da indústria petrolífera (BAPTISTA, 2009).



FIGURA 2. Motor diesel inventado por Rudolf Diesel. INFOMOTOR (2009).

A evolução do motor diesel o transformou em uma máquina amplamente utilizada e rentável, tanto do ponto de vista do preço do combustível por litro, como no rendimento que o motor apresenta. Foi sucesso na Europa, porém, ao alcançar o mercado americano seu sucesso foi moderado, devido a este mercado optar pelo uso de motores à gasolina, mesmo havendo maior consumo de combustível e menores rendimentos.

A partir de 1913 houve grande expansão na utilização de motores diesel, sendo, inclusive sendo construído por Hugo Junkers um avião à diesel. No ano de 1914 o primeiro trem à diesel começou a ser utilizado na Alemanha. (BAPTISTA, 2009).

Com o avanço das tecnologias novas aplicações foram dadas aos motores diesel, sendo que hoje, todos os veículos de uso pesado, agrícola e até alguns tipos de veículos leves possuem motores ciclo diesel, mostrando assim que são motores bons e duráveis, não necessitam de muita manutenção e possuem boa economia de combustível.

2.2.2. Tipos de motores diesel e seu funcionamento

Existem hoje dois tipos de motores diesel, sendo eles, o motor diesel de 2 tempos e o motor diesel de 4 tempos, os quais possuem a mesma finalidade, que é a transformação de energia térmica (calorífica) em trabalho mecânico (energia mecânica) (UFPEL, 2013).

O motor diesel de 2 tempos é um motor que possui cilindros que farão com que o motor funcione a partir de somente dois tipos de tempos, ou seja, ocorrerá somente o tempo da admissão e o tempo de escape, os quais ocorrerão ao mesmo tempo da compressão e expansão.

Segundo UFPEL (2013), no 1º tempo, o pistão faz seus movimentos de forma descendente, e descobre as janelas de admissão, fazendo assim com que ocorra a entrada de ar no sistema, o qual está sendo empurrado por um soprador. O ar ao entrar no sistema faz com que os gases queimados sejam expulsos através das válvulas de escape, fazendo assim com que ocorra a limpeza do cilindro, deixando-o com ar limpo para a próxima combustão.

No 2º tempo, o pistão faz movimentos de forma ascendente, fechando as janelas de admissão e válvulas de escape, o ar limpo admitido do 1º tempo então é submetido à compressão.

Ao iniciar a compressão do ar limpo, uma certa quantidade de óleo diesel é atomizada na câmara de combustão, devido ao local encontrar-se em alta compressão do ar e a altas temperaturas, o combustível entra em combustão, ocasionando pressão e expansão da reação, fazendo assim com que o pistão seja impulsionado para baixo, no curso da expansão.

Quando o pistão estiver na metade do curso descendente, as válvulas de escape se abrirão fazendo assim com que os gases resultantes sejam expelidos pelo coletor de escapamento, quando o pistão estiver no curso descendente, as janelas de admissão novamente encontrar-se-ão abertas, fazendo assim que entre novamente ar limpo para iniciar novamente o ciclo. Segue abaixo a Figura 3 referente ao sistema do motor de 2 tempos.

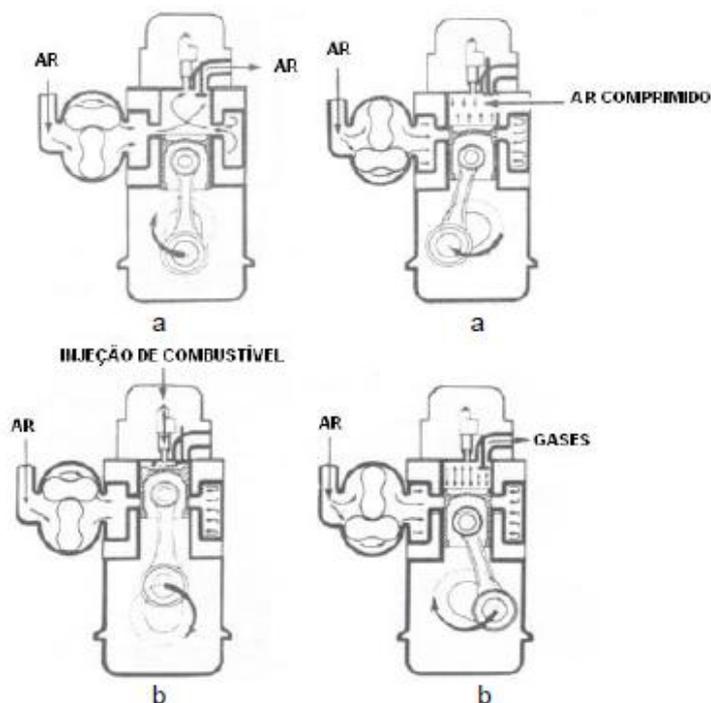


FIGURA 3. Funcionamento do motor Diesel 2 tempos: a) 1º tempo; b) 2º tempo. UFPEL (2013).

O motor 4 tempos, é hoje o motor mais utilizado em veículos diesel, por ser 4 tempos, sabe-se que todo o processo de conversão de energia térmica em energia mecânica possui 4 fases distintas em seu funcionamento, onde estas são:

1ª – Admissão;

2ª– Compressão;

3ª– Combustão;

4ª– Escape.

Segundo Ferreira (2013), a partir destas 4 fases, este tipo de motor diesel possui seu funcionamento, onde em cada fase ocorrem diferentes situações. Na admissão, o pistão faz movimentos descendentes, ocasionando assim a abertura da válvula de admissão de ar e o fechamento da válvula de escape. Ao realizar este movimento o pistão cria uma depressão do sistema, fazendo assim com que o ar entre no cilindro de combustão.

Após o movimento de admissão, inicia-se o movimento de compressão, onde o pistão estará fazendo movimentos ascendentes, onde o ar presente no interior será comprimido, até ocupar o volume da câmara de combustão, devido ao

sistema fazer com que ocorra a compressão. O ar presente sofrerá aumento da temperatura e pressão, sendo aquecido. No final do processo de compressão o bico injetor de combustível injeta óleo diesel na forma pulverizada no interior da câmara de combustão iniciando assim a combustão.

Na fase da combustão, as válvulas de admissão e escape se encontram fechadas. Devido a isto e a rápida explosão do combustível, é gerado pressão no sistema, fazendo assim com que o pistão seja empurrado para baixo pela expansão dos gases queimados, ocasionando assim o movimento de rotação do motor.

E na fase de escape, a válvula de escape encontra-se aberta quando o pistão sobe na câmara, fazendo assim com que os gases provenientes da combustão sejam expelidos do sistema, para que assim inicie-se novamente o ciclo. Na Figura 3, observa-se as fases do motor 4 tempos.

