

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

MODELAGEM E ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO E
COMERCIALIZAÇÃO DE DIESEL VERDE (HVO) E SUA APLICAÇÃO NO MODO
DUAL-FUEL COM ETANOL EM MOTORES DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO

Luís Filipe de Almeida Roque

Itajubá, fevereiro de 2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Luís Filipe de Almeida Roque

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

Área de Concentração: Térmica, Fluidos e Máquinas de Fluxo

Orientador: Christian Jeremi Coronado Rodriguez

Coorientador: Juan José Garcia Pabón

Fevereiro de 2022, Itajubá

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

Luís Filipe de Almeida Roque

MODELAGEM E ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO E
COMERCIALIZAÇÃO DE DIESEL VERDE (HVO) E SUA APLICAÇÃO NO MODO
DUAL-FUEL COM ETANOL EM MOTORES DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO

Dissertação aprovada por banca examinadora em 25 de fevereiro de 2022, conferindo ao autor o título de *Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica*.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Christian Jeremi Coronado Rodriguez

Prof. Dr. Juan José Garcia Pabón

Prof. Dr. Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva

Profa. Dra. Mona Lisa Moura de Oliveira

*“Se eu vi mais longe,
foi por estar de pé sobre ombros de gigantes”*

Isaac Newton

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela oportunidade de enfrentar esta jornada, com saúde, fé e perseverança.

Agradeço meus pais, Edmilson e Patrícia e minha irmã, Ana, por confiarem e apoiarem em todos os momentos ao longo desta etapa, de todas formas possíveis, mas principalmente, pelo amor e carinho transmitidos a mim. À minha noiva, Júlia, pelo carinho e apoio, incentivo e motivação. Minha família é minha forte base.

Ao Professor Doutor Christian Jeremi R. Coronado, orientador deste trabalho, amigo e coordenador do Grupo de Estudos em Tecnologias de Conversão de Energia (GETEC) e do Laboratório de Máquinas Térmicas da UNIFEI (LMT-UNIFEI). Agradeço pela confiança em mim depositada e pelos esforços para viabilizar o desenvolvimento desta pesquisa. Sua experiência, trabalho e humildade me proporcionaram muitas conquistas e grande crescimento profissional e pessoal.

Agradeço aos alunos integrantes da equipe do Projeto Rota 2030 da UNIFEI/FPT Industrial (Túlio Zucareli, Roberto Berlimi, Ana Júlia Cintra, Otávio Raats, Beatriz Oliveira, Willian Justen e Gustavo Frez) pelo apoio na fase final deste trabalho.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo auxílio financeiro durante uma das etapas desta pesquisa.

Finalmente, agradeço à Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa – Fundep Rota2030/Linha V (Proc. No 27192*5).

RESUMO

A utilização de fontes limpas e renováveis é uma prática que ganha cada vez mais espaço e visibilidade tratando-se do setor de geração de energia. Diariamente, recursos são despendidos em busca de novas tecnologias e novos combustíveis que se adequem às exigências de redução de emissão de poluentes, emissão de gás carbônico e uma política de desenvolvimento sustentável. Dentre as soluções encontradas, a utilização de biomassas como fontes de energia e tecnologias aprimoradas para a combustão, como a técnica *Dual-Fuel*, são opções que promovem a descarbonização e a redução de emissões de gases poluentes no geral. Neste contexto, no presente trabalho objetivou-se o estudo experimental do HVO como combustível renovável a ser aplicado em um motor de combustão interna monocilíndrico, de maneira pura ou em *Dual-Fuel* com o etanol hidratado, em uma bancada dinamométrica, onde foram avaliados parâmetros de desempenho e emissão de gases poluentes e também realizada a Avaliação do Ciclo de Vida do berço ao túmulo do HVO. A metodologia adotada consistiu no desenvolvimento de uma bancada de teste com instrumentação, métodos de análise dos dados e cálculo das incertezas de medição, incluindo planejamento de ensaios voltado para aplicação de moto-geradores, e análise dos parâmetros de interesse. Foram realizados testes utilizando o HVO puro em comparação ao Diesel convencional puro e testes utilizando a combustão dual de Diesel-Etanol e HVO-Etanol. Para a Avaliação do Ciclo de Vida, foi utilizado o *software* SimaPro 9 e o método de cálculo ReCiPe 2016 Midpoint (E). Os resultados obtidos com o HVO puro apresentaram reduções dos níveis específicos de emissões de NO_x, HC, CO e material particulado (MP) de 30%, 75%, 81% e 55,3%, respectivamente. A redução ocorre por conta das propriedades físico-químicas do biocombustível, como a ausência de compostos aromáticos e maior número de cetano que o diesel comercial. A aplicação *Dual-Fuel* proporciona redução significativa das emissões de CO₂, NO_x e MP. A análise de ciclo de vida mostrou que o HVO puro produzido a partir do óleo de palma possui desempenho ambiental superior ao da soja, com redução do Potencial de Aquecimento Global em até 75%. Categorias de impacto como Acidificação Terrestre, Formação de Ozônio e Consumo de recursos não renováveis reduzem quando comparados ao diesel mineral. O impacto ambiental da operação *Dual-Fuel* apresenta diminuição dos níveis de Potencial de Aquecimento Global, Depleção de Recursos Fósseis e Formação de Ozônio.

Palavras-Chave: *Dual-Fuel; HVO; Avaliação do Ciclo de Vida; Motores, Biocombustíveis*

ABSTRACT

The use of clean and renewable sources is a practice that is gaining more and more space and visibility in the energy generation sector. Resources are spent on a daily basis in search of new technologies and new fuels that meet the requirements of reducing pollutant emissions, emission of carbon dioxide and a sustainable development policy. Among the solutions found, the use of biomass as energy sources and improved technologies for combustion, such as the Dual-Fuel technique, are options that promote decarbonization and a reduction in polluting gas emissions in general. In this context, the present work aimed at the experimental study of HVO as a renewable fuel to be applied in a single-cylinder internal combustion engine, neat or in Dual-Fuel combustion with hydrated ethanol, in a dynamometric bench, where performance parameters and emission of polluting gases were evaluated. With the experimental data added to inventory data collected from the literature on the production cycle of HVO from palm oil and soybean oil, a Life Cycle Assessment of the biofuel was carried out. The adopted methodology consisted of developing the test bench with all instrumentation, data analysis methods and calculation of measurement uncertainties, test planning aimed at the application of motor generators, and analysis of the parameters of interest. Tests were carried out using neat HVO compared to neat conventional diesel and tests using dual combustion of Diesel-Ethanol and HVO. For Life Cycle Assessment, the SimaPro 9 software and the ReCiPe 2016 Midpoint (E) calculation method were used. The results obtained with pure HVO showed reductions in specific levels of emissions of NO_x, HC, CO and particulate matter (PM) of 30%, 75%, 81% and 55.3%, respectively. The reduction is mainly due to the physicochemical properties of the biofuel. The Dual-Fuel application provides a significant reduction in CO₂, NO_x and MP emissions. The life cycle analysis showed that the HVO produced from palm oil has an environmental performance superior to that of soy, with a reduction in the Global Warming Potential of up to 75% and impact categories such as Terrestrial Acidification, Ozone Formation and Consumption of Non-Resources renewables present lower levels when compared to diesel. The environmental impact of the 'Dual-Fuel' operation shows a decrease in the levels of Global Warming Potential, Depletion of Fossil Resources and Ozone Formation.

Key words: *Dual-Fuel; HVO; Life Cycle Analysis; Engines, Biocofuels*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 - Análises realizadas no presente estudo - Análise Experimental e Avaliação do Ciclo de Vida.....	22
Figura 2-1 - Diagramas PV e TS.	28
Figura 2-2 - Etapas mecânicas do ciclo Diesel, a) admissão, b) compressão, c) expansão, d) exaustão.	29
Figura 2-3 - Processo de combustão a) Volume disponível na câmara de combustão, b) Tempo de injeção, c) Pressão no cilindro, d) Tempo de exaustão.....	30
Figura 2-4 - Representação esquemática de um MCI.....	31
Figura 2-5 - Diferentes configurações de injeção direta de combustível. a) sem swirl, b) com swirl, c) com swirl elevado.....	34
Figura 2-6 - Desenvolvimento de pressão no cilindro para diferentes atrasos de ignição	35
Figura 2-7 - Estratégia <i>Dual-Fuel</i> com injetor de combustível de baixa reatividade posicionado no pórtilo de admissão do motor.....	37
Figura 2-8 - Efeitos na combustão <i>Dual-Fuel</i> na injeção de diferentes frações de etanol	38
Figura 2-9 - Matriz Energética a) Mundial e b) Brasileira – 2018	39
Figura 2-10 - Evolução do consumo de biocombustíveis no Brasil, EUA, Europa, e no mundo, entre os anos de 1995 e 2016.....	40
Figura 2-11 - Processo de Hidrotratamento do Óleo Vegetal para a produção do HVO	42
Figura 2-12 - Estrutura molecular do farnesano ($C_{15}H_{32}$)	44
Figura 2-13 - Esquema de um processo DSCH.....	44
Figura 2-14 - Estrutura metodológica da análise de ciclo de vida.....	48
Figura 4-1 - Bancada de Ensaio para motor de combustão interna equipada com dinamômetro e instrumentos de medição.	65
Figura 4-2 - Detalhe do motor com <i>encoder</i> óptico e sistema de injeção Dual-Fuel	66
Figura 4-3 - Detalhe do pórtilo de injeção do etanol no sistema Dual-Fuel.	68
Figura 4-4 - Esquema da Bancada Experimental	69
Figura 4-5 - Curva de Calibração do Injetor de Etanol	70
Figura 5-1 - Gases Efeito Estufa na agricultura (RUETER, 2020).	81
Figura 5-2 - Principais atividades da produção de soja.	83
Figura 5-3 - Principais etapas na produção do óleo de palma	89

Figura 5-4 - Processo de Produção da palma	91
Figura 5-5- Modelo de Obtenção de óleo de palma	93
Figura 5-6 - Representação do sub-sistema de pré tratamento com suas principais entradas e saídas para produção de 1000 kg de biocombustível	95
Figura 5-7 - Representação do sub-sistema de produção de hidrogênio com suas principais entradas e saídas para produção de 1000 kg de biocombustível	97
Figura 5-8— Representação do sub-sistema do processo de hidrotreatamento com suas principais entradas e saídas para produção de 1000 kg de biocombustível	98
Figura 5-9 - Evolução dos limites de emissão de NO _x e MP em motores de combustão interna em diferentes países.....	102
Figura 5-10 – Processos englobados no ciclo de Vida do HVO [Arvidsson (2011)].....	105
Figura 5-11 – Processo de hidrogenação da molécula de trioleína produzindo heptadecano, octadecano, propano, água, monóxido de carbono e dióxido de carbono [LORENZI et al. (2020)]	108
Figura 6-1- Emissões Específicas de NO _x na operação Dual-Fuel.....	111
Figura 6-2- Emissões Específicas de CO na operação Dual-Fuel.....	112
Figura 6-3- Emissões Específicas de HC na operação Dual-Fuel.....	112
Figura 6-4 - Emissões Específicas de CO ₂ na operação Dual-Fuel.....	113
Figura 6-5- Emissões Específicas de MP na operação Dual-Fuel.....	114
Figura 6-6 - Eficiência Térmica do Motor na operação Dual-Fuel	114
Figura 6-7 - Potencial de Aquecimento Global do HVO produzido a partir do Óleo de Palma e Óleo de Soja na geração de 1000kWh de energia elétrica.	116
Figura 6-8 - Uso de Energia Fóssil no Ciclo de Vida do HVO produzido a partir do Óleo de Palma e Óleo de Soja na geração de 1000kWh de energia elétrica.....	117
Figura 6-9 - Potencial de Acidificação Ciclo de Vida do HVO produzido a partir do Óleo de Palma e Óleo de Soja na geração de 1000kWh de energia elétrica. I	119
Figura 6-10 - Uso de Água no Ciclo de Vida do HVO produzido a partir do Óleo de Palma e Óleo de Soja na geração de 1000kWh de energia elétrica.	120
Figura 6-11 - Eutrofização Marinha e Eutrofização de Água Doce no Ciclo de Vida do HVO produzido a partir do Óleo de Palma e Óleo de Soja na geração de 1000 kWh de energia Elétrica	121
Figura 6-12 - Potencial de Aquecimento Global HVO-Etanol comparado ao Diesel-Etanol	123
Figura 6-13 - Uso Total de Energia Fóssil - HVO-Etanol comparado ao Diesel-Etanol	123
Figura 6-14 - Formação de Ozônio - HVO-Etanol comparado ao Diesel-Etanol	124

Figura 6-15 - Consumo Total de Água - HVO-Etanol comparado ao Diesel-Etanol.....	125
Figura 6-16- Potencial Total de Acidificação - HVO-Etanol comparado ao Diesel-Etanol ..	126
Figura 6-17 - Eutrofização Marinha e de Água Doce Total - HVO-Etanol comparado ao Diesel-Etanol.....	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 - Propriedades do HVO comparadas ao diesel convencional e ao biodiesel.....	41
Tabela 2-2 - Propriedades do farnesano	45
Tabela 4-1 - Especificações do Motor Monocilíndrico utilizado nos testes de emissão de poluentes.....	64
Tabela 4-2 - Detalhes dos instrumentos de medição.	67
Tabela 4-3 - Propriedades Físico-Químicas do diesel e HVO.....	72
Tabela 4-4 - Propriedades Físico-Químicas do Etanol Hidratado.....	73
Tabela 4-5 - Razão tabulada para o componente e a massa específica dos gases de escape para cada combustível utilizado	75
Tabela 5-1 - Emissões de GEE por tipo de gás e fontes emissoras	80
Tabela 5-2 – Fatores de equivalência para GWP	80
Tabela 5-3 - Entradas e Saídas Majoritárias para a Produção de 1000 kg de Grãos de Soja no Brasil.....	84
Tabela 5-4 - Inventário do cultivo para 1000 kg de frutos de palma.....	92
Tabela 5-5 – Inventário consolidado para a produção de 1000 kg de óleo de palma, compilando a etapa de cultivo e extração do óleo	94
Tabela 5-6 - Entradas no processo de pré-tratamento na geração de 1000 kg de HVO	96
Tabela 5-7 - Saídas no processo de pré-tratamento na geração de 1000 kg de HVO	96
Tabela 5-8 - Entradas no processo produção de hidrogênio para geração de 1000 kg de HVO	97
Tabela 5-9 - Saídas no processo produção de hidrogênio para geração de 1000 kg de HVO..	97
Tabela 5-10 - Entradas do processo de hidrotreamento para geração de 1000 kg de HVO....	99
Tabela 5-11 -Saídas no processo de hidrotreamento para geração de 1000 kg de HVO	99
Tabela 5-12 - Evolução dos limites de emissão de poluentes no Brasil - Baseado na legislação europeia.	103
Tabela 5-13 - Fatores de emissão de CO, NOx, HC e MP para motores diesel equipados em caminhões tipo <i>Heavy Duty</i>	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

AP – do inglês – Acidification Potential – Potencial de Acidificação

BMEP – do inglês: Brake Mean Effective Pressure - Pressão média efetiva de eixo

BSCO – do inglês: Brake Specific CO emission – Emissão específica de eixo de CO

BSCO₂ – do inglês: Brake Specific CO₂ emission – Emissão específica de eixo de CO₂

BSFC – do inglês: Brake Specific Fuel Consumption - Consumo de combustível específico indicado

BSH₂ – do inglês: Brake Specific H₂ emission – Emissão específica de eixo de H₂

BSHC – do inglês: Brake Specific HC emission – Emissão específica de eixo de HC

BSMP – do inglês: Brake Specific MP emission – Emissão específica de eixo de material particulado

SÍMBOLOS

r_c – Razão volumétrica de compressão (adimensional)

V_c – Volume fixo da câmara de combustão (mm^3)

V_d – Volume deslocado pelo pistão (mm^3)

p – Pressão no cilindro (bar)

\dot{m}_f – Vazão mássica de combustível (kg/h)

λ – Fator lambda (adimensional)

θ – Posição angular do virabrequim ($^\circ$)

W_{ind} – Trabalho indicado (J)

P_{ind} – Potência indicada (kW)

N – Velocidade de rotação do motor (rpm)

\dot{m}_{ar} – Vazão mássica de ar (kg/h)

$[\text{NO}_x]$ – Concentração de NO_x nos gases de exaustão (ppm)