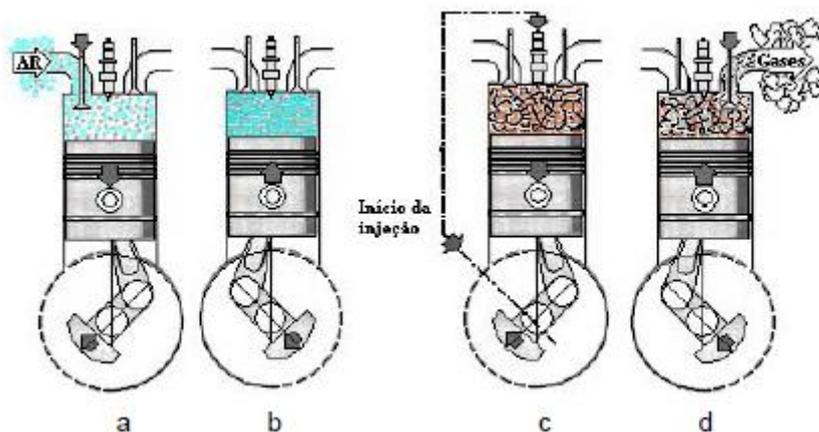


FIGURA 4. Funcionamento do motor Diesel 4 tempos: a) admissão; b) compressão; c) combustão; d) escape. UFPEL (2013).

2.2.3. Tipos de injeção de combustível em motores diesel

Em motores diesel há dois tipos de injeção de combustível, sendo o sistema de injeção direta e indireta. No modelo de injeção indireta (Figura 5), a injeção do combustível ocorre em uma pré-câmara, onde após o processo de compressão o combustível entra na câmara de combustão.

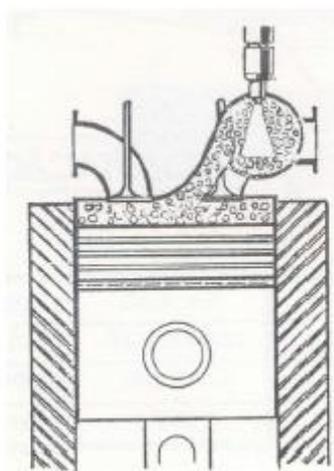


FIGURA 5. Esquema de injeção indireta de combustível. UFPEL (2013)

Em modelos de motor onde a combustão é por via de injeção direta (Figura 6), a injeção se dará diretamente encima da câmara de combustão.

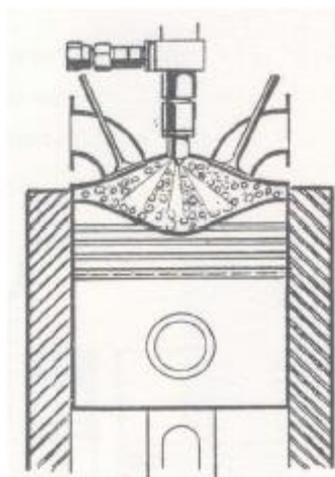


FIGURA 6. Esquema de injeção direta de combustível. UFPEL (2013).

2.3. Hidrogênio

2.3.1. Definição

Segundo Souza (2009), dentre as possibilidades existentes atualmente, o hidrogênio (H_2) compõe uma das fontes de energia alternativa considerada limpa e renovável. Por ser um dos elementos mais abundantes do universo na forma de (H) que não se encontra na forma apropriada de utilização como combustível, o

hidrogênio pode vir a representar uma alternativa energética do futuro, e corresponde a cerca de 75% de sua massa no planeta Terra, contudo, deve-se levar em conta que apenas a forma atômica, a qual é amplamente encontrada na natureza não pode ser aplicada em combustíveis, e sim a forma molecular (H_2). O hidrogênio se encontra presente em cerca de 70% da superfície terrestre, como constituinte de diversos compostos, podendo ser em compostos orgânicos, como a água, que é um produto que não apresenta toxicidade e não polui o meio ambiente. Sua combustão resulta em água, além de possuir vários processos de obtenção com o uso de diferentes matérias-primas.

2.3.2. Histórico

Segundo Rifkin (2003), o hidrogênio foi identificado pela primeira vez pelo cientista britânico Henry Cavendish em 1776, através de uma reação entre um ácido e um metal o qual, durante a reação, liberou um gás, onde denominou sua descoberta de ar inflamável.

No ano de 1783, em Paris, Jacques Charles realizou uma "façanha" a partir da utilização do hidrogênio, pairando a 915 metros de altura em um balão, o qual era composto de sacos de seda revestidos de borracha e possuía como gás de enchimento o hidrogênio, que possui como propriedade química ser menos denso que o ar. A partir desse momento iniciaram-se pesquisas referentes a utilização do hidrogênio em veículos, devido a este ser menos denso que o ar (H2BRASIL,2011).

No início do século XX já era existente a produção em escala industrial deste gás, sendo este já utilizado por sistemas de transportes, onde era utilizado no transporte aéreo, através dos dirigíveis, onde o hidrogênio tinha como finalidade ser gás de sustentação (H2BRASIL, 2011).

Com o passar do tempo o gás de sustentação dos dirigíveis foi sendo substituído pelo gás hélio, que nada mais é do que a fusão de moléculas de hidrogênio, além de que com o passar do tempo acabou-se a época dos mesmos. Porém, o hidrogênio obteve novas formas de aplicação, com a possibilidade de ser utilizado nos mais variados tipos de indústria, sendo associado a outros compostos.

2.3.3. Obtenção a partir da Energia Vertida Turbinável de Itaipu

Existem vários processos de obtenção de hidrogênio, processos que adentram a produção de hidrogênio com diferentes matérias-primas, além de diferenciados rendimentos, sendo a eletrólise da água um processo simples de produção de hidrogênio. Como o processo de eletrólise utiliza energia e água para a produção de hidrogênio, é de extrema vantagem que o processo de produção de hidrogênio eletrolítico seja em um local com disponibilidade de água.

Para a construção de uma usina hidrelétrica é necessário que as condições geográficas sejam ideais, como é o caso da Usina Hidrelétrica de Itaipu, instalada no rio Paraná, localizada na cidade de Foz do Iguaçu, na divisa entre Brasil e Paraguai.

Itaipu é a hidrelétrica de maior produção de energia elétrica mundial. Possui 20 unidades geradoras de energia elétrica com 14.000 MW de potência instalada, responsável pelo fornecimento de 17,3% da energia consumida no Brasil e 72,5% da energia consumida no Paraguai, sendo abastecida por um reservatório de 1.350 km² de área inundada, correspondendo ao sétimo maior do Brasil, mas dispõe do melhor índice de aproveitamento da água para produzir energia entre os grandes reservatórios brasileiros. (ITAIPU, 2013).

Há épocas do ano em que o reservatório, devido aos maiores índices pluviométricos, apresenta um aumento da quantidade de água no reservatório, sendo assim necessário seu escoamento através do vertedouro. Toda a água escoada pelo vertedouro não é aproveitada, ou seja, não possui nenhum fim energético, ocorrendo assim o desperdício de energia, e essa energia é denominada de Energia Vertida Turbinável.