$[\text{CO}]$ – Concentração de CO nos gases de exaustão (ppm)

$[\text{HC}]$ – Concentração de CO nos gases de exaustão (ppm)

$[\text{CO}_2]$ – Concentração de CO₂ nos gases de exaustão (ppm)

\dot{m}_{exh} – Vazão mássica da exaustão (kg/h)

u_{NO_x} – Razão tabulada para o NO_x e a densidade dos gases de escape

u_{CO} – Razão tabulada para o CO e a densidade dos gases de escape

u_{HC} – Razão tabulada para o CO e a densidade dos gases de escape

BSNO _x – do inglês: Brake Specific NO _x emission – Emissão específica indicada de Nox	u _{CO2} – Razão tabulada para o CO ₂ e a densidade dos gases de escape
C – Carbono	k _{w,r} – Fator de correção para conversão de base seca para base úmida (adimensional)
CD – do inglês: Combustion Duration - Duração da combustão	k _{f,w} – Fator específico do combustível nos gases de escape úmidos (adimensional)
CO – Monóxido de Carbono	Ha – Umidade do ar de admissão (kg.água/kg.ar seco)
CO ₂ – Dióxido de Carbono	M _{H2O} – Massa molar da água (g/mol)
COVIMEP – do inglês: Indicated Mean Effective Pressure Covariance - Covariância da pressão média efetiva indicada	M _{ar seco} – Massa molar do ar seco (g/mol)
DSHC – do inglês: Direct Sugar to Hydrocarbon - Açúcares diretamente para hidrocarbonetos	p _{amb} – Pressão ambiente (Pa)
EGR – do inglês: Exhaust Gas Recirculation - Recirculação dos gases de escapamento	p _{vapor} – Pressão parcial de vapor de água no ar (Pa)
EOC – do inglês: End of combustion - Fim da combustão	RH– Umidade relativa do ar (%)
EOP – do inglês: End of premixed combustion - Fim da combustão pré-misturada	p _{sat} – Pressão de saturação do vapor de água (Pa)
EUA – Estados Unidos da América	T _{amb} – Temperatura ambiente (K)
EVC – do inglês: Exhaust valve closure - Fechamento da válvula de exaustão	$\dot{m}_{ar\ seco}$ – Vazão mássica de ar seco admitido (kg/h)
Farnesano – diesel renovável da cana-de-açúcar	k _H – Fator de correção relativo à umidade para o NO _x (adimensional)
Fischer-Tropsch – combustível produzido a partir da polimerização do syngas	k – Coeficiente de absorção pelo opacímetro (m ⁻¹)
FSN – do inglês: Filter Smoke Number – Base de medição para cálculo do material particulado	[MP] – Concentração de material particulado nos gases de exaustão (g/m ³)
GEE – Gases de efeito estufa	p _{exh} – Densidade do gás da exaustão (kg/m ³)
	δU _m – Incerteza do tipo B da variável dependente
	δxn– Incerteza do tipo B das variáveis independentes
	€ – Fator de abrangência

GWP – do inglês: Global Warming Potential - Potencial de aquecimento global

H – Hidrogênio

H₂ – Hidrogênio gasoso

H₂O – Água

HC – Hidrocarboneto não queimado

HVO – do inglês: Hydrotreated Vegetable oil - Óleo vegetal hidrogenado

IA – Incerteza do tipo A

IB – Incerteza do tipo B

IC – Incerteza combinada

ICV – Inventário do Ciclo de Vida

IE – Incerteza expandida

ID – do inglês: Ignition delay - Atraso de ignição

IMEP – do inglês: Indicated Mean Effective Pressure - Pressão média efetiva indicada

ICV – Inventário do Ciclo de Vida

IVC – do inglês: Intake valve closure - Fechamento da válvula de admissão

LMT-UNIFEI – Laboratório de Máquinas Térmicas da UNIFEI

MCI – Motor de combustão interna

MP – Material Particulado

N – Nitrogênio

NDIR – do inglês: Non-Dispersive Infrared - Absorção de raios infravermelhos não dispersivos

NMVOC – Compostos Orgânicos Voláteis Não-Metânicos

NO_x – Óxidos de Nitrogênio

O – Oxigênio

O₂ – Oxigênio molecular
misturada

PCI – Poder calorífico Inferior
PCS – Poder calorífico superior
PMI – Ponto morto inferior
PMS – Ponto morto superior
Pmax – Pressão máxima
PV – Pressão x Volume
PWM – do inglês: Pulse Width Modulation
- Modulação por largura de pulso
rpm – Rotações por minuto
S – Enxofre
SOC – do inglês: Start of combustion -
Início da combustão
SOI – do inglês: Start of injection - Início
da injeção
WHSC - Ciclo Estacionário Harmonizado
Mundial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Objetivos	23
1.1.1	Objetivos Específicos	23
1.2	Motivação e Relevância.....	24
1.3	Estrutura do Trabalho	25
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	26
2.1	Motores de Combustão Interna.....	26
2.2	O Ciclo Diesel.....	27
2.2.1	Relações Volumétricas no Motor	31
2.2.2	Combustão em motores de combustão interna de ignição por compressão	32
2.2.3	Atraso de Ignição.....	34
2.3	Dual-Fuel	36
2.4	Biocombustíveis.....	39
2.4.1	HVO	41
2.4.2	Farnesano.....	43
2.5	Avaliação do Ciclo de Vida.....	46
2.5.1	Princípios da aplicação do LCA	48
2.5.1.1	Definição do Objetivo e Escopo.....	48
2.5.1.2	Inventário de Ciclo de Vida (ICV).....	50
2.5.1.3	Avaliação de Impacto (AI).....	51
3	ESTADO DA ARTE.....	54
3.1	Biocombustíveis em MCI por compressão	54
3.2	Tecnologia Dual-Fuel no Mundo e no Brasil	57
3.3	Avaliação de Ciclo de Vida (LCA).....	61
4	ANÁLISE EXPERIMENTAL E METODOLOGIA	64

4.1	Motor de Combustão Interna e Instalações.....	64
4.2	Procedimento Experimental.....	70
4.3	Caracterização dos Combustíveis	71
4.4	Parâmetros Gerais de Desempenho e Análise de Emissões dos Gases de Escape	73
5	INVENTÁRIO	79
5.1	Inventário de Emissões	79
5.2	Plantio e Cultivo de oleaginosas	81
5.2.1	Soja.....	82
5.2.1.1	Cultivo da Soja	83
5.2.1.2	Consumo de Diesel nos Tratos Culturais	85
5.2.1.3	Extração do Óleo de Soja.....	85
5.2.1.4	O Óleo de Soja	86
5.2.1.5	Degomagem	88
5.2.2	Óleo de Palma.....	88
5.2.2.1	Cultivo e colheita da Palma.....	90
5.2.2.2	Recebimento, Preparo da Matéria Prima e Extração do Óleo.....	92
5.3	Usina de HVO.....	94
5.3.1	Pré-Tratamento	95
5.3.2	Produção de Hidrogênio	96
5.3.3	Hidrotratamento.....	98
5.4	Emissões nos Sistemas de Transporte Rodoviário	99
5.5	Ciclo de Vida do Etanol Hidratado e Diesel.....	104
5.6	Delimitação do Estudo.....	104
5.6.1	Cultivo e Extração do Óleo Vegetal.....	105
5.6.1.1	Óleo de Palma	105
5.6.1.2	Óleo de Soja	106
5.6.2	Transporte do Óleo Vegetal.....	106

5.6.2.1	Transporte do Óleo de Palma	107
5.6.2.2	Transporte do Óleo de Soja.....	107
5.6.3	Produção do HVO	107
5.6.4	Transporte do HVO	108
5.6.5	Combustão do HVO	109
6	RESULTADOS	110
6.1	Análise Experimental.....	110
6.2	Avaliação do Ciclo de Vida – HVO produzido da soja e da Palma	115
6.3	Avaliação do Ciclo de Vida – HVO <i>Dual-Fuel</i> com Etanol Hidratado e Comparação com o Diesel Fóssil <i>Dual-Fuel</i> com Etanol Hidratado.....	122
7	CONCLUSÕES.....	128
7.1	Conclusões – Análise de Desempenho e Emissões de Poluentes	128
7.2	Conclusões – Avaliação do Ciclo de vida do HVO produzido a partir do Óleo de Palma e Óleo de Soja.....	129
7.3	Conclusões – Desempenho Ambiental da Operação Dual-Fuel do HVO com Etanol Hidratado	130
7.4	Conclusões Finais	131
7.5	Sugestões Para Trabalhos Futuros	131
	REFERÊNCIAS	133
	ANEXO A – Entradas e Saídas para a Produção do Grão de Soja no Brasil.....	140
	ANEXO B - Quantificação de Entradas e Saídas na fase agrícola da soja	141
	ANEXO C - Inventário de Produção de 1000 kg de frutos de palma.....	142
	ANEXO D – Inventário Consolidado para a produção de 1000 kg de óleo de palma. ..	143
	ANEXO E - Entradas no processo de pré-tratamento na geração de 1000 kg de HVO	144
	ANEXO F - Saídas no processo de pré-tratamento na geração de 1000 kg de HVO	144
	ANEXO G - Entradas, Saídas e Resíduos do processo de produção de 1 m³ de etanol hidratado	145

ANEXO H – Entradas e Saídas da fase agrícola do processo de produção de 1 m³ de etanol hidratado	145
--	------------

1 INTRODUÇÃO

A utilização de fontes limpas e renováveis é uma prática que ganha cada vez mais espaço e visibilidade tratando-se do setor de geração de energia. Diariamente, recursos são despendidos em busca de novas tecnologias e novos combustíveis que se adequem às exigências de redução de emissão de poluentes, emissão de gás carbônico e uma política de desenvolvimento sustentável, como foram o Protocolo de Kyoto e o Rio+20. Segundo dados de EPE (2020), a maior parte da energia consumida, tanto no Brasil quanto no mundo, vem principalmente de fontes não renováveis de energia, como o petróleo e gás natural. Mais de 50% da produção mundial de energia depende do gás natural e do petróleo. Apesar de o Brasil possuir uma base energética renovável, os recursos não renováveis também são cruciais ao atendimento da demanda de energia.

Ghesti (2009), afirma que devido ao grande potencial poluidor e à possibilidade de esgotamento das reservas de petróleo, a busca por fontes renováveis para a produção de combustíveis é essencial para o desenvolvimento sustentável. Biocombustíveis são derivados de biomassa renovável que podem substituir, parcial ou totalmente, combustíveis derivados de petróleo e gás natural em aplicações de geração de energia. Dentre os biocombustíveis mais utilizados, pode-se citar o biodiesel e etanol.

Os biocombustíveis líquidos, substitutos do diesel fóssil, são classificados da seguinte forma:

- Biodiesel, que é composto de ésteres alquílicos de ácido carboxílico de cadeia longa, produzido a partir da transesterificação de triglicerídeos animais ou vegetais (SORIANO et al., 2018):
- Isoprenóides, que são compostos derivados do isopreno (C_5H_8) sendo o farnesano o combustível mais comum. Seu processo de produção de Açúcar Direto para Hidrocarboneto (DSHC) começa com a fermentação dos açúcares derivados da biomassa por microrganismos geneticamente modificados, obtendo-se um composto denominado Farneseno, que posteriormente é hidrogenado para gerar Farnesano. (SOTO et al., 2019)
- As misturas de alcano/olefina são estruturas parafínicas formadas por compostos obtidos pelo processo de hidrotreamento de óleos vegetais. Embora as matérias-primas possam ser semelhantes às utilizadas na produção de biodiesel, as propriedades do Óleo Vegetal Hidrogenado (HVO) são mais próximas das do diesel convencional (geralmente com um número de cetano e poder calorífico mais elevados (SINGH et al., 2018).

Como esperado, o impacto causado ao meio ambiente pelos combustíveis renováveis deve ser menor em comparação aos danos causados pelos combustíveis fósseis, como o diesel mineral. Uma característica importante do uso de combustíveis renováveis está na consideração do ciclo biogênico de produção de dióxido de carbono. Conforme mencionado por Head (2021), ao longo do ciclo de vida de uma biomassa todo o dióxido de carbono emitido diretamente do processamento de matéria-prima renovável é absorvido de volta à natureza. Assim, considera-se que em etapas de utilização do biocombustível, como em sua combustão, todo o carbono liberado será reabsorvido durante a fase de cultivo da biomassa, resultando assim um balanço nulo de emissão de carbono.

O HVO é um biocombustível parafínico produzido a partir de diversos tipos de óleos vegetais, como canola, girassol, soja e óleo de palma, além de gorduras animais. Pode ser utilizado em motores a diesel convencionais, puro ou em mistura com diesel fóssil. Estudos recentes indicam que o HVO pode substituir diretamente o diesel convencional ou ser misturado a ele em qualquer proporção, sem a necessidade de se modificar o motor de combustão interna. (DIMITRIADIS et al., 2018). O HVO possui menor massa específica, viscosidade e ponto de destilação, o que resulta em melhores resultados para injeção e queima do combustível, em comparação ao diesel convencional. Além disso, o HVO possui um conteúdo energético semelhante ao diesel convencional, mas com menor teor de enxofre, o que resulta na redução da emissão de poluentes. (SORIANO et al., 2018). Também, o HVO possui um elevado número de cetano e devido à falta de oxigênio em sua composição, o problema de oxidação não ocorre quando armazenado por longos períodos. Algumas empresas como a Neste Oil Corporation e a Universal Oil Products (UOP) produzem óleos vegetais hidrotratados. O combustível da Neste Oil tem o nome comercial NExBTL e o combustível da UOP é conhecido como Diesel Verde.

Concomitante ao desenvolvimento de novos biocombustíveis, também existe a procura por novas tecnologias nos modos de combustão dos mesmos. Tratando-se de motores à combustão interna, em especial os de ignição por compressão que operam segundo o Ciclo Diesel, diversos modos de combustão e injeção de combustível podem ser utilizados. Segundo Karim (2015), a tecnologia *Dual-Fuel* é uma das tecnologias em desenvolvimento e que ganha espaço tanto no setor de transportes quanto no de energia. Ela consiste na utilização de dois combustíveis diferentes que são injetados de forma distinta na câmara de combustão. Este processo é diferente do utilizado na tecnologia Flex, por exemplo, onde dois combustíveis – etanol e gasolina – são misturados no próprio tanque do veículo e injetados juntos na câmara de combustão. Como exemplo, uma operação *Dual-Fuel* de Diesel convencional e etanol, injeta-se o Diesel, chamado de combustível de alta reatividade, na câmara de combustão por

meio de um injetor de alta pressão e o etanol, chamado de combustível de baixa reatividade é admitido por um injetor próprio, diferente do utilizado para o Diesel. A injeção do combustível secundário pode ser feita, por exemplo, no coletor de admissão do motor.

A utilização da combustão dual pode ser benéfica em diversas situações e trazer vantagens tanto energéticas quanto ambientais, como mostraram Liu, Sun e Zhang (2017) em seu estudo utilizando diesel fóssil como combustível piloto e etanol anidro como combustível secundário. Estes autores obtiveram uma redução de emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x) de até 37,1% em um motor à combustão interna de ignição por compressão, ao passo que a emissão de hidrocarbonetos não queimados (HC) aumentou.

Sendo assim, é interessante o estudo da aplicação de biocombustíveis por meio da tecnologia *Dual-Fuel*. Como mencionado anteriormente, um dos principais motivos para o desenvolvimento dessas novas tecnologias se dá devido à novas restrições de desenvolvimento sustentável e diminuição de emissões de gases poluentes na atmosfera. A metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida é uma das mais aplicadas para se avaliar o impacto ambiental causado por um produto em todas as etapas de sua produção. Na figura 1.1 mostra-se a organização e divisão dos estudos realizados neste presente trabalho.