A Usina Hidrelétrica de Itaipu, segundo Carnieletto (2011), tem como o resultado da média obtida do período de 12 anos de 4.109.715 Kwh (Quilowatts hora), ou segundo Bach (2013), um total de 87.433.715 quilos de hidrogênio. Já no ano de 2012, devido ao aumento de produção de energia elétrica a Energia Vertida Turbinável foi menor, sendo possível produzir 24.595.744 quilos de hidrogênio.

2.3.4. Aplicações

Segundo Hytron (2013), H₂ Nitidor (2012) e Ticianelli (2005), o hidrogênio possui diversas aplicações, das quais muitos produtos hoje utilizados cotidianamente utilizamos, por exemplo:

- Em atmosfera controlada de fornos para a indústria metalúrgica, no processo de recozimento, sinterização, redução e auxílio nas atmosferas protetoras do processo de obtenção de metais;
- No acabamento de peças metálicas através de rebarbamento explosivo;
- Na hidrogenação de óleos e gorduras que são produzidos na indústria petroquímica, química e alimentícia;
- Na produção de "suavizadores artificiais", tais como manitol, sorbitol, que são utilizados na produção de produtos como o creme dental e Peróxido de Hidrogênio;
- Na produção e corte de vidro laminado, onde utiliza-se um gás de mistura de N₂ + H₂);
- Na produção, corte e soldagem de vidros especiais (quartzo, fibras óticas);
- Em soldagem e corte de metais nobres;
- No arrefecimento de geradores elétricos de elevada potência;
- Em Insumos químicos para indústrias farmacêuticas;
- Em processos termoquímicos como: Síntese de amônia, Hidrocraqueamento de petróleo, na síntese de metanol e de alguns derivados, na síntese de cicloexano, na produção de ácido clorídrico e ferro-esponja, na indústria de Fibras; e produção de policarbonatos, poliuretanos, ácido fórmico e na produção de Poliamida Polímero 6 (Nylon®)

Além também de ser utilizado como vetor energético para a geração de energia elétrica para veículos, motores estacionários ou equipamentos portáteis.

2.3.5. Propriedades físico químicas

Segundo Lora (2012), o hidrogênio é um elemento químico simples, constituído por um próton e um elétron, mas ao se observar seu potencial energético, este representa toda a fonte de energia advinda do sol, sendo este um

gigantesco reator que possui como constituição a mistura gasosa de hidrogênio e hélio. O hidrogênio, é inodoro, incolor e não tem sabor.

Segundo Souza (2009), o hidrogênio é um combustível seguro, pois possui propriedades físicas que demonstram que sua temperatura de ignição é mais elevada quando comparada a outros combustíveis, além de possuir grande poder de difusão no ambiente, além de não apresentar toxicidade, fazendo com que apresente baixa periculosidade. Na Tabela 2 a seguir são demonstradas as propriedades físicas do hidrogênio.

TABELA 2. Propriedades físicas do hidrogênio comparadas a outros combustíveis. Adaptado (SOUZA, 2009), (SARAVANAN, 2010).

Propriedades	H₂	CH₄	Gasolina
Temperatura de auto ignição (°C)	585	540	257
Temperatura de chama (°C)	2.045	1.875	2.200
Limite de ignição no ar (% v.)	4 - 75	5,3 – 15	1,0 - 7,6
Velocidade de propagação da chama no ar (m/s)	2,65	0,4	0,4
Coefficiente de difusão no ar (cm²/s)	0,61	0,16	0,05
Toxicidade	Não	Não	Sim

Pode-se notar a grande temperatura a qual o hidrogênio necessita para a auto-ignição, e caso este combustível fosse utilizado de forma única para a sua combustão em motores de combustão interna, seria necessário grande quantidade de energia para se iniciar o processo.

O Hidrogênio por ter um potencial vetor energético, tem tornado-se um substituinte promissor dos combustíveis fósseis por apresentar alta densidade energética, aproximadamente 2,75 vezes maior que o petróleo, por ser inesgotável, já que o elemento hidrogênio é o mais abundante do planeta, e pela sua combustão da qual é liberada apenas energia e vapor de água (BOTTA, 2012).

O Hidrogênio tem elevado poder calorífico, sendo o maior de todo e qualquer combustível já utilizado, inclusive é três vezes mais energético que a gasolina, como pode ser visualizado na Tabela 3.

TABELA 3. Poder calorífico de diferentes combustíveis. SANTOS, 2009.

Combustível	Valor do Poder Calorífico	Valor do Poder Calorífico
	Superior (a 25° e 1atm)	Inferior (a 25° e 1atm)
	(KJ/g)	(KJ/g)
Hidrogênio	141,86	119,93
Metano	55,53	50,02
Propano	50,36	45,6
Gasolina	47,5	44,5
Gasóleo	44,8	42,5
Metanol	19,96	18,05

2.4 Blendagem de hidrogênio e diesel

2.4.1. Definição

Segundo Bueno (1965) Blendagem significa homogeneizar um produto ou uma substância. Este termo é bastante utilizado quando é realizado a mistura de minérios, porém também pode ser utilizado o termo para a mistura de combustíveis.

2.4.2. Blendagem de diesel e hidrogênio

Consiste na mistura do combustível de origem fóssil denominado óleo diesel ao hidrogênio, um gás que pode ser retirado de diversos elementos naturais. Acredita-se que não é possível realizar as misturas dos mesmos em um tanque de armazenagem devido as suas diferentes fases e poder ser utilizado no processo de combustão posteriormente em motores ciclo diesel.

Porém, pode ser utilizado os dois combustíveis no mesmo motor no processo de combustão, onde podem ser injetados os dois combustíveis de forma separada, ocorrendo somente o encontro entre os dois combustíveis (hidrogênio e diesel) na câmara de combustão (MASOOD, 2007).

Na literatura há diversos trabalhos que fazem referência ao assunto, onde segundo Saravanan (2008), é possível a utilização do hidrogênio em motores ciclo diesel, porém somente pode ser utilizado se houver uma combinação com outros combustíveis, devido ao hidrogênio possuir alta temperatura e sua auto-ignição ocorrer em torno de 858 Kelvin, ou seja, 585 °C, para que se tenha início a combustão.

Os rendimentos referentes às misturas de diesel e hidrogênio são variados, onde geralmente são analisados diferentes parâmetros, tais como:

- Eficiência Energética;
- Quantidade de emissões geradas na combustão;
- Quantidade de fumaça gerada;
- Pressão no sistema.

Os motores ciclo diesel normalmente utilizados para os testes são motores estacionários interligados a dinamômetros, os quais têm a finalidade de gerar dados e gráficos referentes aos desempenhos obtidos nos referidos testes, havendo a possibilidade de serem utilizados veículos com motores ciclo diesel que possuem equipamentos específicos para a coleta dos dados.