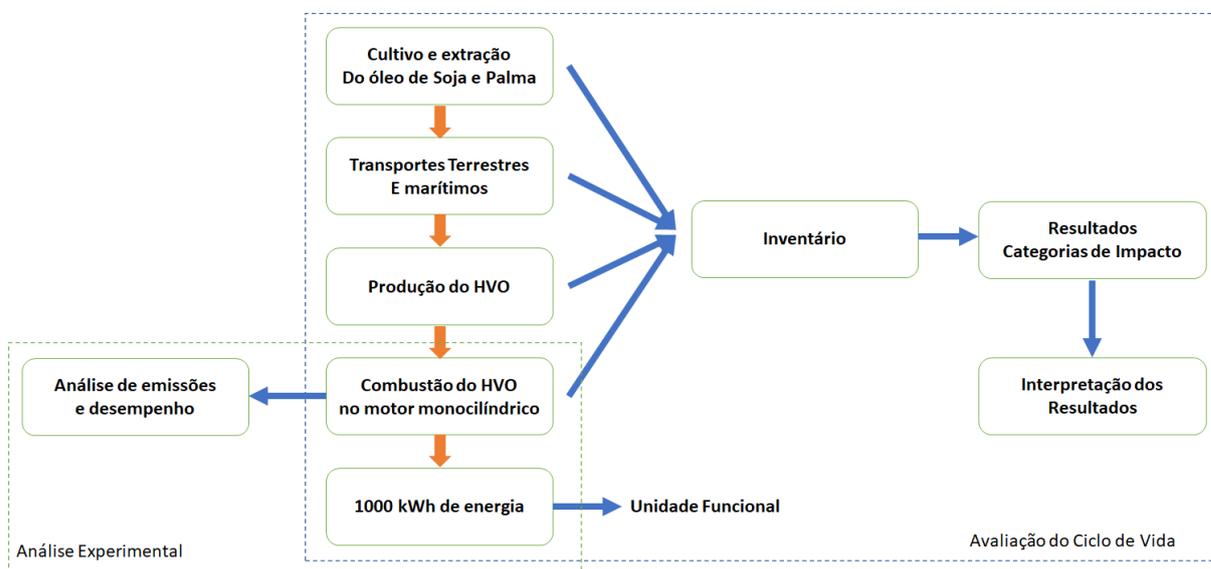


Figura 1-1 - Análises realizadas no presente estudo - Análise Experimental e Avaliação do Ciclo de Vida

Fonte: do autor

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar o desempenho ambiental do biocombustível HVO sendo aplicado tanto puro como também em *Dual-Fuel* com etanol. Assim, avaliou-se emissões de gases poluentes e realizou-se a modelagem e o ciclo de vida deste biocombustível, do berço ao túmulo, onde a aplicação final foi de geração de energia elétrica em pequena escala, avaliando diferentes categorias de impacto ambiental.

1.1.1 Objetivos Específicos

Para se atingir os objetivos gerais, foram necessárias algumas etapas, como:

- Fundamentação teórica e revisão bibliográfica de motores de ignição por compressão, além de tecnologias para aumento da eficiência de conversão de combustível e redução de emissões de poluentes;
- Preparação de uma bancada de testes dinamométrica, com instrumentação e pórtico com injetor de etanol para a injeção em modo *Dual-Fuel*, no Laboratório de Máquinas Térmicas (LMT) – UNIFEI.
- Desenvolvimento e aplicação de metodologia de cálculo para análise das emissões com diferentes combustíveis alternativos, tanto em modo *Single-Fuel* quanto em modo *Dual-Fuel*.
- Obtenção de dados de inventário do cultivo e extração dos óleos de Palma e de Soja, dados de inventário de processos de fabricação do HVO e dados de inventário para a produção de hidrogênio a partir do processo de reforma a vapor.
- Avaliação de categorias de impacto ambiental, como potencial de aquecimento global, potencial de acidificação, potencial de eutrofização, potencial de formação de ozônio, uso de água e uso de recursos fósseis.
- Análise e discussão dos resultados obtidos experimentalmente utilizando as metodologias numéricas desenvolvidas. Análise e discussão dos resultados obtidos por meio da avaliação do ciclo de vida do HVO produzido a partir do óleo de palma e de soja.
-

1.2 Motivação e Relevância

Em processos de geração de energia elétrica, os motores ou moto-geradores são uma das principais fontes de conversão de energia. A escassez de recursos de combustíveis fósseis e a crescente preocupação com a sustentabilidade e impactos ambientais tornam necessárias as pesquisas e os trabalhos técnico-científicos relacionados aos biocombustíveis, com aumento de eficiência e a redução de emissões. A necessidade de adequação a alterações legais e a existência de programas de incentivo, tais como o ROTA 2030 e o RENOVABIO, representam um impulso adicional em direção a uma matriz de combustíveis cada vez mais renovável e sustentável. Recentemente, instituições europeias acordaram metas específicas para a nova Renewable Energy Directive - 2018/2001 (EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 2018), incluindo 14% de energia renovável no transporte ferroviário e rodoviário até 2030. Alinhado a esta tendência mundial, o projeto de Lei PLS 304/2017, atualmente em tramitação no Senado, visa à proibição da venda de motores movidos a combustíveis fósseis no Brasil a partir de 2030. Neste contexto, o emprego de combustíveis produzidos a partir de biomassa, resíduos e/ou fontes limpas em geral merecem especial atenção devido a seu menor impacto ambiental, flexibilidade em decorrência da vasta gama de matérias-primas e ampla adequação à matriz energética brasileira. Além disso, o Governo Brasileiro já iniciou os estudos de viabilidade e incentivo à implementação do HVO para a diversificação da matriz de biocombustíveis. Conforme nota emitida pela ANP ¹ em 2021, onde diferentes modelos de regulamentação são apresentados baseados em rotas de produção do HVO, como a produção a partir da cana de açúcar ou hidrogenação. Também modelos de comercialização são apresentados, como a venda como um combustível puro, misturado com o biodiesel, misturado com o diesel ou uma mistura de diesel/biodiesel/HVO.

Desta forma, no presente trabalho realizou-se um estudo de desempenho ambiental do HVO, diesel renovável hidrogenado, produzido do óleo de soja ou óleo de palma, que proporciona uma outra variante para o já estabelecido e promissor mercado de biocombustíveis no Brasil e do etanol hidratado aplicado na combustão *Dual-Fuel*, aplicados em motores de combustão interna para geração de energia. Os resultados esperados possuem impactos técnico-

¹ <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/analise-de-impacto-regulatorio-air/653252-proposta-de-regulamentacao-do-diesel-verde.pdf>

científico e ambiental relevantes, por serem novos e complementares aos trabalhos da literatura relacionados com o uso do HVO com análise das emissões de poluentes e dos impactos totais causados no Ciclo de Vida deste combustível. Além disso, a pesquisa possui caráter social e econômico no sentido de poder ajudar regiões que possuem potencial energético em forma de biomassa e/ou em forma que poderiam ser transformados ou reaproveitados em biocombustíveis para gerar energia em moto-geradores.

1.3 Estrutura do Trabalho

No capítulo subsequente (Capítulo 2) é apresentada uma fundamentação teórica sobre motores de combustão interna de ignição por compressão, análise de ciclo de vida e biocombustíveis. Em seguida, no Capítulo 3, é realizada a revisão do estado da arte, com descrição dos estudos, problemas e desafios nas áreas de foco do trabalho, posicionando-o dentro do tema e estado da arte da aplicação do diesel verde e outros biocombustíveis aplicados a motores de ignição por compressão. Também são apresentados estudos relevantes sobre a Avaliação do Ciclo de vida de Biocombustíveis, com foco principal no HVO. No Capítulo 4 são apresentadas as metodologias adotadas para a análise experimental. No capítulo 5 são mostrados dados de inventário coletados com o foco de produção do HVO a partir do óleo de palma e de soja. No Capítulo 6 são apresentados os resultados e análises desenvolvidas. posteriormente, no Capítulo 7, são apresentadas as conclusões do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros, respectivamente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No presente capítulo apresentam-se informações sobre Motores de Combustão Interna de Ignição por Compressão e detalhes de funcionamento, detalhes sobre o Ciclo Diesel, serão apresentadas informações sobre biocombustíveis avançados e também a definição da Avaliação do Ciclo de Vida de combustíveis.

2.1 Motores de Combustão Interna

O motor de combustão interna (MCI) pode ser considerado uma das invenções mais significativas que mudou a vida humana nos últimos tempos. Segundo Karim (2015), ele fornece controle rápido e simples da geração de energia enquanto consome uma variedade de combustíveis comumente disponíveis. Enormes esforços e recursos de pesquisa têm sido gastos cada vez mais para melhorar seu desempenho e, ao mesmo tempo, reduzir seu impacto indesejável no meio ambiente. Ao longo dos anos, bilhões de unidades foram produzidas, e o motor de combustão interna tornou-se o principal dispositivo atualmente para a produção de trabalho por meio da queima de combustíveis. Estes dispositivos, que são principalmente do tipo alternativo, empregam combustão intermitente ou podem ser de ação rotativa com combustão contínua. Seus modos de operação diferentes e processos de combustão associados muitas vezes ditam uma escolha restritiva de características de projeto e os tipos de combustíveis que podem ser usados por eles.

O objetivo dos motores de combustão interna é produzir energia mecânica a partir da energia química contida no combustível. Esta energia é liberada queimando ou oxidando o combustível dentro do motor. A mistura ar-combustível antes da combustão e os produtos gerados após a queima são chamados de fluido de trabalho do motor. As transferências de trabalho que fornecem a transformação de energia desejada ocorrem diretamente entre esses fluidos de trabalho e os componentes mecânicos do motor. (HEYWOOD, 2018)

De forma geral, segundo Heywood (2018), dois tipos de MCI's são mais aplicados com mais frequência, e estes são diferenciados pelo tipo de combustão utilizada, denominadas de Ciclo Otto e Ciclo Diesel. O Ciclo Otto é caracterizado pela combustão com volume constante, enquanto o Ciclo Diesel caracteriza-se pela combustão à pressão constante. Outra maneira de se classificar ambos os ciclos, se dá pelo método da ignição da combustão, sendo no primeiro ciclo acionada por centelha e no segundo, acionada espontaneamente ou por

compressão. Nos motores de ignição por compressão, que serão o objeto deste estudo, apenas o ar é aspirado para o cilindro durante a admissão e o combustível é injetado diretamente em cada cilindro imediatamente antes do início do processo de combustão.

De forma a complementar a aplicação dos motores de ignição por compressão, a tecnologia Dual-Fuel foi desenvolvida com o intuito inicial, segundo Karim (2015), de viabilizar a utilização de combustíveis gasosos de maneira conjunta, principalmente com o Diesel convencional. Atualmente, devido à novas políticas de controle de emissões, a tecnologia Dual-Fuel, combinada com a aplicação de novos combustíveis renováveis, é uma forte aliada na redução de emissão de poluentes, como os óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e hidrocarbonetos não queimados (HC). O modelo Dual-Fuel consiste, de forma geral, na injeção de combustível, líquido ou gasoso, no coletor de admissão de ar do motor. O combustível é então transportado à câmara de combustão onde será queimado por meio da ignição do combustível piloto injetado previamente no cilindro. (COSTA, 2021)

2.2 O Ciclo Diesel

O funcionamento dos motores de ignição por compressão pode ser representado em um ciclo ideal de referência. Esse ciclo consiste em uma alteração do ciclo termodinâmico Diesel, adicionando as etapas de admissão e exaustão. Dentre as representações possíveis, opta-se pela utilização do ciclo pressão por volume (Diagrama PV) e o diagrama de temperatura por entropia (Diagrama TS). Para efeitos de simplificação e melhor entendimento dos processos, considera-se o fluido de operação o ar, e calores específicos a volume e pressão constante não variam. Este ciclo é representado esquematicamente na Figura 2-1.

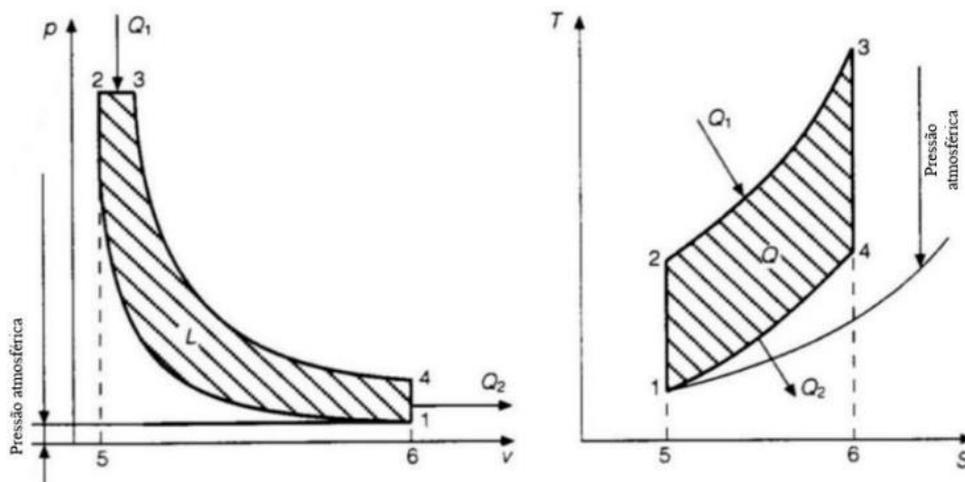


Figura 2-1 - Diagramas PV e TS.

Fonte: Heywood (2018).

Os processos presentes no ciclo são:

0 → 1 – Admissão à pressão constante: o fluido (ar) entra para o cilindro a pressão constante em um processo adiabático, por meio da abertura da válvula de admissão (IVO);

1 → 2 – Compressão isentrópica: o fluido no interior do cilindro é comprimido quando o pistão desloca do ponto 1 para o ponto 2, por meio do fechamento da válvula de admissão (IVC);

2 → 3 – Entrada de energia a pressão constante: nesta etapa o combustível é injetado na câmara de combustão, é atomizado, evaporado e queimado durante a expansão do ponto morto superior (PMS) até atingir o volume do ponto 3;

3 → 4 – Expansão isentrópica: o fluido no interior do cilindro é expandido quando o pistão desloca do ponto 3 para o ponto 4 produzindo trabalho útil;

4 → 1 – Exaustão a volume constante: energia sai do fluido a volume constante;

1 → 0 – Exaustão a pressão constante: o fluido sai do cilindro a pressão constante em um processo adiabático, por meio da abertura da válvula de escape (EVO).

Mecanicamente, o processo de combustão em um motor de quatro tempos, pode ser representado conforme a Figura 2-2. Os processos são denominados a) admissão, b) compressão, c) expansão e d) exaustão.

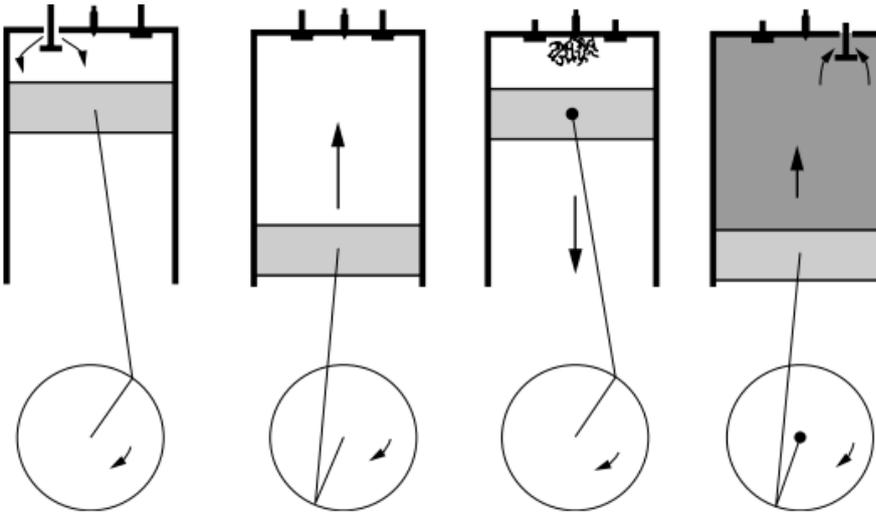


Figura 2-2 - Etapas mecânicas do ciclo Diesel, a) admissão, b) compressão, c) expansão, d) exaustão.

Fonte: adaptado de Karim (2015).

A operação de um MCI de ignição por compressão em função do ângulo do virabrequim é ilustrada na Figura 2-3. Segundo Heywood (2018), a taxa de compressão dos motores diesel é muito maior do que os valores típicos do motor de ignição por centelha e está na faixa de 14 a 22, dependendo do tipo de motor diesel e se o motor é naturalmente aspirado ou turboalimentado. Em um motor aspirado, o ar a uma pressão próxima à atmosférica é induzido durante o curso de admissão e, em seguida, comprimido a uma pressão de cerca de 5 MPa (50 atm) e temperatura de cerca de 900 K (600 ° C) durante o curso de compressão.