O hidrogênio misturado ao óleo diesel pode ser utilizado em motores de combustão interna por proporcionar maior eficiência do motor, menor consumo de combustível, segundo alguns pesquisadores, e consumo igual, perante outros pesquisadores. Ocorre também diminuição da taxa de emissão de gases poluentes e maior eficiência térmica dos motores (CARNIELETTO, 2011).

Em testes realizados por Saravanan (2008 a) e Lata (2011) em motores estacionários de ciclo diesel utilizando diferenciadas misturas de hidrogênio, obteve-se como resultado o aumento da pressão nos motores quando foi iniciado a injeção de hidrogênio ao sistema, sendo que os melhores rendimento térmicos dos motores foram quando a mistura era em torno de 30% do volume da injeção, além dos ganhos em rendimento térmico, na redução da fumaça e partículas proveniente da combustão e redução das emissões de gases tóxicos devido a utilização da mistura dos combustíveis.

Testes realizados por Morais (2013) em um gerador de energia de 50 w movido a diesel, ao qual foi adaptado um sistema de injeção direta de hidrogênio no coletor de admissão daquele motor, como demonstrado na figura 7, onde foram assim realizados testes de diferentes proporções, obtendo-se resultados que mostram que a substituição parcial de óleo diesel por hidrogênio, nas condições de teste não afetam significativamente o consumo do combustível específico e a eficiência efetiva do motor. Como resultado, foram diminuindo a partir destes testes as emissões de gases em aproximadamente 12%.



FIGURA 7. Sistema de injeção de hidrogênio em motores diesel acoplado ao coletor de admissão. Morais (2013)



FIGURA 8. Sistema de injeção de hidrogênio acoplado ao motor diesel. Morais (2013)

Segundo Wu (2012), o qual realizou variados testes de injeção de hidrogênio aos motores ciclo diesel aplicados ao método de Taguchi, que é um método de análise de parâmetros para descobrir qual a melhor mistura dos combustíveis a ser realizada, a qual também reduz o tempo de experimento, sem a necessidade de se realizar diversos testes. Wu obteve cerca de 67% de economia de tempo nos testes.

Wu concluiu em seu trabalho que os melhores rendimentos apresentados na combustão dos dois combustíveis foi a utilização de 30% de hidrogênio em volume juntamente ao diesel, o qual teve melhor redução de poluição, sendo de aproximadamente 14,52% e redução na emissão de fumaça em torno de 42,28%. Em questão da pressão do sistema, ocorreu uma elevação da mesma quando foi injetado o hidrogênio, com aumentos na faixa de 13 a 17%.

Para Saravanan (2009), que realizou testes em um motor diesel onde obteve resultados que demonstraram que a adição de hidrogênio ao diesel obteve melhor rendimento do motor, com cerca de 15% a mais de rendimento, sendo que houve a redução também dos níveis de emissão de gases poluentes, já os níveis de emissão de fumaça apresentaram redução próxima de 100%.

Foram realizados outros testes, onde Saravanan (2008 b) utilizando motores e uma mistura bicombustível de hidrogênio e diesel, testou diferentes proporções com a obtenção de resultados diferenciados, sendo o aumento da temperatura do sistema em 20%, porém com um aumento da eficiência do motor entre 22 a 35%, dependendo da mistura. Em questão dos níveis de pressão do sistema ao injetar o hidrogênio, foi em torno de 80% maior devido ao aumento da temperatura, em

relação aos níveis de emissões geradas pelo motor houve uma redução média entre todas as porcentagens de mistura, sendo em torno de 26, 2%.

Masood (2006) realizou testes em motores utilizando variações nas porcentagens de hidrogênio que entraram em combustão com o diesel, variando nas proporções entre 20 a 80 % de hidrogênio, onde obteve como resultados o aumento de pressão do sistema em torno de 17% e aumento da eficiência térmica em torno de 19%.

Wang (1985) também realizou testes experimentais em motores diesel na época, onde pode perceber que dependendo da quantidade de carga do motor melhor era o rendimento do hidrogênio neste, sabe-se que Wang realizou variados testes, mostrando que quando a carga do motor na mistura de hidrogênio e diesel era em torno de 50% a energia liberada pelo hidrogênio era cerca de 13,4%, já em cargas no motor de 70% a 100% a energia liberada era de 10,1% e 8,4% respectivamente, comprovando assim que para melhor aproveitamento da energia do hidrogênio é necessário é utilização de quantidades menores de combustível no motor.

Shirk (2008) realizou experimentos com um veículo de passeio leve movido a diesel, onde foi testado o motor deste veículo em um dinamômetro pela primeira vez, utilizando as proporções de 0%, 5% e 10% de hidrogênio. Foram coletados os dados de consumo de combustível, concentração NOx no escape e temperatura de exaustão.

Logo após foi realizado outro teste com os mesmos parâmetros e proporções, porém o teste foi realizado na área urbana. Com resultados obtidos a partir dos testes foi possível verificar que em ambos os testes a adição de hidrogênio não resultou em diferenças perceptíveis na eficiência do motor. Também não foram notadas diferenças de dirigibilidade, ocorrendo somente pequenas reduções de emissões de NOx e aumento da temperatura do motor quando houve a adição do hidrogênio.

Saravanan (2010) realizou novamente testes em motores diesel fazendo a utilização do modo bicomcombustível, ou seja, a injeção de dois combustíveis, onde fez-se a injeção de hidrogênio e diesel, obtendo-se o melhor desempenho naquele motor e com o aumento de eficiência térmica em torno de 17%, e índices de inflamabilidade superiores a outros testes. Além, também, de obter menores índices de emissão de fumaça, que foram em torno de 44% menores.

3. OBJETIVOS

O objetivo principal foi demonstrar a potencialidade do hidrogênio (H₂) como combustível em blenda a combustível diesel, apresentando a economia de combustível fóssil que pode ser gerada, caso seja utilizada esta tecnologia, bem como a utilização da EVT da Usina Hidrelétrica de Itaipu, como forma de obtenção de Hidrogênio eletrolítico, e o dimensionamento total da EVT caso fosse geradora do gás Hidrogênio.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho é uma pesquisa qualitativa, de modalidade teórica, com análises da bibliografia formal, discursiva e concludente. O método de abordagem indutivo foi escolhido como procedimento monográfico, onde foi realizado o levantamento das publicações em base de dados nacionais e internacionais, como, Science Direct, Scielo, Portal Capes e Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), além de revistas como: Journal of Hydrogen Energy, Revista Fuel, Revista Energy e Applied Energy, com o objetivo de identificar as principais misturas de hidrogênio e diesel, bem como o comportamento e resultados específicos dos motores ciclo diesel.

Com este propósito foi efetuada uma revisão do acervo de documentos bibliográficos, baseados em artigos científicos e regulamentos disponíveis nas bases de dados disponíveis em bibliotecas virtuais e sites da rede mundial de computadores. A busca foi realizada no idioma português e inglês utilizando as palavras chaves relacionadas com o tema proposto.

Para revisão, considerou-se documentos publicados de 1985 a 2013. Foi escolhido este período em função da disponibilidade de bibliografia e a crescente aplicação das misturas e testes envolvendo os dois combustíveis.