Na Figura 2-3 a) mostra-se o volume disponível na câmara de combustão conforme a rotação do virabrequim. A cerca de 20 graus de ângulo do virabrequim, antes do PMS, a injeção de combustível no cilindro do motor começa (SOI). Uma taxa típica de perfil de injeção é mostrada na Figura 2-3 b). Normalmente, existem quatro a oito ou mais jatos de combustível líquido. Cada jato que sai do bico injetor atomiza-se em gotas para formar um conjunto de sprays que penetram na câmara de combustão. Em cada pulverização, as gotas de combustível líquido evaporam e o vapor do combustível se mistura com o ar. A temperatura e pressão da mistura combustível-vapor e ar alcançam um ponto acima do ponto de ignição onde a oxidação do combustível começa ocorrer. Assim, a ignição espontânea (autoignição) de partes da mistura não uniforme de combustível-ar dentro desses sprays inicia o processo de combustão, e a pressão do cilindro se eleva à medida que a energia da combustão é liberada. (DA COSTA, 2021)

À medida que o processo de expansão prossegue, conforme mostra a Figura 2-3 c), a mistura entre o vapor do combustível, o ar e os gases em combustão continuam, acompanhada

por mais combustão, como mostra a Figura 2-3 d). Em plena carga, a massa de combustível injetada é cerca de 5% da massa de ar no cilindro. No processo de exaustão ocorre uma rápida saída dos gases queimados assim que as válvulas de exaustão começam a abrir, seguido pelo deslocamento dos gases queimados restantes do cilindro durante o curso de exaustão. No final do curso de exaustão, o ciclo começa novamente

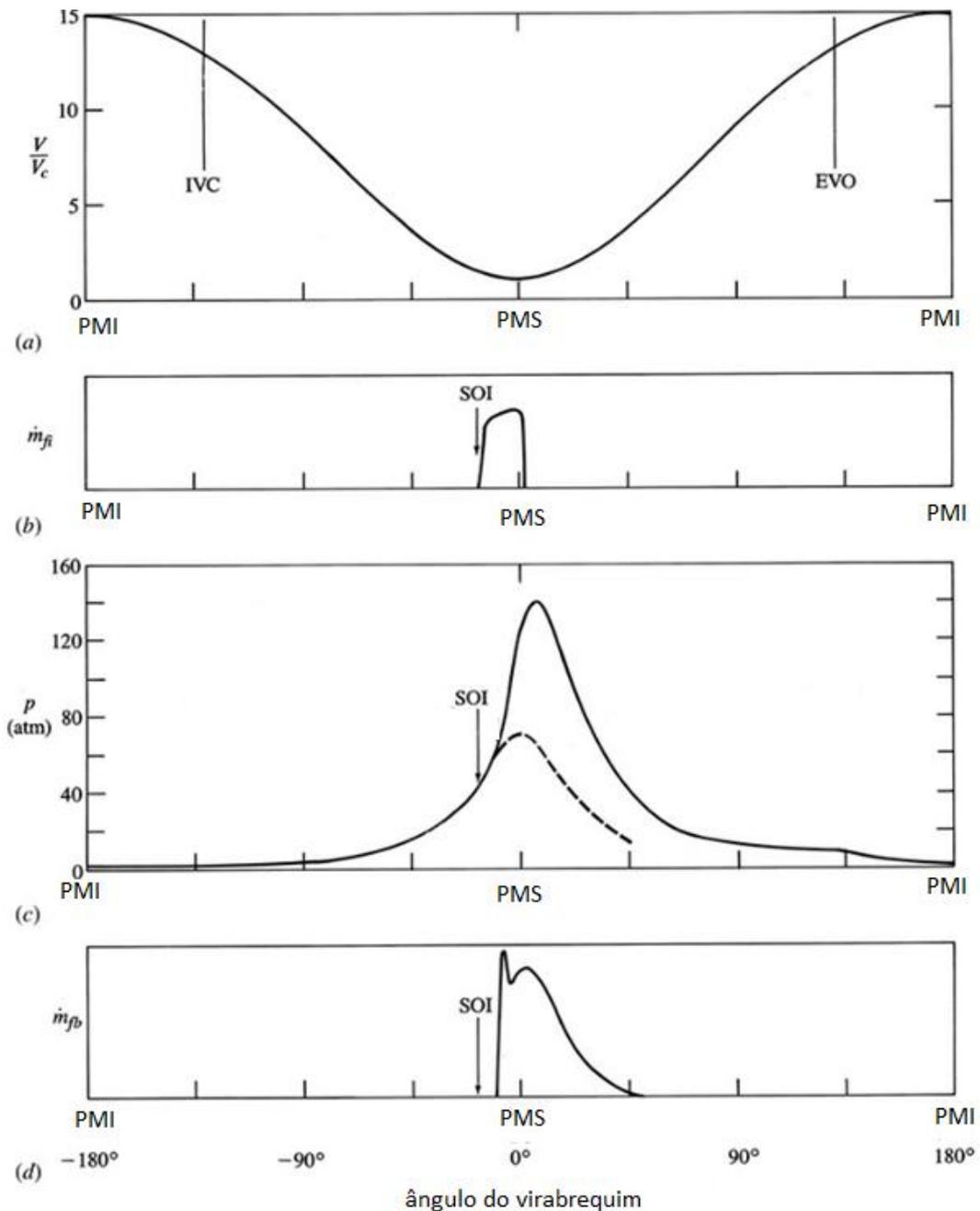


Figura 2-3 - Processo de combustão a) Volume disponível na câmara de combustão, b) Tempo de injeção, c) Pressão no cilindro, d) Tempo de exaustão

Fonte: adaptado de Heywood (2018).

2.2.1 Relações Volumétricas no Motor

Nos motores de combustão interna que operam em ciclo de quatro tempos, um ciclo corresponde a duas voltas completas do eixo da árvore de manivelas. Através de um sistema biela-manivela, conforme a Figura 2-4, o movimento alternativo dos pistões é transformado em um movimento rotativo, acoplados ao eixo através das bielas, sendo que o curso total de deslocamento dos pistões se encontra entre o ponto morto superior (PMS) e o ponto morto inferior (PMI).

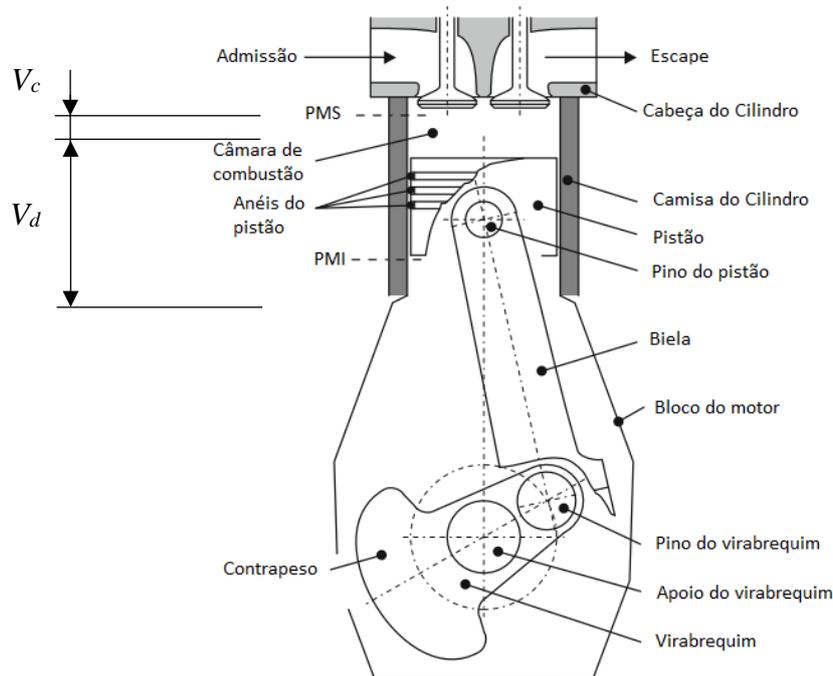


Figura 2-4 - Representação esquemática de um MCI

Fonte: adaptado de Merker, Schwarz, e Teichmann (2012).

A razão volumétrica de compressão (r_c) é uma característica construtiva do motor que tem grande influência na eficiência térmica, sendo definida como o quociente entre os volumes disponível no cilindro quando o pistão está no PMI e no PMS. O volume disponível no cilindro quando o pistão está no PMS é o volume fixo da câmara de combustão, V_c , e o volume quando o pistão está no PMI é o volume fixo da câmara de combustão acrescido do volume deslocado, V_d . A r_c pode ser calculada pela Equação 2-1:

$$r_c = \frac{V_d + V_c}{V_d} \quad (1)$$

2.2.2 Combustão em motores de combustão interna de ignição por compressão

Os motores a diesel convencionais dependem da ignição por compressão de um jato de combustível líquido atomizado injetado em um cilindro com alta temperatura e pressão, ao final do curso de compressão do ciclo. Segundo Karim (2015), os MCI's por compressão possuem algumas características únicas, sendo elas:

- Os motores a diesel precisam ter taxas de compressão suficientemente altas para garantir a autoignição confiável, rápida e bem controlada do combustível injetado. Eles envolvem misturas não homogêneas de combustível-ar, levando principalmente à combustão do tipo de difusão heterogênea. A rápida liberação de energia produzida requer uma construção robusta do motor para suportar as altas taxas de carregamento mecânico e térmico resultantes.
- O motor requer combustíveis líquidos adequados que, em comparação com os de ignição por centelha, são mais propensos à autoignição e têm altos índices de cetano, mas ao mesmo tempo índices de octanagem muito baixos. A operação com excesso de ar é empregada com intensa turbulência de modo a auxiliar na rápida atomização, vaporização e subsequente mistura do combustível e ar.
- As emissões em motores a diesel tendem a apresentar níveis baixos de monóxido de carbono e hidrocarbonetos não queimados, mas níveis relativamente altos de NOx e partículas. Atualmente, para tornar suas emissões de gases de escape ambientalmente aceitáveis, a maioria dos tipos de motores requer um tratamento especial bem como a adoção de novas tecnologias, como a Dual-Fuel.

Segundo Heywood (2018), as características essenciais do processo de combustão a diesel ocorrem em uma ordem bem definida, e podem ser organizadas, conforme a seguir.

- O combustível é injetado pelo sistema de injeção de combustível no cilindro do motor no final do curso de compressão, pouco antes do início de combustão desejado (SOC, do inglês, start of combustion).
- O combustível líquido, injetado em alta velocidade, geralmente em forma de vários jatos através de pequenos orifícios ou bicos na ponta do injetor, atomiza-se em pequenas gotas e penetra no ar de elevada temperatura e elevada pressão na câmara de combustão.
- O combustível vaporiza e o vapor do combustível se mistura com o ar. A mistura de ar de alta temperatura combustível-vapor assim produzida entra em ignição

espontaneamente, após um período de retardo de alguns graus de ângulo de virabrequim, e começa a queimar.

- A injeção continua até que a quantidade desejada de combustível entre no cilindro. A atomização, vaporização, mistura combustível-ar e combustão continuam até que praticamente todo o combustível tenha passado por cada processo. Além disso, a mistura do ar remanescente no cilindro com gases queimados e já queimados continua ao longo da combustão e expansão

A ignição por compressão é um processo complexo, envolvendo diferentes composições e propriedades de diferentes combustíveis, no *design* da câmara de combustão, tipo de injeção de combustível e regime de operação do motor.

Tradicionalmente, os motores a diesel foram divididos em duas categorias básicas de acordo com seu projeto de câmara de combustão: (1) motores de injeção direta, que têm uma única câmara de combustão aberta na qual o combustível é injetado diretamente e (2) motores de injeção indireta, onde a câmara é dividida em duas regiões e o combustível é injetado na “pré-câmara”. Os projetos de motores de injeção indireta foram usados extensivamente em motores menores, mas foram substituídos por projetos de motores de injeção direta de alta velocidade.

A Figura 2-5 são mostradas algumas configurações de injeção direta de combustível, categorizados por suas geometrias de câmara, fluxo de ar e posição do spray de combustível, sendo (a) câmara com bico de múltiplos orifícios, típico de motores maiores; (b) câmara em pistão com *swirl* moderado e injetor com múltiplos orifícios; (c) com cavidade no pistão reentrante com *swirl* alto e injetor multiorifícios.

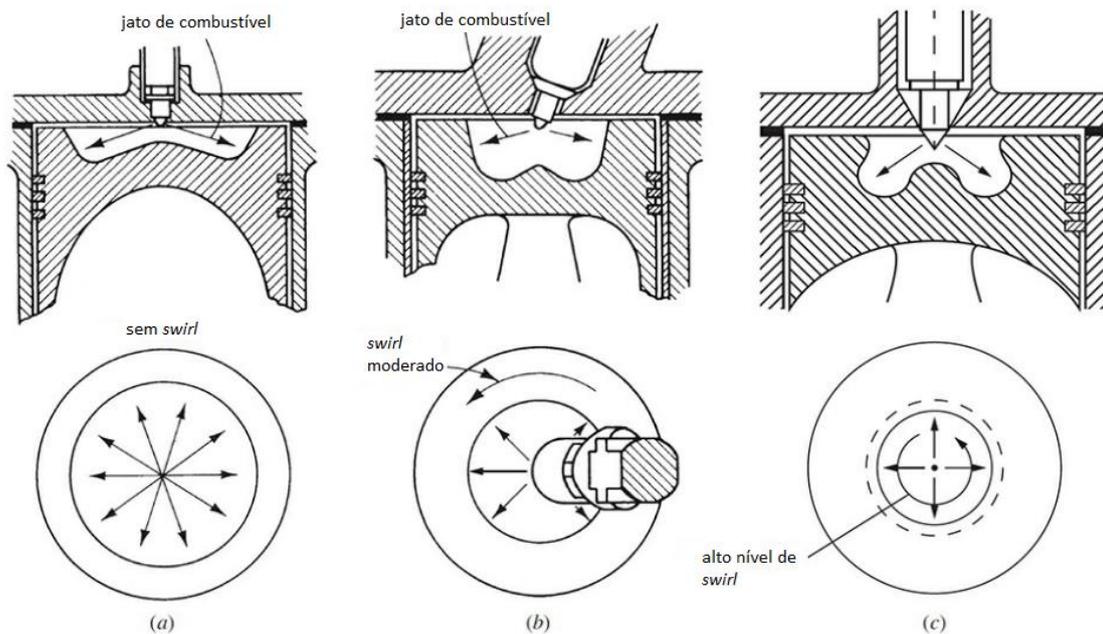


Figura 2-5 - Diferentes configurações de injeção direta de combustível. a) sem swirl, b) com swirl, c) com swirl elevado

Fonte: adaptado de Heywood (2018).

2.2.3 Atraso de Ignição

Há um atraso observável em motores a diesel entre o início da injeção de combustível e a primeira detecção de ignição. Karim (2015) cita que a duração desse atraso de ignição é de suma importância e controla o progresso do processo de combustão e afeta a maioria dos aspectos do desempenho do motor. Atrasos de ignição excessivamente longos trazem reduções no torque e na eficiência com o aumento das emissões.

O período de atraso foi considerado por conveniência como sendo composto de duas partes sobrepostas devido aos tempos necessários para satisfazer os processos físicos e químicos que levam a uma ignição bem-sucedida. Geralmente, a parte química do atraso tende a ser mais longa do que a parte física, mas os eventos de reação química são acelerados exponencialmente em altas temperaturas, enquanto os processos que são de natureza física tendem a aumentar com a temperatura relativamente em uma extensão muito menor, quase linearmente. (PEDROZO, 2017)

Mostra-se na Figura 2-6 os registros de desenvolvimento de pressão para três valores de atraso de ignição amplamente diferentes. Observa-se que o adiantamento da ignição em relação ao PMS possibilita ao motor atingir um pico mais elevado de pressão no cilindro. O

avanço de ignição deve ser otimizado de forma que o pico de pressão seja o maior possível e ocorra instantes após o PMS. Deste modo garante-se uma maior eficiência no uso da energia química do combustível, além de um torque elevado no eixo do motor.

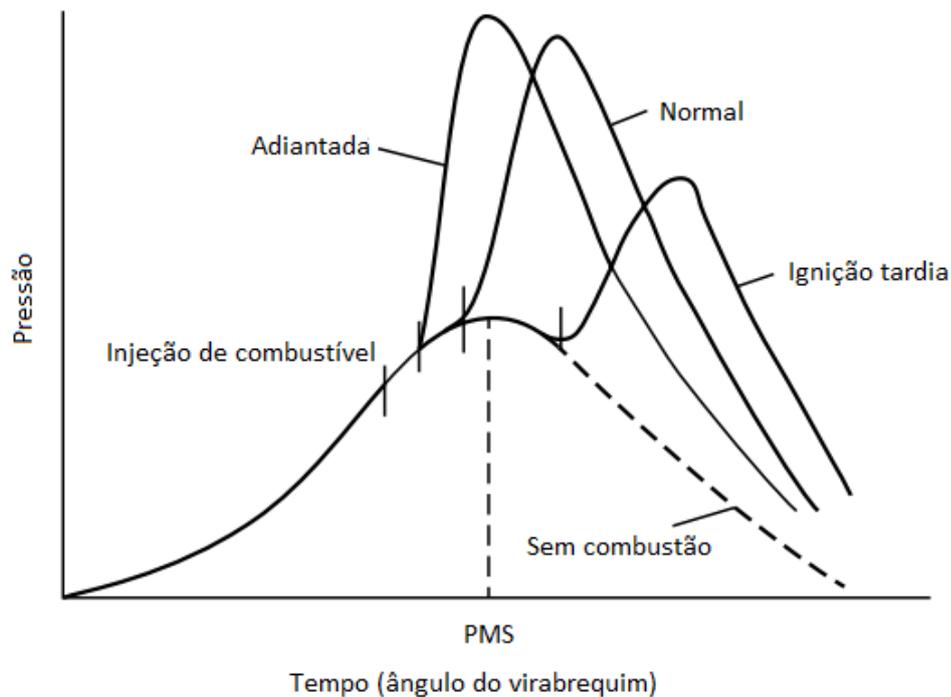


Figura 2-6 - Desenvolvimento de pressão no cilindro para diferentes atrasos de ignição

Fonte: adaptado de Karim (2015)

Alguns dos fatores físicos do motor que afetam o atraso de ignição são, segundo Karim (2015):

- Tempo/Avanço de injeção: Um dos fatores com maior influência sobre o atraso de ignição. Com o motor operando em condições normais, o menor atraso de ignição acontece com o início de injeção entre 10 e 15 graus antes do PMS. Com a injeção começando mais cedo, o atraso de ignição aumentará, pois, a temperatura e a pressão inicial é menor.
- Quantidade de injeção: Injetando-se maior quantidade de combustível, a temperatura do gás residual e da parede aumenta, o que faz a temperatura do combustível aumentar na injeção, e com isso o atraso de ignição diminui.
- Temperatura e pressão do ar de admissão: Para temperaturas abaixo de 1000K, a temperatura tem uma forte influência no atraso de ignição. Seu aumento causa um aumento na temperatura do ar comprimido fazendo o combustível injetado vaporizar

mais facilmente. Com isso o atraso de ignição diminui. A pressão dentro desta faixa de temperatura abaixo de 1000 K também afeta o atraso de ignição, quanto maior a pressão menor é o atraso de ignição, porém conforme a temperatura aumenta e o atraso diminui, a influência da pressão no valor do atraso fica menor.

- Velocidade do motor: Um aumento na velocidade angular do motor a uma carga constante resulta numa leve diminuição do atraso de ignição quando medido em milissegundos.

As características de ignição de um combustível também afetam o atraso de ignição. Assim, as propriedades físicas e químicas do combustível são muito importantes para a determinação das características operacionais do motor Diesel, como por exemplo sua eficiência, a emissão de gases poluentes, a facilidade de partida no motor e seu funcionamento sob carga. A qualidade de ignição de um combustível é definida pelo seu número de cetano.

2.3 Dual-Fuel

Na busca pela substituição do óleo diesel em motores de ignição por compressão, começaram a surgir na década de 1950 pesquisas que aliassem à injeção do diesel, injeções de outros combustíveis visando-se à substituição do diesel, assim como a redução das emissões de fumaça dos motores de ignição por compressão do tipo convencional.

As estratégias de injeção *Dual-Fuel* se revelam como promissoras ferramentas na busca de motores de ignição por compressão de altas eficiências e baixas emissões de NOx e fuligem. Após anos de amadurecimento no campo das pesquisas sobre o método, no qual dois combustíveis com diferentes características de autoignição são misturados no interior do cilindro, Bessonette *et al.* (2007) apontam a abordagem da diferença de reatividade dentro do cilindro como uma estratégia eficaz de lidar com combustões Dual-Fuel. Nesta mesma linha de pesquisa, Inagaki *et al.* (2006) mostraram que não somente a razão de equivalência, mas também a estratificação da reatividade do combustível contribui para taxas de liberação de calor menores e ruídos dentro dos padrões aceitáveis (KOKJOHN *et al.*, 2011).

A operação de Dual-Fuel pode ser alcançada pela instalação de um injetor secundário de combustível, geralmente no coletor de admissão para a formação de uma mistura de ar e combustível, conforme mostra a Figura 2-7. O combustível secundário, também chamado de combustível de baixa reatividade, pode ser gasoso (Gás Natural Veicular, Hidrogênio, Biogás) ou líquido (gasolina ou etanol) (REITZ *et al.*, 2015). O diesel é geralmente utilizado como

combustível de alta reatividade, entretanto substitutos como o HVO, farnesano e biodiesel podem ser aplicados como combustível primário. (LI *et al.*, 2017). Propriedades do combustível, bem como variações no tempo de injeção de diesel e razão de substituição (por exemplo, fração de energia de cada combustível) podem alterar as características de combustão *Dual-Fuel*, como as emissões de gases poluentes e eficiência térmica do motor.

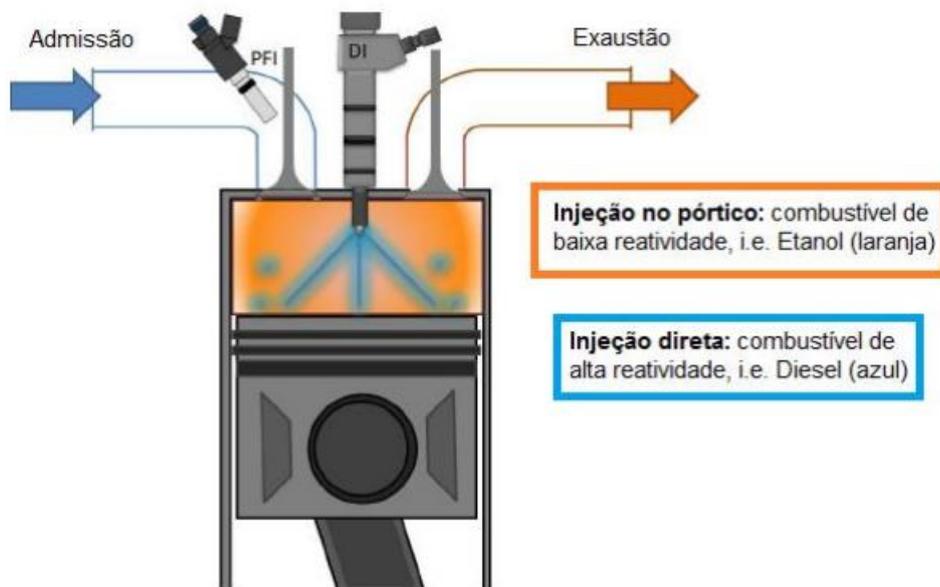


Figura 2-7 - Estratégia *Dual-Fuel* com injetor de combustível de baixa reatividade posicionado no pórtilo de admissão do motor

Fonte: Guedes (2017)

A combustão *Dual-Fuel* otimizada permite uma melhor preparação da mistura e menores emissões NO_x e de material particulado do que a combustão convencional de diesel (PEDROZO *et al.*, 2016). Em particular, uma redução significativa de fuligem pode ser alcançada em taxas elevadas de EGR (HAN *et al.*, 2015; DIVEKAR *et al.*, 2015). Melhorias na eficiência também são alcançáveis como resultado de menores perdas de transferência de calor introduzidas por temperaturas de combustão reduzidas e menor duração da queima (KOKJOHN *et al.*, 2011).

De acordo com Asad *et al.* (2015) e reforçado pelos testes da tese de Egúsquiza (2011), a alta entalpia de vaporização e o baixo ponto de vaporização do etanol (mais volátil que a gasolina) contribuem para redução dos picos de pressões e temperaturas ao final da etapa de compressão. Curran, Hanson e Wagner (2012) ainda complementam lembrando que a reatividade do etanol é menor que a da gasolina devido ao baixo número de cetano deste, o que gera um gradiente de reatividade mais amplo nos processos. Além disto, estes autores afirmam

que a combinação de gradientes mais acentuados de reatividades entre os combustíveis e o efeito de resfriamento da carga admitida possibilita uma faixa de carga maior para aplicação RCCI. Asad *et al.* (2015) evidenciaram através de testes experimentais, vide Figura 2-8, que variando-se a fração de etanol (EF) entre 1/3 e 2/3 via injeção indireta e quantificada em termos de energia do combustível injetado, houve queda na pressão em aproximadamente 8 bar e reduções de temperatura da ordem de 100 K ao final do ciclo de compressão.

Estudos também demonstraram o potencial do *Dual-Fuel* na ignição por compressão controlada por reatividade (RCCI) para atingir emissões de NO_x e fuligem ultrabaixas e aumentar a eficiência do motor (BENAJES *et al.*, 2014). A combustão RCCI depende da mistura de combustível no cilindro para gerar gradientes de reatividade de combustível que resultam em controle sobre o evento de combustão (DESANTES *et al.*, 2015). As injeções iniciais de diesel e altos níveis de EGR são frequentemente empregados. A desvantagem da combustão RCCI é a alta sensibilidade às variações da temperatura e pressão do ar de admissão, visto que a estratégia é baseada na pré-mistura do ar-combustível e regido pela cinética química (REITZ *et al.*, 2015). No entanto, a operação *Dual-Fuel* pode representar uma solução mais econômica para alcançar conformidade de emissões e alta metas de eficiência do que a combustão somente diesel. Além disso, a substituição parcial do diesel por combustíveis de baixo carbono, como etanol e Gás Natural Veicular pode minimizar as emissões de CO₂ enquanto diversifica o suprimento de energia do combustível.

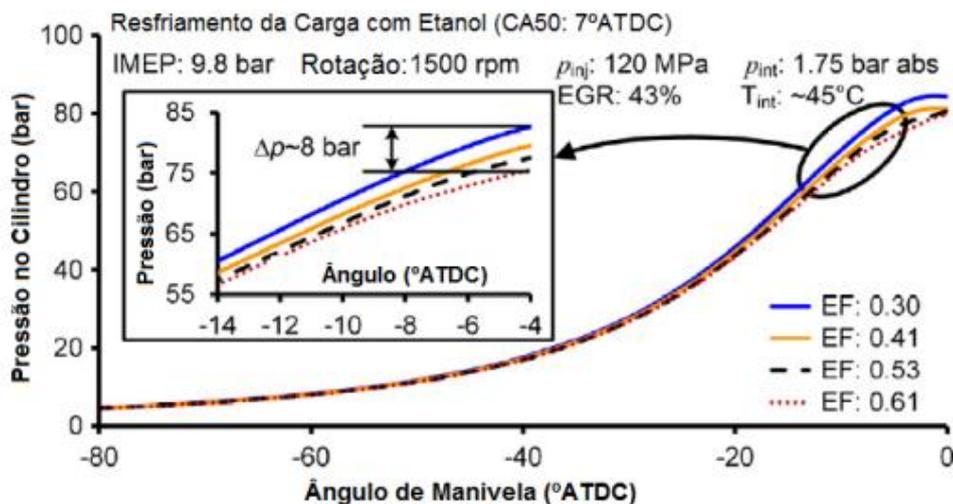


Figura 2-8 - Efeitos na combustão *Dual-Fuel* na injeção de diferentes frações de etanol

Fonte: Adaptado de Asad *et al.* (2015)

2.4 Biocombustíveis

Grande parte da energia consumida, tanto no Brasil quanto no mundo, provém principalmente de fontes não renováveis, como o petróleo. Como mostra a Figura 2-9, em 2018, mais de 50% da produção energética mundial é dependente do conjunto gás natural e petróleo. No Brasil, de forma semelhante, a demanda energética também é suprida em grande parte pelos recursos não renováveis.

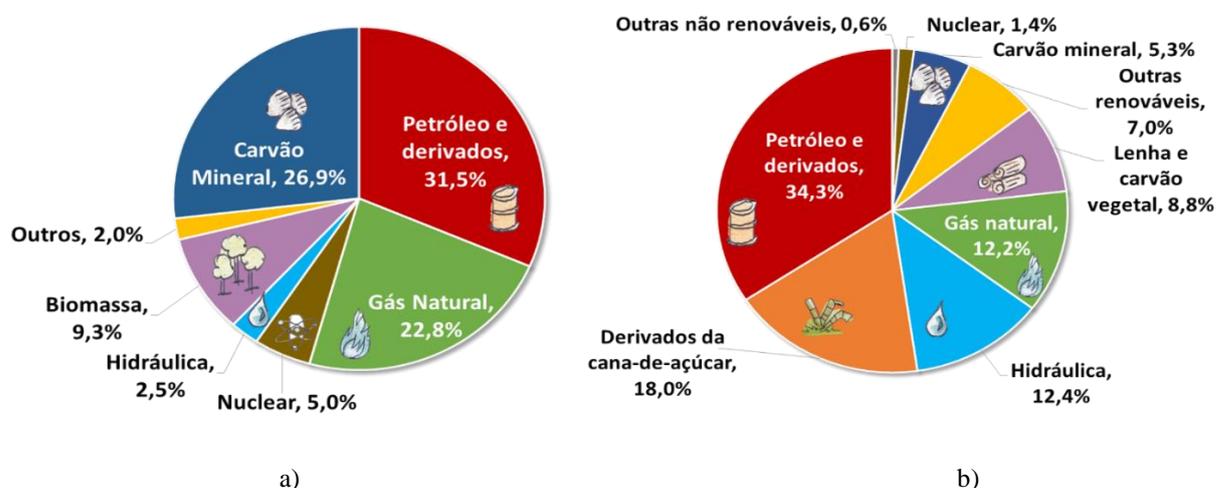


Figura 2-9 - Matriz Energética a) Mundial e b) Brasileira – 2018

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética²

Segundo Ghesti (2009), devido ao grande potencial poluidor e ao fato da possibilidade de esgotamento de reservas de extração do petróleo, considera-se a alternativa de utilização de biocombustíveis para suprir a necessidade energética mundial. Esta prática já é aplicada e possui grande potencial de expansão, como mostra a Figura 2-10, o consumo de biodiesel no mundo vem crescendo ano após ano.

² Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>

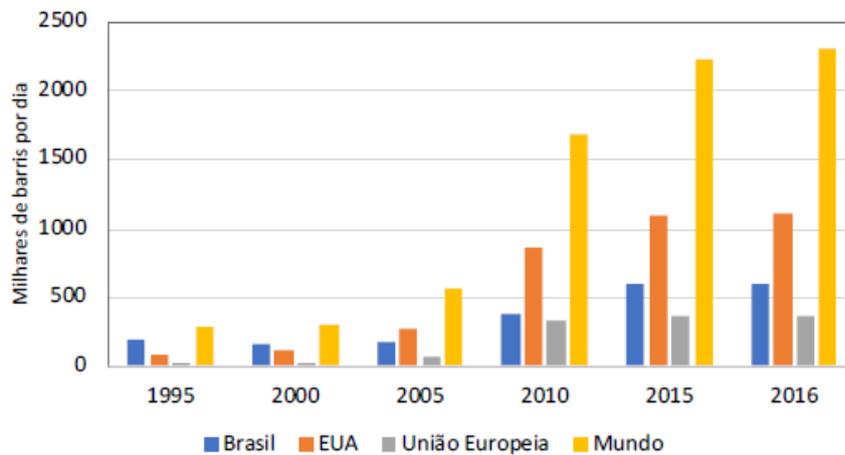


Figura 2-10 - Evolução do consumo de biocombustíveis no Brasil, EUA, Europa, e no mundo, entre os anos de 1995 e 2016

Fonte:(SAMÚDIO, 2018)

Tratando-se de motores a combustão por ignição a compressão, os biocombustíveis parafínicos são os mais promissores. Dentre estes, destacam-se o HVO (do inglês – *Hydrotreated Vegetable Oil*) produzido pela hidrogenação de óleos vegetais, os combustíveis Fischer-Tropsch produzidos pela polimerização do syngas e os combustíveis produzidos a partir de açúcares diretamente para hidrocarbonetos ou DSHC (do inglês - *Direct Sugar to Hydrocarbon*) e o farnesano, também chamado de diesel da cana (SOTO et al., 2019).