Para o estudo do caso, foram utilizadas informações do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia Estatística); revistas digitais nacionais como: Exame, Viatura. Info, as quais demonstram a partir de dados coletados na Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores (Fenabrave); boletins semestrais e anuais as

quantidades de veículos vendidos, já a revista Viatura.Info, os dados apresentados por ela são a respeito do consumo de combustíveis pelos veículos vendidos no país, onde são realizadas pesquisas com os proprietários de cada tipo de veículo.

Os dados coletados do site do IBGE são referentes às frotas de veículos ciclo diesel da região Oeste do Paraná e do estado do Paraná, Já os dados referentes ao total de veículos diesel que existem na Federação brasileira, estes foram coletados a partir do site do Denatran (Departamento Nacional de Trânsito).

Os cálculos realizados tiveram como base os rendimentos apresentados por Miyamoto (2011), Saravanan (2008), Saravanan (2010), onde foram realizados cálculos referentes a autonomia gerada a partir das misturas dos dois combustíveis, mostrando assim o seu desempenho visando uma possível utilização em larga escala em motores de ciclo diesel.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Atualmente na região Oeste do Paraná, constituída por 48 municípios e de economia agrícola, segundo os dados fornecidos pelo site do IBGE (2012), a quantidade de veículos movidos a diesel, sendo estes caminhões, caminhonetes, camionetas, ônibus e microônibus e tratores de rodas, está em torno de 124.235 veículos que utilizam este tipo de combustível fóssil. Já no estado do Paraná, o qual engloba todas as regiões do estado, são cerca de 988.553 veículos.

Se comparada ao total de veículos automotores que o estado do Paraná possuía até o ano de 2012, em seu território que era de 5.954.243 veículos, a porcentagem de veículos diesel estava em torno de 16,6%. Já o Brasil, segundo o Denatran (Departamento Nacional de Trânsito), possuía uma frota de 76.137.191 de veículos automotores, onde, cerca de 11.261.271 veículos movidos a diesel, representando assim uma porcentagem de aproximadamente 14,8% dos veículos totais até o mês de dezembro de 2012.

O estudo realizado somente abrangerá uma quantidade de veículos diesel, onde escolheu-se os veículos denominados de caminhões e tratores, os quais são responsáveis por grande parte da poluição e são veículos que possuem exclusivamente motores ciclo diesel.

Os caminhões no Brasil são responsáveis pela maioria do transporte de cargas, com uma quilometragem média anual de um caminhão, quando realizada a média entre os tipos pesado e leve, em torno de 58.047 km, levando-se em conta caso os caminhões rodem somente em suas regiões.

Na Tabela 4 verifica-se os valores reais referente às quilometragens médias realizadas por caminhões, as quais são baseadas a partir do consumo de combustível de cada região, onde (BORBA, 2008) demonstrou em seus estudos.

TABELA 4. Quilometragens médias rodadas por caminhões em suas respectivas regiões. BORBA, 2008.

Região					
Porte Caminhão	Norte	Nordeste	Centro Oeste	Sul	Média Quilômetros Nacional
Pesado	123.132	51.274	90.144	43.580	77.032
Leve	61.566	25.637	45.072	23.972	37.062
	Média Total				58.047

Com estes dados pode-se verificar que na região Oeste do Paraná existem em torno de 43 mil caminhões, no estado do Paraná há aproximadamente 307.640 caminhões e no Brasil aproximadamente 2.873.420 caminhões, estes dados até dezembro de 2012.

Referente ao veículo para o estudo e análise, seu consumo e posterior aplicação dos dados referentes às reduções exercidas pelo uso da blendagem de hidrogênio e diesel em diferentes proporções, utilizou-se o caminhão mais vendido atualmente no mercado nacional segundo a revista Exame (2012) é o Volkswagen 24-250, um caminhão classificado na ordem de caminhão tipo semi-pesado, o qual vendeu no ano de 2012 cerca de 5.300 unidades, tendo assim como parte da venda de caminhões em torno de 16,40% do mercado. As montadoras Volkswagen, Mercedes-Benz e Ford detêm juntas quase 70% desse mercado no Brasil.

Fez-se uma média de consumo utilizando como base os dados fornecidos pelo site Viatura.Info, onde diversos proprietários responderam a respeito de seu consumo médio, o qual pode ser observado na Tabela 5.

TABELA 5. Consumo médio de combustível do caminhão Volkswagen 24-250. VIATURA.INFO, 2010.

Proprietários					Média de consumo
1	2	3	4	5	2,86
2,3	2,5	3,61	2,21	3,7	

A partir dos dados coletados foram realizados cálculos referentes ao consumo anual de combustível, tendo como resultado o consumo em torno de 25.800 litros de combustível diesel utilizado em cada caminhão, caso fosse todos caminhões Volkswagen 24-250 equipados com motor Cummins Interact 6.0.

Outros cálculos foram realizados, tendo como base os rendimentos térmicos obtidos por Saravanan (2008b), Saravanan (2010), os quais demonstram através de seus testes em motores ciclo diesel, vários rendimentos, onde somente utilizou-se dados de blendagens, com as quais obtiveram-se resultados expressivos.

Para os cálculos de rendimento térmico, os quais tiveram como função a determinação do rendimento térmico exato do motor VW 24-250, realizou-se primeiramente cálculos para a obtenção da taxa de compressão da relação de taxa de compressão total e final da queima de combustível no motor, onde utilizou-se a Equação 1.

$$Re = \frac{V4}{V3}$$

Onde:

Re: Taxa de compressão da relação de taxa de compressão total do motor e taxa de compressão até o fim da queima do combustível

V4: Taxa de compressão do motor

V3: Taxa de compressão até o final da combustão no motor

$$Re = \frac{17,3}{15,1} = 1,146$$

A partir da equação 1 pode-se calcular o rendimento térmico do motor do caminhão, utilizando a equação 2.

$$\eta = 1 - \frac{1}{k} \frac{\left(\frac{1}{Re}\right)^k - \left(\frac{1}{Rc}\right)^k}{\frac{1}{Re} - \frac{1}{Rc}}$$

Onde:

η : Rendimento térmico do motor

K: Constante de queima do combustível

Re : Taxa de compressão da relação de taxa de compressão total do motor e taxa de compressão ate o fim da queima do combustível

Rc: Taxa de compressão total do motor

$$\eta = 1 - \frac{1}{1,4} \frac{\left(\frac{1}{1,14}\right)^{1,4} - \left(\frac{1}{17,3}\right)^{1,4}}{\frac{1}{1,14} - \frac{1}{17,3}} = 0,290$$

A partir do rendimento calculado, pode-se calcular os gastos do motor para alimentar o sistema, sabendo que este motor possui cerca de 250 cv, ou 184 KW, calculou-se a quantidade de calor que o motor utiliza para trabalho.

$$\frac{184}{0,29} = 634 \text{ KJ/s}$$

Sabendo da quantidade de calor necessária para o trabalho do motor, calculou-se a autonomia deste veículo, sabendo que o combustível Diesel possui cerca de 155 MJ a cada Litro segundo (Brain, 2009).