Considerando a molécula de combustível, os combustíveis alternativos para motores de ignição por compressão podem ser classificados em três categorias principais: biodiesel, mistura de alcanos/olefinas e isoprenóides (SORIANO et al., 2018):

- Biodiesel: de acordo com o Art. 2o, Seção II da Resolução ANP No45, de 25/08/2014, biodiesel é definido como um “combustível composto de alquil ésteres de ácidos carboxílicos de cadeia longa, produzidos a partir da transesterificação e/ou esterificação de triglicérides, de gorduras de origem vegetal ou animal”, devendo ainda atender às especificações técnicas (ANP, 2014). O biodiesel trata-se de um combustível biodegradável cuja produção utiliza recursos renováveis. Sua aplicação em motores de ignição por compressão pode ser tanto na forma pura como na forma de uma mistura com diesel em diferentes proporções. É o biocombustível mais amplamente estudado no Brasil e as reduções nas emissões de HC e de material particulado em relação ao diesel convencional são amplamente divulgadas na literatura. Esses benefícios se devem principalmente à presença de oxigênio e à ausência de compostos aromáticos em sua composição, que favorecem um processo de combustão mais limpo (GHESTI, 2009).

- Misturas de alcanos/olefinas: são estruturas parafínicas formadas por compostos obtidos pelo processo de hidrotreatamento de óleos vegetais. Embora as matérias-primas possam ser semelhantes às utilizadas na produção de biodiesel, as propriedades do óleo vegetal hidrogenado ou HVO são mais próximas às do diesel convencional (geralmente com maior número de cetano e poder calorífico) (SINGH et al., 2018). A principal desvantagem do HVO é seu alto custo de produção. A integração desse processo em instalações de hidrocessamento de refinarias convencionais pode reduzir os custos de produção, tornando mais atraente este combustível (Suarez-Bertoa et al., 2019).

- Isoprenóides: são uma ampla família de compostos derivados do isopreno (C₅H₈), sendo o Farnesano (2, 6, 10-trimetildodecano) o combustível mais comum. Seu processo de produção (DSHC) começa com a fermentação de açúcares derivados de biomassa por microorganismos geneticamente modificados, obtendo um composto chamado Farneseno, que posteriormente é hidrogenado para gerar o Farnesano. Este alcano apresenta alto poder calorífico, alto número de cetano e baixo ponto de congelamento, o que o torna um candidato em potencial para substituição do diesel. (Soto et al., 2019).

Dentre os combustíveis citados, são de interesse para este estudo o HVO, cujas principais propriedades serão mostradas a seguir.

2.4.1 HVO

O HVO é um óleo parafínico produzido a partir de diversos tipos de óleos vegetais, como canola, girassol, soja e óleo de palma, além de gorduras animais. Pode ser utilizado em motores a diesel convencionais, puro ou em mistura com diesel fóssil. Estudos recentes apontam que o HVO pode substituir diretamente o diesel convencional ou misturar-se com ele em qualquer proporção, sem modificação dos MCI. (Dimitriadis et al., 2018).

Observa-se, que o HVO possui menor massa específica, viscosidade e ponto de destilação, o que resulta em melhores resultados para a injeção e queima do combustível, se comparado ao diesel convencional. Além disso, o HVO possui conteúdo energético semelhante ao diesel convencional, porém com menor conteúdo de enxofre, o que acarreta na redução de emissão de poluentes. (SOTO, 2014). Na tabela 2-1 apresentam-se algumas das principais propriedades.

Tabela 2-1 - Propriedades do HVO comparadas ao diesel convencional e ao biodiesel.

Combustível	Massa Específica	Viscosidade	Destilação	Conteúdo Energético	Conteúdo de Enxofre	Conteúdo de oxigênio
-	kg/m ³	mm ² /s	°C	MJ/kg	mg/kg	% em massa
Diesel Convencional	835	3,5	350	43	<10	0
Biodiesel	885	4,5	355	38	<1	11
HVO	775	2,9	300	44	~0	0

Fonte: adaptado de Soto (2014)

A produção de HVO envolve diferentes atividades desde a escolha da matéria prima a ser utilizada, produção de hidrogênio e processo de hidrotratamento onde o combustível é obtido, como mostra a figura 2-11. A síntese pode ser feita a partir do óleo vegetal e animal, como por exemplo os óleos da soja, girassol, amendoim, gorduras e óleos residuais.

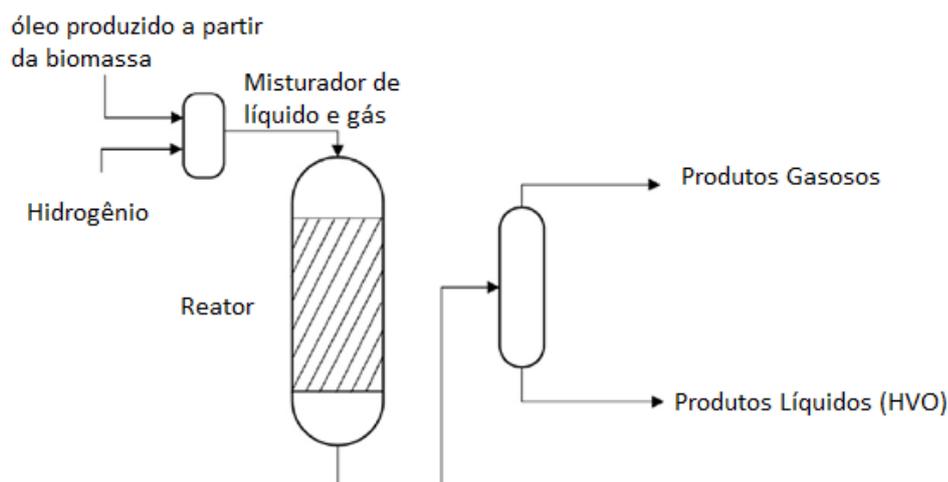


Figura 2-11 - Processo de Hidrotratamento do Óleo Vegetal para a produção do HVO

Fonte: adaptado de Sonthalia E Kumar (2019).

- A etapa de pré-tratamento da matéria prima consiste na eliminação de resíduos que podem dificultar e interferir no processo de hidrotratamento, como vestígios de metais e sabões que podem afetar negativamente a qualidade do produto final. Os processos geralmente utilizados são: os de neutralização, que remove os ácidos graxos livres (*free fatty acids*) com uso de soluções alcalinas; degomagem, responsável por eliminar todo tipo de fosfatídios e branqueamento, que visa diminuir a quantidade de fosfatídios não convertidos, vestígios de metais entre outros contaminantes.

- O hidrogênio a ser utilizado na etapa de hidrotratamento geralmente é fornecido por uma refinaria de óleo ou pela reforma de gás natural, onde metano (CH_4) e vapor reagem produzindo hidrogênio e dióxido de carbono (CO_2). Outras opções envolvem a obtenção de hidrogênio a partir da eletrólise da água, como abordado por Lorenzi et al. (2019). Esta etapa levanta questões sobre a característica do HVO ser ou não um combustível renovável, já que se utiliza gás natural para a produção do hidrogênio. Uma alternativa verde para a produção de hidrogênio seria a sua obtenção a partir da reforma do vapor de glicerol, conforme abordado por (Rocha et al., 2021).

- O processo de hidrotratamento possibilita a conversão de lipídios e triglicerídeos no HVO. Este processo baseia-se na mistura da biomassa com o hidrogênio, em condições de temperatura que variam na faixa de 250 a 450 °C e pressão de hidrogênio entre 10-300 bar, dependendo do tipo e configuração do reator e do catalisador usado. É nesse momento, devido ao excesso de hidrogênio presente na mistura, que ocorre o processo de quebra das ligações duplas entre os carbonos para formação de ligações simples. A próxima etapa é a de desoxigenação, a qual pode ser feita através de três reações: descarboxilação, descarbonilação, hidrodesoxigenação. Nessa fase, as reações eliminam o oxigênio em forma de propano (C_2H_8), dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O), convertendo os triglicerídios em cadeias parafínicas. Retiradas as moléculas de oxigênio, os produtos saem do reator e o óleo é separado da água e do *syngas*. A cadeia de hidrocarbonetos formada tem alto número de cetano, entretanto suas propriedades a frio dificultam a utilização do combustível em regiões mais frias. Para resolver esse problema, o combustível pode passar por um *upgrade* como o processo de isomerização, que transformará n-parafinas em iso-parafinas, as quais possuem menores pontos de congelamento. Dentre as condições em que o hidrotratamento é realizado, a temperatura e o uso de catalisadores são os parâmetros mais importantes na reação, dado que controlam a formação dos produtos. (Sonthalia & Kumar, 2019).

Torres-Ortega *et al.* (2017) detalham também um estudo de integração de um sistema de produção de biodiesel juntamente com o HVO, utilizando um sistema de cogeração que aproveita o glicerol para a produção de oxigênio a ser utilizado na produção do HVO. Segundo os autores, esta integração pode reduzir significativamente os custos de produção de ambos os combustíveis.

Alguns estudos relevantes são mostrados ao longo do trabalho, evidenciando o potencial de utilização do HVO e seus respectivos potenciais de redução de poluentes.

2.4.2 Farnesano

Segundo AMYRIS (2012), o farnesano, também chamado de diesel de cana, pode ser classificado como um biodiesel, produzido a partir de açúcares fermentáveis existentes no xarope de cana, com o uso de leveduras geneticamente modificadas. O óleo produzido a partir desta fermentação ($C_{15}H_{24}$) é chamado de farneseno, e é posteriormente tratado com a utilização de hidrogênio para se obter a qualidade final necessário do combustível. O produto final ($C_{15}H_{32}$) é um isoprenoide e possui estrutura molecular conforme a Figura 2-12.

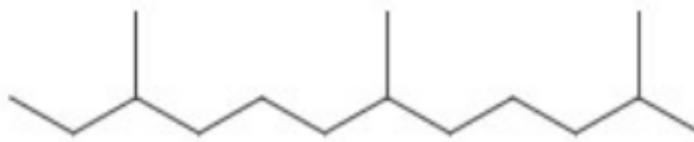


Figura 2-12 - Estrutura molecular do farnesano ($C_{15}H_{32}$)

Fonte: AMYRIS (2012)

Dentre as formas de produção do farnesano, destaca-se o método de produção DSCH (do inglês – conversão direta de açúcar para hidrocarboneto). Neste processo o caldo da cana é desidratado por meio da evaporação do conteúdo de água onde é gerado o xarope de açúcar. Ocorre a adição de oxigênio e com a ação de leveduras é produzido o farneseno, que a partir da hidrogenação, resultará no farnesano. Tal processo é ilustrado na Figura 2-13.

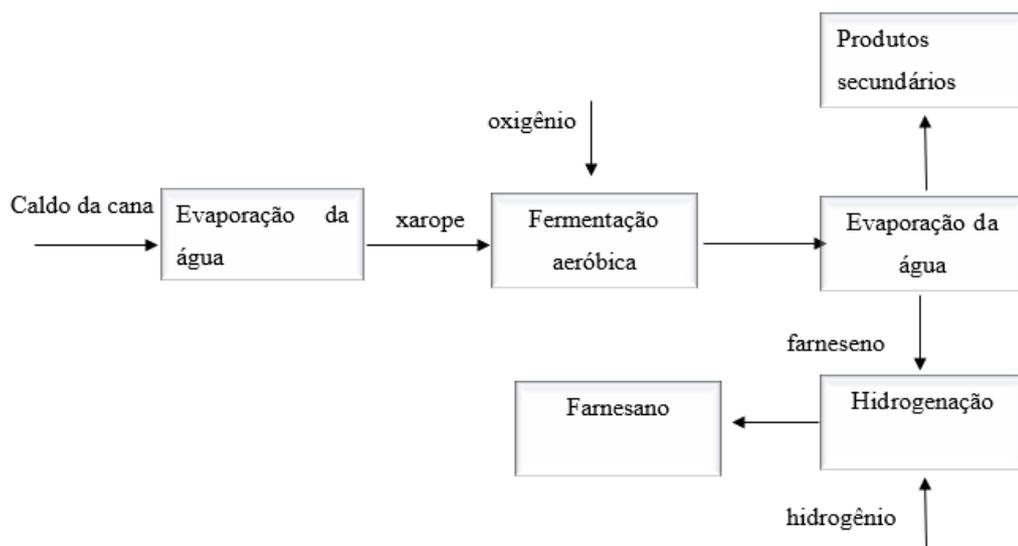


Figura 2-13 - Esquema de um processo DSCH

Fonte: adaptado de Neuling e Kaltschmitt (2014).

O farnesano é livre de impurezas, tal como o enxofre, e seu processo de combustão diminui significativamente os particulados nos gases de exaustão. Segundo Santos (2013), entre os poluentes emitidos pela combustão, os particulados são os mais prejudiciais ao meio ambiente. Particulados menores que 100 nm são conhecidos como fuligem e diminuem a eficiência do processo de combustão.

Millo et al. (2014) estudaram os efeitos causados pelo uso de uma mistura de 30% de farnesano com diesel em um pequeno motor diesel e concluíram que as emissões específicas de CO e HC foram reduzidas significativamente com a mistura em cargas baixas e médias.

Por outro lado, Conconi e Crnkovic (2013) pesquisaram a energia de ativação do processo de combustão do farnesano, diesel e biodiesel. Considerando que quanto menor a energia de ativação menor é o atraso de ignição, quando comparado ao biodiesel o farnesano apresenta menor energia de ativação, sendo assim melhores características de combustão. Entretanto quando há presença do Diesel a energia de ignição diminui ainda mais na fase inicial do processo térmico, consequentemente melhorando o desempenho da ignição da mistura. Quando a mistura é feita com biodiesel novas características são apresentadas, sendo que em cada proporção há um comportamento diferente. Na tabela 2-2 mostram-se algumas propriedades do farnesano.

Tabela 2-2 - Propriedades do farnesano

Combustível	Massa Específica	Viscosidade	Destilação	Conteúdo Energético	Conteúdo de Enxofre	Conteúdo de oxigênio
-	kg/m ³	mm ² /s	°C	MJ/kg	mg/kg	% em massa
Farnesano	770	2,71	340	43,43	0	0

Fonte: adaptado de AMYRIS (2012)

O Brasil é atualmente o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, com participação de cerca de 40% da produção mundial. Então, é de interesse econômico o desenvolvimento deste biocombustível no país. Devido a este potencial, algumas práticas de incentivo à utilização do farnesano já foram praticadas: em abril de 2014, já haviam autorizações da ANP para o uso do farnesano como combustível em misturas de 85% de óleo diesel A S10, 5% de biodiesel e 10% de óleo diesel de cana-de-açúcar. Na cidade de São Paulo, 402 ônibus urbanos

foram abastecidos com a mistura, num volume mensal de até 1.500.000 de litros. Em setembro do mesmo ano foram incluídos ônibus urbanos do Rio de Janeiro para utilização da mistura, com o mesmo limite de volume mensal de 1.500.000 litros. Em 2015 a autorização veio para uso experimental, com uma mistura variando de 10% a 30% de farnesano, 7% de biodiesel e o restante de diesel fóssil.

Alguns estudos relevantes são mostrados ao longo do trabalho, evidenciando o potencial de utilização do farnesano e seus respectivos potenciais de redução de poluentes.

2.5 Avaliação do Ciclo de Vida

A Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (ABNT NBR ISO 14041:2004) define a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) - ou LCA do Inglês – *Life Cycle Assessment* - como uma técnica para avaliar aspectos ambientais e impactos potenciais associados a um produto com seguinte procedimento:

- Compilação de um inventário de entradas e saídas pertinentes de um sistema de produto;
- Avaliação dos impactos ambientais potenciais associados a essas entradas e saídas;
- Interpretação dos resultados das fases de análise de inventário e de avaliação de impactos em relação aos objetivos do estudo. Entende-se por “sistema de produto” o conjunto dos processos que realiza a função do produto (ABNT NBR ISO 14041:2004), ou seja, os processos que, segundo o modelo definido para o estudo, compõem o ciclo de vida do produto em questão.