A quantidade de combustível que o caminhão pode armazenar em seu tanque é de 275 Litros, ou seja, cerca de 42.625 MJ, a partir de seu consumo de combustível para gerar trabalho sua autonomia é de cerca de 18,79 horas para que o caminhão utilize a capacidade total do tanque em seu consumo.

$$\frac{42.625}{0,63} = 18,79 \text{ Horas}$$

Caso fossem utilizados os rendimentos obtidos por Saravanan (2008b), o qual obteve cerca de 28,5% a mais de eficiência térmica do que o motor original, poder-se-ia obter um rendimento em torno de 37% caso fosse utilizado o motor do Volkswagem 24-250.

$$\eta_{\text{diesel}} = 0,29$$

$$\eta_{\text{diesel}} + 28,5\% \text{ (Saravanan, 2008b)}$$

$$\eta = 0,370$$

Como o motor do caminhão possui cerca de 250 cv, ou 184 KW, calculou-se a quantidade de calor que o motor utilizaria para trabalho.

$$\frac{184}{0,37} = 0,497 \text{ MJ/s}$$

Como o tanque de combustível do caminhão possui cerca de 275 Litros, ou seja, em torno de 42.625 MJ de energia, realizou-se um cálculo demonstrando a quantidade de tempo necessária para a utilização do combustível total do tanque, tendo como autonomia de cerca de 23 horas.

$$\frac{42.625}{0,497} = 23 \text{ Horas}$$

A partir de sua autonomia, calculou-se a sua autonomia em km/L, onde utilizou-se como base a autonomia média do caminhão sem modificações de combustível que é de 2,86 km/L, onde obteve-se como resultado uma autonomia de 3,65 km/L.

2,86 - 18h de autonomia

X - 23h de autonomia utilizando hidrogênio

X= 3,65 km/L

Caso fossem utilizados os rendimentos térmicos obtidos por Saravanan (2010) que é de 17% a mais do que o rendimento térmico do motor sem alteração de combustível, caso este rendimento se repetiria no motor do caminhão o rendimento térmico do motor seria em torno de 0,33.

0,29 - 100%

X - 117%

X= 0,33.

A partir deste rendimento térmico calculou-se a quantidade de calor necessária para o motor exercer trabalho.

$$\frac{184}{0,33} = 0,557 \text{ MJ/s}$$

Sabendo da quantidade de calor utilizada para trabalho, calculou-se a autonomia do motor utilizando a mistura dos combustíveis, sabendo que o tanque de combustíveis do caminhão é de 275 Litros, ou seja, em torno de 42.625 MJ, obtendo como resultado a utilização total do combustível em torno de 21 horas.

$$\frac{42.625}{0,557} = 21 \text{ Horas}$$

A partir da autonomia gerada do consumo total do tanque de combustível é possível calcular a autonomia em km/L do motor utilizando os rendimentos de Saravanan (2010), onde obteve-se como resultado a autonomia de 3,33 km/L.

2,86 - 18 horas

X - 21 horas

X= 3,33 km/L.

A partir do aumento das autonomies dos caminhões realizou-se cálculos de média, como demonstrado na Tabela 6.

TABELA 6. Consumo médio obtido nas misturas de 30% de hidrogênio.

Autonomia comum do caminhão	Autonomia Saravanan (2008b)	Autonomia Saravanan (2010)	Média consumo H₂ + Diesel
2,86 km/L	3,65 km/L	3,33 km/L	3,49 km/L

Pensando na utilização da energia vertida da Usina Hidrelétrica de Itaipu, para a geração de hidrogênio, onde Bach (2013) calculou a média de produção em quilos de hidrogênio a partir de dados obtidos por Carnieletto (2011) a qual pode gerar 87.433,715 quilogramas de hidrogênio por ano em média. Em 2012 essa produção foi de 24.595.744 quilogramas de hidrogênio.

A quantidade de hidrogênio que poderia ser produzido a partir da utilização da EVT de Itaipu foi calculada por Bach (2013) porém devido aos volumes gastos pelos motores serem em litros, calculou-se o volume em m³ do total de hidrogênio que poderia ser produzido na Hidrelétrica de Itaipu.

A média de Energia Vertida Turbinável (EVT) entre os anos de (2000 a 2012) foi de 87.433.715 kg de hidrogênio (BACH,2013), caso fossem transformados a quantidade total de hidrogênio em volume, é necessário lembrar da molaridade, onde no caso do hidrogênio cada mol possui cerca de 2 gramas, e a volume

constante dos gases é de 22,4 Litros por mol, sendo assim teríamos cerca de 979.257,6 m³ de Hidrogênio, como demonstrado a seguir:

$$\frac{87.433.715}{0,002} = 43.716.857,5 \text{ mols}$$

$$43.716.857,5 \text{ mols} \times 22,4 \text{ L} = 979.257.608 \text{ Litros H}_2 \text{ ou } 979.257,6 \text{ m}^3 \text{ H}_2$$

Caso somente fosse calculada o volume de H₂ produzido com toda a energia vertida turbinável do ano de 2012, onde Bach (2013) calculou ser de cerca de 24.595.744 kg de H₂, poderíamos ter cerca de 275.472,3 m³ H₂.

$$\frac{24.595.744}{0,002} = 12.297.872 \text{ mols}$$

$$12.297.872 \text{ mols} \times 22,4 \text{ L} = 275.472.332,8 \text{ Litros de H}_2 \text{ ou } 275.472,3 \text{ m}^3 \text{ H}_2.$$

Foram calculadas as dimensões totais da utilização de hidrogênio, caso toda a frota de cada localidade utilizasse as misturas. Na Tabela 7 observa-se o dimensionamento da utilização de hidrogênio, utilizando os resultados obtidos por Saravanan (2008b), o qual teve como resultado de autonomia 3,65 Km/L, utilizando misturas de 30% de hidrogênio em volume.

TABELA 7. Dimensionamento da mistura e o potencial de Itaipu utilizando rendimento de Saravanan (2008b).

Localidade	Total Caminhões	Km percorridos (média anual)	Diesel + H ₂ utilizados (m ³)	H ₂ total (m ³)	Capacidade de Itaipu em fornecer energia (média)
Oeste do Paraná	42.099	58.047	669.500,39	200.850,11	4.875 vezes
Paraná	307.640	58.047	4.892.398,92	1.467.719,67	667.2 vezes
Brasil	2.873.420	58.047	45.695.998,26	13.708.799,47	71.4 vezes

Nas Tabelas 8 e 9 são apresentados os cálculos das dimensões da utilização total das misturas de 30% em volume de hidrogênio ao diesel de forma total nos caminhões diesel. Na Tabela 8, tem-se os resultados obtidos através da autonomia gerada por Saravanan (2010), que corresponde a 3,33 km/L, utilizando misturas de 30% em volume de hidrogênio aos motores ciclo diesel. E Tabela 9 tem-se a média entre a autonomia dos dados apresentados pelos autores, que corresponde a 3,49 km/L também em misturas de 30%.

TABELA 8. Dimensionamento da mistura e o potencial de Itaipu utilizando rendimento de Saravanan (2010).

Localidade	Total Caminhões	Km percorridos (média anual)	Diesel + H ₂ utilizados (m ³)	H ₂ total (m ³)	Capacidade de Itaipu em fornecer energia (média)
Oeste do Paraná	42.099	58.047	733.848,71	220.154,61	4.434 vezes
Paraná	307.640	58.047	5.362.626,66	1.680.787,99	608,7 vezes
Brasil	2.873.420	58.047	50.088.020,73	15.026.406,21	65,1 vezes

TABELA 9. Dimensionamento médio da mistura, e o potencial de Itaipu utilizando rendimento dos autores base.

Localidade	Total Caminhões	Km percorridos (média anual)	Diesel + H ₂ utilizados (m ³)	H ₂ total (m ³)	Capacidade de Itaipu em fornecer energia (Média)
Oeste do Paraná	42.099	58.047	700.190,56	210.057,17	4.661 vezes
Paraná	307.640	58.047	5.116.688,48	1.535.000,54	637,9 vezes
Brasil	2.873.420	58.047	47.790.721,44	14.337.216,43	68,3 vezes

Porém caso fosse somente utilizados os dados referentes a energia vertida turbinável do ano de 2012, que obteve menor quantidade de energia vertida turbinável obter-se-ia diferenciados resultados, como demonstrados no Tabela 10.

TABELA 10. Capacidade de Itaipu em absorver demanda de hidrogênio em litros no ano de 2012.

Localidade	Saravanan (2008b)	Saravanan (2010)	Média Saravanan (2008b) e (2010)
Oeste do Paraná	1371 vezes	1.251 vezes	1311 vezes
Paraná	187,7 vezes	51,3 vezes	179,4 vezes
Brasil	21,6 vezes	18,3 vezes	19,2 vezes

A quantidade de EVT referente ao ano de 2012 que poderia ser produzido Hidrogênio (H₂) para a utilização em caminhões demonstra que caso fosse utilizado sua capacidade total de EVT seria possível o abastecimento total das regiões analisadas variadas vezes caso fossem utilizados as blendas que utilizam 30% de hidrogênio em volume.

A partir dos cálculos apresentados, pode-se dizer que a utilização de H₂ seria de grande valia, pois ajuda a amenização das poluições atmosféricas geradas pelos veículos e também devido a utilização da EVT da Usina Hidrelétrica de Itaipu para a possível produção d Hidrogênio.

6. CONCLUSÃO

A partir dos cálculos realizados, pode-se constatar que a utilização de blendas constituídas por hidrogênio e diesel, pode representar uma opção viável para a redução do consumo de combustível em motores ciclo diesel, bem como para a redução de emissão de fumaça e agentes tóxicos ao meio ambiente.

A respeito da utilização da blenda de hidrogênio a diesel, pode-se afirmar que se caso os rendimento térmicos obtidos por Saravanan (2008b) e Saravanan (2010) sejam os mesmos resultados nos motores de caminhões brasileiros de porte semi-pesado, como é o caso do Volkswagen 24-250 a sua autonomia aumentará, ou seja, ocorrerá uma economia de combustível fóssil, a possível diminuição das emissões atmosféricas além também de não ocorrer a perda de potência.

A partir dos resultados apresentados pode-se perceber que o potencial de fornecimento de hidrogênio pela Usina Hidrelétrica de Itaipu é suficiente para suprir a totalidade da frota analisada.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BACH, V, R. **Dimensionamento da Capacidade de Produção de Hidrogênio a partir da energia vertida turbinável de Itaipu e sua utilização em veículos automotivos.** Trabalho de conclusão de curso (Tecnologia em Biocombustíveis). Palotina - Paraná. 2013.

BARRETO, L; MAKIHIRA, A; RIAHI, K. The hydrogen economy in the 21st century a sustainable development scenario. *International Journal of Hydrogen Energy*, v.28. p.267–84, 2003.

BAIN, A.; VORST,W. D. V. The Hindenburg tragedy revisited: the fatal flaw found. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 24, p. 399-403, 1999.

BAPTISTA, A, C, C. **O derivado mais importante do Petróleo: o Óleo Diesel - uma análise multidimensional.** Monografia de Conclusão de Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Reservatórios Petróleo e Gás ao título de Especialista. Rio de Janeiro, 2009.

BOLES, M, A; CENGEL, Y, A. *Termodinâmica*. 5 ed. p.764. Editora Mc Graw-Hill. São Paulo, 2006.

BORSATO, D; GALÃO, O,F; MOREIRA, I. *Combustíveis fósseis - carvão e petróleo.* Editora Eduel, Londrina, 2009.

BOTTA, L. S. **Papel como fonte alternativa para a produção anaeróbia de hidrogênio.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento). Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos – SP, 2012.

BRAIM, M. Como funcionam os motores a diesel. 2009. Disponível em: <carros.hsw.uol.com.br/diesel.htm>. Acesso em: 22/11/2013.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP. Resolução ANP nº 8, de 9 fevereiro 2011. Regulamenta os Programas de

Monitoramento da Qualidade dos Combustíveis (PMQC), de Lubrificantes (PMQL) e de Aditivos (PMQA). Diário Oficial da União, Brasília, DF, 10 fevereiro 2011a.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP. Resolução ANP nº 65, de 9 dezembro 2011. Regulamenta as especificações dos óleos diesel de uso rodoviário. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 12 dezembro 2011b.

BUCKEL, J,W; CHANDRA, S. Hot wire ignition of hydrogen—oxygen mixture. International Journal of Hydrogen Energy, v.21. p.39–44, 1996.

BUENO, F, da S. Dicionário escolar da Língua Portuguesa. Ministério da Educação e Cultura. 5 ed. p. 206.

CARNIELETTO, R. **Aproveitamento de Energia Vertida Turbinável para Produção de Hidrogênio e Geração Distribuída**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Santa Maria. p.174p, Santa Maria,2011.

CNT; SEST; SENAT; DESPOLUIR. Os impactos da má qualidade do óleo diesel brasileiro. Brasília, 2012. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/riomais20/resources/cartilhas/Oleo_Diesel_Final.pdf>. Acesso em: 22/10/2013

DENATRAN. Frota 2012. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/frota.htm>>. Acesso em: 20/11/2013

EPE. BEN - Balanço Energético Nacional. 2013. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf> Acesso em: 18/11/2013

FERREIRA, F, E, B. **Revisão de literatura sobre a evolução do motor Diesel, suas aplicações práticas e melhorias na questão ambiental**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Ciências e Tecnologia). Angicos, Rio Grande do Norte, 2013.