O termo LCA foi utilizado primeiramente nos EUA em 1990. A designação histórica para estes estudos de ciclo de vida ambiental, utilizados nos Estados Unidos desde 1970, era “*Resource and Environmental Profile Analysis*” (REPA). Contudo, um dos primeiros estudos quantificando as necessidades de recursos, emissões e resíduos originados por diferentes embalagens de bebidas foi conduzido pelo “*Midwest Research Institute*” (MRI) para a Companhia Coca Cola em 1969. No final de 1972, o mesmo instituto (MRI) iniciou um estudo nas embalagens de cervejas e sumos, encomendado pela “*U.S. Environmental Protection Agency*” (USEPA), o qual marcou o início do desenvolvimento da LCA como se conhece hoje. A intenção da USEPA era examinar as implicações ambientais da utilização de embalagens de vidro reutilizáveis em vez de latas e garrafas não reutilizáveis, porque as garrafas reutilizáveis

estavam sendo rapidamente substituídas por embalagens não reutilizáveis. Este estudo envolveu a indústria do vidro, aço, alumínio, papel e plástico e todos os fornecedores daquelas indústrias, tendo-se caracterizado mais de 40 materiais. Após o conhecimento dos resultados deste estudo, concluiu-se que uma garrafa reutilizável seria claramente superior (RODRIGUES, 2004).

Em 1992, a Organização Internacional para a Normalização (ISO) criou um comitê técnico (TC 207/SC 5) tendo em vista a normalização de um número de abordagens de gestão ambiental, incluindo ACV. Como resultado foram publicadas as seguintes normas relacionadas com ACV:

- ISO 14040: 1997 *Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and Framework*
- ISO 14041: 1998 *Environmental management -- Life cycle assessment -- Goal and scope definition and inventory analysis*
- ISO 14042: 2000 *Environmental management -- Life cycle assessment -- Life cycle impact assessment*
- ISO 14043: 2000 *Environmental management -- Life cycle assessment -- Life cycle interpretation*
- ISO/TR 14049: 2000 *Environmental management -- Life cycle assessment -- Examples of application of ISO 14041 to goal and scope definition and inventory analysis*
- ISO/TS 14048: 2002 *Environmental management -- Life cycle assessment -- Data documentation format*
- ISO/TR 14047: 2003 *Environmental management -- Life cycle impact assessment -- Examples of application of ISO 14042*

A Análise do Ciclo de Vida é uma ferramenta muito importante para avaliação ambiental das cadeias de produção. Esta metodologia é amplamente utilizada e reconhecida por um número cada vez maior de cientistas e engenheiros em um número incontável de aplicações em todo mundo. Existem alguns softwares que são utilizados para realizar a LCA, pode-se citar, por exemplo, o Simapro, Gabi, OPENLCA, além da possível integração dos processos de produção com o ASPEN Plus e ASPEN Hysys. Eles apresentam algumas vantagens, dentre elas, pode-se destacar: sua facilidade e praticidade de utilização; rapidez na obtenção dos resultados devido à diminuição do tempo gasto na avaliação; padronização nos bancos de dados utilizados; padronização da forma de apresentação dos resultados e simplificações assumidas além da facilidade na comparação dos resultados obtidos com a literatura.

2.5.1 Princípios da aplicação do LCA

A condução de estudos de LCA envolve as seguintes quatro etapas, que são esquematizadas na Figura 2-14.

- 1) Definição de objetivo e Escopo;
- 2) Análise de Inventário;
- 3) Avaliação de Impacto, e;
- 4) Interpretação.

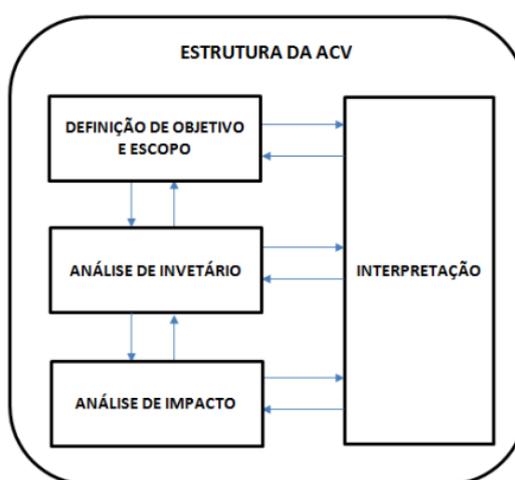


Figura 2-14 - Estrutura metodológica da análise de ciclo de vida

Fonte: adaptado de ISO 14040:1997

Cada uma das fases da LCA representada na Figura 2-14 são descritas a seguir.

2.5.1.1 Definição do Objetivo e Escopo

A definição de objetivo e escopo, segundo a NBR ISO 14041(2004), deve ser determinada na etapa de definições. O objetivo do estudo deve declarar a aplicação pretendida, as razões para sua condução e seu público-alvo. Nesta etapa a importância da meta e o alcance são o de definir e limitar o modelo do sistema de forma que, mesmo havendo algumas simplificações, os resultados não sejam influenciados quando confrontados com a realidade.

O objetivo deve partir da clara definição do sistema de produto ou serviço. Isto envolve a definição da chamada “unidade funcional”, o que pode não ser trivial, mas que está

intimamente ligada ao uso. O escopo refere-se a três dimensões básicas: a extensão, indicando o início e término do estudo; a largura indicando os níveis de análises a serem incluídos e a profundidade que estabelece qual o nível de detalhamento da análise. As três dimensões devem ser realizadas de forma a atender os objetivos estabelecidos. Essas definições de meta e extensão são como um guia, mas não se trata de um documento estático. Pode ser adaptado durante o andamento dos estudos, mas de maneira consciente e cuidadosa. Assim para uma reavaliação do escopo e objetivos deve-se considerar nesta fase do estudo:

- O sistema a ser estudado;
- A definição dos limites do sistema;
- A definição das unidades do sistema;
- O estabelecimento da função e da unidade funcional do sistema; os procedimentos de alocação;
- Os requisitos dos dados; as hipóteses de limitações;
- A avaliação de impacto, quando necessária e a metodologia a ser adotada;
- A interpretação dos dados, quando necessária e a metodologia a ser adotada e,
- O tipo e o formato do relatório importante para o estudo e a definição dos critérios para a revisão crítica, se necessário.

O escopo do estudo deve identificar e definir o objeto de análise e limitá-lo para incluir o que é significativo. Ao definir o escopo de um estudo de ACV, deve ser feita uma declaração clara sobre a especificação das funções do produto, unidade funcional e fluxo de referência e a definição das fronteiras do sistema. Segundo a Norma NBR ISO 14041, define-se como:

- Função do sistema de produto: define a que se presta o sistema que está sendo analisada; qual sua função;
- Unidade funcional: é a unidade de medida da função anteriormente estabelecida. Esta define a quantificação das funções do sistema, provendo uma referência para a qual as quantificações das entradas e saídas do sistema (aspectos ambientais) serão normalizadas;
- Fluxo de referência: é o resultado dessa quantificação da unidade funcional, a quantidade de produto necessária para cumprir a função. O fluxo de referência é utilizado para calcular as entradas e saídas do sistema, as comparações entre sistemas devem ser feitas com base na mesma unidade funcional na forma de seus fluxos de referência.
- Fronteiras do sistema de produto: Define os processos elementares a serem incluídos no sistema a ser modelado, representando a delimitação da sua abrangência, considerando diversas dimensões.

As fronteiras de um sistema segundo Ribeiro (2003) podem ser:

- Fronteiras em relação ao sistema natural: limites que indicam onde se inicia e termina o ciclo de vida em relação ao meio natural;
- Fronteiras em relação a outros sistemas: cada sistema de produto tem associado uma rede de outros sistemas (produção de insumos, obtenção de matérias-primas, coprodutos gerados, etc.). Dentro desta rede deve-se delimitar quais processos serão ou não estudados;
- Fronteiras geográficas: cada localidade possui características próprias, o que podem fazer o resultado ser inadequado quando adaptado (por exemplo, cada país possui uma matriz energética e o uso de um modelo de geração da Alemanha, por exemplo, é inadequado ao Brasil);
- Fronteira temporal: considera o momento para o qual os dados levantados terão validade, ou seja, se será estudada uma situação atual, passada ou ainda cenários de futuro, e;
- Fronteiras de bens de capital: determina se serão incluídas ou não no estudo as infraestruturas necessárias para a realização dos processos (edifícios das fábricas, estradas, etc.).

As fronteiras de um sistema podem ser modificadas de acordo com as conclusões do inventário. A norma ABNT (2004) recomenda que os procedimentos de alocação se aproximem tanto quanto possível das relações e características fundamentais de entrada e saída na qual o inventário é baseado, segundo critérios de massa, valor comercial ou conteúdo energético

2.5.1.2 Inventário de Ciclo de Vida (ICV)

Nesta etapa é elaborado um modelo de ciclo de vida para o produto em questão considerando todos os fluxos ambientais de entrada e saída. A Análise do Inventário (NBR ISO 14041) refere-se à coleta de dados e ao estabelecimento dos procedimentos de cálculo para que se possa facilitar o agrupamento destes dados em categorias ambientais normalmente utilizáveis e comparáveis, de modo semelhante a um balanço contábil.

Em uma Análise de Inventário, o escopo e os objetivos de um estudo fornecerão o plano inicial para sua realização do estudo, estabelecendo o conjunto inicial de processos elementares e categorias de dados associados. Esta fase da Análise do Ciclo de Vida pode tornar-se uma das mais difíceis e trabalhosas, em função da não disponibilidade de dados, da qualidade dos dados disponíveis ou da necessidade de estimá-los. As componentes chaves para

uma Análise de Inventário do Ciclo de Vida segundo a norma (ABNT NBR ISO 14041:2004) são:

- Sistema de produto: conjunto de unidades de processo, conectadas por material ou energia, cada uma realizando uma ou mais funções definidas. É, portanto o detalhamento do modelo a ser estudado na ACV. A descrição de sistema de produto inclui os processos elementares, fluxos elementares, fluxos de produto através das fronteiras do sistema e fluxos de produtos intermediários dentro do sistema.

- Processo elementar: divisão do sistema de produtos, sendo interligados uns aos outros, mediante fluxos de processos intermediários e/ou resíduos de tratamento, a outros sistemas de produto por fluxos de produto e ao meio ambiente por fluxos elementares.

- Categoria de dados: os dados coletados, medidos e estimados são utilizados para quantificar as entradas e saídas de um processo elementar.

A norma (ABNT NBR ISO 14041:2004) recomenda três grandes conjuntos de categorias de dados: energia, matérias-primas, matérias auxiliares e outras entradas físicas; produtos, emissões (ar, água, terra, etc.).

A construção do ICV é um processo iterativo, ao longo do qual progressivamente irá se obtendo maior conhecimento sobre o objeto de análise. Desta forma, a norma (ISO, 1998) recomenda que as fronteiras do sistema sejam revistas para identificar necessidades de novos refinamentos e dados adicionais. Devem ser realizadas análises de sensibilidade quando necessário, de modo a avaliar a pertinência de:

- (i) excluir estágios do ciclo de vida ou processos que não sejam significantes;
- (ii) excluir aspectos ambientais sem representatividade no resultado final, e
- (iii) incluir novos processos ou aspectos que sejam julgados relevantes.

Podem omitir-se componentes do sistema que contribuam com menos de 1% para a massa do produto total, especialmente se ele é inferior à certeza estatística do fator menos preciso. Uma exceção a esta regra é o caso de substâncias altamente tóxicas ou persistentes ou 10 recursos escassos. Nestes casos, mesmo assim, 1% da massa pode ainda ser significativo, devendo ser incluídas (RODRIGUES, 2004).

2.5.1.3 Avaliação de Impacto (AI)

Esta etapa visa compreender a relevância ambiental de todos os fluxos de entrada e saída. A Avaliação do Impacto (NBR ISO 14042) refere-se à identificação e avaliação dos

impactos potenciais ao meio ambiente que podem ser associados aos dados levantados no inventário. Como neste caso, há a necessidade de uma definição de meta e a extensão da mesma, servindo com guia de seleção de método e categoria de impacto. Esta fase da LCA é apontada para a compreensão e avaliação da magnitude e significado dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produtos. A seguir são mostrados os principais fatores de impacto que devem ser avaliados, segundo Peñarrubia-Fernandez, Liu e Zhao (2017).

- a) Aquecimento Global: Os potenciais de aquecimento global, GWP (*Global Warming Potential*) desenvolvidos pelo IPCC (*International Panel on Climate Change*), geralmente são utilizados. O GWP de uma substância é a relação entre a contribuição para a absorção de calor da radiação resultante da descarga instantânea de 1 kg de gás de efeito estufa e uma quantidade igual de emissão de dióxido de carbono, integrada ao longo do tempo.
- b) Formação de Ozônio Fotoquímico: a formação de ozônio fotoquímico é um tipo de impacto causado por certas substâncias que são capazes de reagir com o radical hidroxilo OH para formar radicais peróxidrilas, que na presença de NO_x e radiação ultravioleta UV podem induzir a formação de ozônio molecular e outros compostos reativos na troposfera. As substâncias que contribuem para este impacto são o monóxido de carbono (CO) e todos os compostos orgânicos voláteis (COV).
- c) Acidificação: a precipitação das emissões de compostos ácidos causa um grande impacto no solo, águas superficiais, organismos biológicos, ecossistemas e materiais. As substâncias que mais contribuem para a acidificação são SO_x, NO_x, e NH₃. A acidificação é uma das categorias de impacto na qual a sensibilidade local (condições locais ambientais) joga um papel importante e a possibilidade de incluir diferenças regionais no modelo LCA tem sido um ponto chave nos últimos anos.
- d) Eutrofização: eutrofização é o enriquecimento da água ou do solo em nutrientes como nitrogênio (N) e fósforo (P), que podem causar mudança na população de espécies nos ecossistemas e uma redução na diversidade ecológica. O enriquecimento das águas superficiais em N e P causa o rápido crescimento das algas, o que pode levar a um déficit de oxigênio, com os consequentes efeitos na flora e fauna. As substâncias que contribuem a este impacto são: NH₃, NO_x, NO³⁻ e PO₄⁻³ entre outras.
- e) Toxicidade Humana: esta categoria compreende o impacto na saúde humana das substâncias tóxicas presentes no ambiente. Vários métodos de caracterização da toxicidade ao ser humano têm sido desenvolvidos e dispõe de fatores de caracterização

que são geralmente referidos como potenciais de toxicidade humana, HTPs, (*Human Toxicity Potential*).

3 ESTADO DA ARTE

No presente capítulo são reunidos os resultados mais relevantes encontrados na literatura referente ao contexto mundial da utilização de biocombustíveis. São mostrados principais resultados da aplicação de biocombustíveis em motores de combustão interna, a utilização de biocombustíveis em modo *Dual-Fuel* com outros tipos de combustíveis – tanto gasosos quanto líquidos – e apresentados resultados referentes à avaliação do ciclo de vida de biocombustíveis, como o farnesano e HVO.

3.1 Biocombustíveis em MCI por compressão

Atualmente, devido à novas regras de emissões de poluentes impostas ao redor de todo o mundo, visando principalmente a redução do efeito estufa e aquecimento global, a busca por novas tecnologias relacionadas às alternativas renováveis aumenta gradativamente todos os anos. No âmbito dos motores a combustão interna, encontrou-se como uma saída, a utilização de combustíveis renováveis, que promovem baixo impacto ambiental durante seu ciclo de vida. Tais combustíveis, são uma alternativa viável do ponto de vista financeiro e energético e se tornaram uma medida eficiente para a redução da emissão de poluentes (SOTO et al., 2019).

Dentre os novos combustíveis verdes disponíveis no mercado, destacam-se o farnesano, que é um biocombustível parafínico produzido a partir da cana-de-açúcar e o HVO (do inglês - *Hydrotreated Vegetable oil*), produzido pela hidrogenação de óleos vegetais. (SONTHALIA; KUMAR, 2019; GÓMEZ et al., 2020)

Associado ao desenvolvimento de novos combustíveis, o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes de aproveitamento dos combustíveis verdes surgem, como é o caso da tecnologia *Dual-Fuel*, que segundo Boretti (2019), é um promissor e potencial redutor da emissão de poluição em motores à combustão interna por ignição. A aplicação de diferentes combinações de combustíveis no modo *Dual-Fuel* apresenta grande potencial de redução principalmente de CO₂ e NO_x (Rimkus et al., 2019).