HARAGOPALA RAO, B; SHRIVASTAVA, K, N; BHAKTA, H, N. Hydrogen for dual fuel engine operation. International Journal of Hydrogen Energy, v.8. p. 381-4. 1983.

H2BRASIL. Aplicações e uso histórico do Hidrogênio. 2011. Disponível em: <<http://www.h2brasil.com/sub-cap-4/hist-5>>. Acesso em: 12/11/2013

HE, B, Q; SHUAI, S.; WANG, J.; HE, H. The effect of ethanol blended diesel fuels on emissions from a diesel engine. Atmospheric Environment, v. 37, p. 4965-4971, 2003.

HYTRON. Aplicações do Hidrogênio. 2013. Disponível em: <http://www.hytron.com.br/site/index.php?option=com_content&view=article&id=106&Itemid=62&lang=pt>. Acesso em: 12/11/2013

H₂NITIDOR. Hytron's presentation - Hydrogen-Oxygen high-pressure generator & more. 2012. Disponível em: <http://www.hytron.com.br/site/index.php?option=com_docman&task=doc_details&gid=13&Itemid=89&lang=pt>. Acesso em: 10/11/2013

IBGE. Frota 2012. 2012. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/temas.php?sigla=pr&tema=frota2012>>. Acesso em: 18/11/2013

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. World Energy Outlook. Paris, França, p. 698, 2009.

INFOMOTOR. Motor de Combustão Interna Ciclo Diesel. Disponível em: <<http://www.infomotor.com.br/site/2009/11/motor-de-combustao-interna-ciclo-%E2%80%9Cdiesel%E2%80%9D/>>. Acesso em: 22/11/2013

KNOTHE, G; GERPEN, J, V; KRAHL, J; RAMOS, L, P. Manual do Biodiesel. Editora Blucher, São Paulo. p.5 -13, 2006.

LATA, D, B; MISRA, A; MEDHEKAR,S. Investigations on the combustion parameters of a dual fuel diesel engine with hydrogen and LPG as secondary fuels. International Journal of Hydrogen Energy, v.36. p. 3808 - 3819. 2011.

LEE, S.; TANAKA, D.; KUSAKA, J.; DAISHO, Y. Effects of diesel fuel characteristics on spray and combustion in a diesel engine. JSAE Review, v. 23, p. 407-414, 2002.

MACALLISTER, S.; CHEN, J-Y.; FERNANDEZ-PELLO, A. C. Diesel engines in Fundamentals of combustion processes. Mechanical Engineering Series. New York, p. 227-241, 2011.

MASSOD, M; ISHRAT, M, M; REDDY, A, S. Computational combustion and emission analysis of hydrogen - diesel blends with experimental verification. International Journal of Hydrogen Energy, v.32. p. 2539 -2547. 2007.

MASOOD, M. ISHRAT, A. S. Computational combustion and emission of hydrogen diesel blends with experimental verification. International Journal of Hydrogen Energy, v.32. p. 2539 - 2547. 2006.

MELLO, L. F. HOGAN, D. J. Dinâmica Populacional e Mudança Ambiental: Cenários para o Desenvolvimento Brasileiro. População, Consumo e Meio Ambiente. Campinas: NEPO – UNICAMP, p. 59-72, 2007.

MORAIS, A, M; MENDES, M, A, A ;JUSTINO, M.; VALENTE, O, S; HANRIOT , S, M; PANTORIO; SODRÉ, J, R. Hydrogen impacts on performance and CO2 emissions from a diesel power generator. International Journal of Hydrogen Energy, v.38. p. 6857 - 6854. 2013.

MIYAMOTO, T., HIROKAZU, H., MASATO, M., NAOYA, K., HAJIME, K., YASUHIRO, U. Effect of hydrogen addition to intake gas on combustion and exhaust emission characteristics of a diesel engine. International Journal of Hydrogen Energy. V.36. 2011.

PETROBRÁS. O Processo de Refino. 2004. Disponível em: <
<http://www.coopetroleo.com.br/pref.htm> > Acesso em: 29/10/2013

POMPELLI, M. F.; OROZCO, A. J. J. ; OLIVEIRA, M. T.; RODRIGUES, B. R. M.; BARBOSA, M. O. ; SANTOS, M. G.; OLIVEIRA, A. F. M.; CORTEZ, J. S. A. Crise energética mundial e o papel do Brasil na problemática de biocombustíveis. Revista Agronomía Colombiana, p. 231-240, 2011.

QUELHAS, A. D.; BRASIL, N. I.; ARAÚJO, M. A. S.; SOUSA, E. C. M.; Processamento de petróleo e gás: petróleo e seus derivados, processamento primário, processos de refino, petroquímica, meio ambiente. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

RIFKIN, J. A Economia do Hidrogênio. M. Books, São Paulo. 2003.

SANTOS, F. M. S. M. dos., SANTOS, F. A. C. M. dos., O combustível “Hidrogênio”. Educação, Ciência e Tecnologia. Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Superior Politécnico de Viseu. Disponível em <
<http://www.ipv.pt/millenium/millenium31/15.pdf>>. Acesso em 14/06/13.

SARAVANAN, N; NAGARAJAN, G. An experimental investigation of hydrogen-enriched air induction in a diesel engine system. International Journal of Hydrogen Energy, v. 33. p. 1769 – 1775. 2008a.

SARAVAN, N; NAGARAJAN, G; SANJAY, G; DHANASEKARAN, C; KALAISELVAN, K,M. Combustion analysis on a DI diesel engine with hydrogen in dual fuel mode. Fuel 87. p. 3591–3599. 2008b.

SARAVANAN, N; NAGARAJAN, G. Performance and emission studies on port injection of hydrogen with varied flow rates with Diesel as an ignition source. Applied Energy,v. 87. p. 2218 – 2229. 2010.

SHIRK, M. G., McGUIRE, T. P., NEAL, G. L., HAWORTH, D. C. Investigation of a hydrogen-assisted combustion system for a light-duty diesel vehicle. International Journal of Hydrogen Energy, v. 33. 2008.

SOUZA, M, M, V, M. Tecnologia do hidrogênio. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro. Editora Synergia. Rio de Janeiro. 2009.

SOUZA, G, R. **Avaliação experimental da transferência de calor em fornalha flamotubular utilizando como combustível o biodiesel e o óleo diesel.**

Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. USP. 2005.

TICIANELLI, E, A. GONZALES, E, R. Eletroquímica: Princípios e Aplicações, v. 17. P. 191. Editora EdUSP. 2005.

UFPEL. Apostila de motores a combustão interna. Pelotas, 2013. Disponível em: <<http://wp.ufpel.edu.br/mlaura/files/2013/01/Apostila-de-Motores-a-Combust%C3%A3o-Interna.pdf>> Acesso em: 11/11/2013

WU, H, W; WU, Z ,Y. Combustion characteristics and optimal factors determination with Taguchi method for diesel engines port-injecting hydrogen. Energy, v. 47. p. 411 - 420. 2012.