Soriano *et al.* (2017) realizaram um estudo com o objetivo de verificar a formação de fuligem e a sua reatividade à oxidação em um motor de ignição por compressão comercial utilizando diesel com baixo teor de enxofre, biodiesel e Farnesano. De acordo com os resultados encontrados, os autores concluíram que, sob as condições de carga e rotação analisadas

experimentalmente no trabalho, o Farnesano é o combustível parafínico mais promissor para os motores de ignição por compressão atuais.

Soto et al. (2019) compararam a aplicação do farnesano e diesel convencional em um motor de ignição por compressão, mantendo-se a mesma performance no motor para ambos os combustíveis. Assim, os resultados apontaram que a ausência de compostos aromáticos no farnesano acarreta na redução de emissão de hidrocarbonetos. A emissão de NO_x do farnesano de cana-de-açúcar foi reduzida se comparada ao diesel convencional, pelo uso do sistema de recirculação de gases do escape (EGR) que reduz a admissão de oxigênio para a câmara de combustão.

O desenvolvimento de novas tecnologias de combustão em motores de ignição por compressão, como a metodologia RCCI (do Inglês, Ignição por compressão controlada por reatividade), vem acompanhado da aplicação de misturas de combustíveis, como diesel-gasolina, bem como a aplicação de novos combustíveis renováveis, como o farnesano. Gómez et al. (2020), compararam a emissão de fuligem da mistura Diesel-Gasolina com uma mistura de gasolina com os combustíveis biodiesel, gas-to-liquids (GTL) e farnesano. Para a análise da produção de fuligem foi utilizado o método OESI (*Oxygen Extended Sooting Index*). Foi obtido então que, para as mesmas proporções de gasolina nas misturas, a tendência de formação de fuligem da mistura GTL e farnesano são iguais, enquanto a mistura Diesel-Gasolina apresenta o maior valor. O aumento da proporção de gasolina na mistura com farnesano, ocasiona no aumento da emissão de fuligem, devido ao aumento do oxigênio intramolecular e queda do número de carbono, além disso, a gasolina introduz compostos aromáticos e insaturações à mistura.

Além do estudo das emissões de particulados, é necessária a predição também das dimensões das partículas emitidas, principalmente devido à grande aplicação de filtros de partículas nos sistemas de controle de emissões de motores de compressão por ignição. Martos et al. (2020) realizaram um estudo da distribuição de tamanhos dos particulados emitidos, apresentando um modelo fenomenológico para a predição desta característica. O estudo foi realizado considerando o motor em regimes de operação urbana, com rotações variando entre 1000 e 2400 rpm, com cargas diferentes aplicadas, operando os combustíveis diesel, GTL, biodiesel e farnesano. Os resultados mostraram então dados da concentração de particulados em função do diâmetro médio da partícula, sendo obtido para o regime de operação de 1700 rpm e carga de 60 Nm, as seguintes distribuições máximas de particulados: Diesel 3,75mi/cm³ com diâmetro de 75 nm enquanto para o farnesano, foi obtido 3,25mi/cm³ com diâmetro de 75

nm; o combustível que apresentou menor emissão de particulados foi o biodiesel, com $1,75\text{mi}/\text{cm}^3$ com diâmetro de 90 nm.

A aplicação de óleos vegetais hidrotratados (HVO) produzidos a partir da biomassa à base de triglicerídeos, como óleo vegetal, gordura animal, óleo de cozinha residual e algas, em motores de ignição por compressão, foi revisada por No (2014). Segundo o autor, o principal problema na aplicação pura de HVO a motores de combustão interna são as propriedades relativas à baixa temperatura de ignição deste combustível. Entretanto, a partir das técnicas isomerização, adição de melhorador de fluxo, controle de temperatura de reação e coprocessamento com matérias-primas derivadas de petróleo são capazes de elevar a eficiência energética deste combustível. As vantagens da aplicação do HVO se comparado ao biodiesel convencional, são o menor custo de processamento, redução da emissão de NOx e flexibilidade da matéria-prima. O uso de HVO permite reduções apreciáveis nas emissões de NOx, material particulado, hidrocarbonetos e CO.

Com o objetivo de analisar a emissão de NOx do HVO, Bohl *et al.* (2018) investigaram as características de spray e combustão do HVO e as compararam com diesel convencional. As características macroscópicas do spray foram investigadas e quantificadas usando um recipiente de pulverização de volume constante. O desempenho do motor e as emissões de escape também foram caracterizados usando um Motor diesel em sua configuração original, e, em seguida, em uma configuração recalibrada otimizado para combustível HVO. Os resultados mostram que o controle da injeção do motor e também a qualidade do combustível podem influenciar na formação de NOx e material particulado significativamente. O controle do tempo de injeção provou ser altamente influente sobre as emissões de NOx. Ao otimizar a injeção de combustível, uma redução nas emissões de NOx de até 18% ou reduções de particulados de até 42-66% foram alcançadas com economia simultânea no consumo de combustível de 4,3%.

Emissões gasosas comuns, número de fumaça, opacidade, material particulado (MP) e número de partículas (NP) foram medidos por Bortel, Vávra e Takáts, (2019) em uma comparação de óleo diesel padrão, óleo vegetal hidrotratado puro (HVO) e uma mistura composta por 30% de HVO e 70% de óleo diesel padrão (HVO30). Os experimentos foram feitos em um motor de ignição por compressão de cilindro único com sistema de injeção *common rail*, baseados em um Ciclo Estacionário Harmonizado Mundial (do inglês, *World Harmonized Stationary Cycle - WHSC*). Foi observado então que a adição de HVO ao diesel padrão ocasiona aumento de potência da ordem de 4,53%, redução de 3,56% na emissão de CO₂, redução da ordem de 60% para a emissão tanto de CO quanto de hidrocarbonetos e redução de 4,2% na emissão de NOx.

Foram realizados também testes de emissão de poluentes por Suarez-Bertoa *et al.* (2019), entretanto, utilizando-se misturas de HVO e diesel B7, com as proporções em volume de HVO de 7 (HVO-7), 30 (HVO-30) e 100% (HVO-100). Além disso, a emissão de poluentes foi avaliada em duas temperaturas diferentes, 23°C e -7°C, utilizando o WHSC. Os autores concluíram que a utilização de HVO-100 no motor ocasiona redução de cerca de 4% na emissão de CO₂, se comparado às emissões para o diesel B7. A redução da temperatura ambiente causou o aumento da emissão de CO₂, CO, e particulados e reduziu a emissão de NH₃ para todas as misturas estudadas.

Tratando-se da aplicação do HVO, Dimitriadis *et al.* (2020) estudaram a aplicação em modo single-fuel deste biocombustível. Em um motor turboalimentado e com intercooler, utilizando condições de operação semelhantes às encontradas no dia-a-dia de um motor operando em um veículo de passeio, com rotação de 1500 e 3000 rpm, com carga de 35 e 100 Nm, foram analisados parâmetros energéticos e de emissões. Os autores concluíram que até 40% de redução de partículas pode ser atingida, redução da emissão de hidrocarbonetos de 45%, além da redução de consumo de massa de combustível de 3%. Entretanto, a emissão de NO_x acaba sendo similar à do diesel convencional. Entretanto, a redução da emissão de NO_x pode ser atingida pelo ajuste operacional do motor. Atrasando-se em 2° o momento da injeção pode ocasionar na redução de cerca de 20% de NO_x.

3.2 Tecnologia Dual-Fuel no Mundo e no Brasil

Segundo Karim (2015), a tecnologia Dual-Fuel consiste na utilização de dois combustíveis diferentes que são injetados de forma distinta na câmara de combustão. Este processo é diferente do utilizado na tecnologia *Flex*, por exemplo, onde dois combustíveis – etanol e gasolina – são misturados no próprio tanque do veículo e injetados juntos na câmara de combustão. Como exemplo, uma operação Dual-Fuel de Diesel convencional e etanol, injeta-se o Diesel na câmara de combustão por meio de um injetor de alta pressão e o etanol é admitido por um injetor próprio, diferente do utilizado para o Diesel. A injeção do combustível secundário pode ser feita, por exemplo, no coletor de admissão do motor.

Britto e Martins (2015) realizaram uma análise experimental da operação de diesel convencional em modo dual-fuel com etanol, utilizando um motor monocilíndrico com injeção direta para o diesel e injeção indireta de etanol. O controle de injeção foi realizado via sistema de injeção eletrônica. Os estudos foram feitos variando a fração de diesel e etanol e o

experimento realizado quando a calibração do sistema de injeção resultou no menor consumo específico de combustível o máximo torque de carga no motor, para cada condição de carga. O autor concluiu que a perda máxima de pressão efetiva indicada no modo dual-fuel foi de 4%, a maior eficiência foi atingida utilizando uma menor vazão de combustível e a maior taxa de substituição de diesel por etanol foi de 51%.

Com o objetivo de analisar a emissão de poluentes e também avaliar o consumo de diesel, Liu, Sun e Zhang (2017) avaliaram a aplicação de etanol líquido, formado por uma mistura de etanol anidro com água, em modo Dual-Fuel com diesel convencional. O estudo foi realizado em um motor tipo *heavy-duty*, de quatro cilindros, equipado com turbocompressor e *intercooler*. O experimento foi realizado com proporções 30, 40 e 50% em volume de etanol. Foi obtido então que a operação em Dual-Fuel proporciona redução de emissão de NOx de até 37,1%. A emissão de HC e CO sofreu aumento com a injeção de etanol, mas, segundo os autores, a adição de um sistema de catalizador pode reduzir em até 99% a emissão destes poluentes. Também se observou aumento da emissão de poluentes não regulamentados, como o formaldeído, que também com a adição de um sistema catalizador pode ser reduzido para níveis menores que a aplicação de diesel puro.

O combate à emissão de poluentes na atmosfera vem sendo uma luta global. Devido ao menor teor de carbono, o etanol vem sendo comumente utilizado em aplicações Dual-Fuel em MCI de ignição por compressão e têm apresentado grande potencial redutor de emissões. Assim, Gürbüz e Sandalci (2019) estudaram os efeitos da operação diesel e etanol vaporizado, em dual-fuel, no desempenho do motor e nas características de combustão e emissões de poluição. Foram investigadas experimentalmente 11 rotações em um motor tri-cilíndrico sobrealimentado. O etanol foi injetado no coletor de admissão do motor e o injetor controlado por uma ECU baseada em *arduino*. Detectou-se que a pressão no cilindro aumentou no início do processo de combustão e diminuiu durante a última fase de combustão. Com uso de cerca de 10% de etanol, a potência, torque e emissões foram melhoradas a baixa rotação. Entretanto, com o aumento da rotação, a emissão de NOx e fumaça teve pequeno aumento.

A aplicação Dual-Fuel de combustíveis gasosos juntamente com diesel ou biodiesel é uma aplicação que se mostra promissora. Segundo Hernández, Salvador e Cova-Bonillo (2019), a aplicação do hidrogênio como combustível gasoso possui potencial de redução de emissão de fumaça e CO₂, devido ausência de carbono em sua composição. Então, os autores avaliaram o fenômeno de autoignição do diesel e biodiesel em um ambiente rico em H₂. Foram avaliadas substituições de diesel ou biodiesel por hidrogênio com proporções de 10% e 20% em energia, em uma câmara de combustão com volume constante, em temperaturas de 535 °C, 602 °C e 650

°C. Os resultados mostraram que parte do hidrogênio não entra em combustão, devido à baixa pressão na câmara de combustão. Nas condições testadas, a adição de hidrogênio retarda a autoignição e este efeito é mais significativo ao diesel. A velocidade da combustão é reduzida com a substituição do diesel por hidrogênio devido ao aumento da diluição do diesel ao ar.

Convencionalmente, a operação em modo Dual-Fuel se dá com o diesel como combustível piloto. Entretanto, Vavra, Bortel e Takats (2019) avaliaram a aplicação do hidrogênio como combustível principal e diesel como combustível secundário. Os experimentos foram realizados em regime permanente em um motor de ignição por compressão de pesquisa de cilindro único equipado com sistema *common rail* de injeção direta de diesel acoplado a um dinamômetro elétrico. A influência da participação do hidrogênio na energia total do combustível foi investigada entre os limites dados pela operação a diesel puro e até uma participação máxima do hidrogênio, chegando a 98% pela energia. Foi observado que o aumento na participação do hidrogênio reduz as emissões de CO₂ e CO proporcionalmente com a diminuição do conteúdo de carbono no combustível. Simultaneamente, as emissões de MP nos gases de escape brutos caíram continuamente com o aumento da proporção de hidrogênio. As emissões de NO_x para a maior parcela de hidrogênio caíram ligeiramente em relação ao diesel puro. A eficiência do motor foi ligeiramente reduzida, quando operado com uma parcela mais elevada de hidrogênio em comparação com a operação a diesel puro.

O biogás também é uma alternativa a ser utilizada em modo Dual-Fuel em MCI de ignição por compressão. Assim, Barik, Satapathy e Murugan (2017) analisaram os efeitos da aplicação de biogás produzido da *Milletia pinnata*, em um motor monocilíndrico e injeção direta de diesel, variando a vazão de biogás de 0,3 kg/s até 1,2 kg/h, com incrementos de 0,3 kg/h. Então, concluiu-se que a vazão de 0,9 kg/h de biogás apresentou os melhores resultados de combustão, como a pressão média efetiva no cilindro, que teve aumento de 11 bar se comparada ao diesel convencional. O atraso de ignição e a duração da combustão no motor, com vazão de biogás de 0,9 kg/h foram considerados mais longos em cerca de 2° e 2,9° de ângulo do virabrequim, respectivamente, em comparação com diesel puro.

Owczuk *et al.* (2019) avaliaram o uso do biogás, operando em modo Dual-Fuel com diesel convencional, como combustível para motores de tratores. Esse biogás pode ser obtido em plantas de biogás a partir de diferentes substratos, por exemplo, vegetais ou resíduos agrícolas, bem como resíduos municipais biodegradáveis. O conteúdo médio de metano no biogás obtido a partir dos resíduos vegetais, que foi utilizado nos testes atingiu a marca de 60%. Os testes realizados no dinamômetro do motor mostraram que o motor utilizando o método Dual-Fuel funcionou de forma estável quando o diesel foi substituído por até 40% de biogás

(contendo 50% de CO₂). A injeção de biogás causou um aumento na concentração de hidrocarbonetos e monóxido de carbono nos gases de exaustão e uma diminuição ou nenhum efeito na concentração de material particulado e óxidos de nitrogênio. Não foi observado variação da potência ou torque do motor.

Rimkus, Stravinskas E Matijošius (2020) realizaram um estudo energético e ecológico comparando a operação de um motor de CI de ignição por compressão, aplicando-se em modo Dual-Fuel as misturas Diesel-Gás natural e HVO-Biogás, além da aplicação do diesel convencional. O objetivo principal foi descobrir o impacto de diferentes combinações Dual-Fuel no desempenho energético e nas emissões em função do início da injeção (SOI) do diesel e na posição do virabrequim (CAD). Os resultados mostraram que, para a aplicação HVO-Biogás, o BTE do motor diminuiu 16,5%. O uso de metano na mistura Dual-Fuel reduziu a fração volumétrica de CO₂ nos gases de exaustão em 20%, enquanto o biometano aumentou a fração volumétrica de CO₂ em 14%. A aplicação Dual-Fuel reduziu significativamente a fração volumétrica de NO_x em 82% e a fumaça em 39%.

Boretti (2012) realizou um estudo das vantagens da conversão de um motor diesel em um motor com tecnologia dual-fuel utilizando diesel e etanol. O estudo foi feito numericamente, com o auxílio do software WAVE, utilizando um único injetor para o diesel e etanol e também com a adição de um segundo injetor somente para o etanol. Assim, a eficiência máxima atingida pelo motor foi de 40%, utilizando somente um injetor para ambos combustíveis. Além disso, uma das maiores vantagens do modo Dual-Fuel é a redução da emissão de CO₂, fumaça e particulados.

Os prós e os contras dos motores de combustão interna (MCI) de combustão pobre, ignição por compressão (IC) e injeção direta (ID), operando no setor de transporte foram revisitados por Boretti (2019). O estudo foi realizado considerando as aplicações Dual-Fuel de diesel convencional associado com combustíveis gasosos. Os MCIs ICID têm maior eficiência de conversão de combustível do que os MCIs estequiométricos de ignição por centelha. No entanto, os MCIs ICID movidos a diesel têm maiores emissões de material particulado (MP) e NO_x. A adoção da tecnologia Dual-Fuel proporciona redução das emissões de MP, NO_x, CO, CO₂ e hidrocarbonetos, se comparado aos motores diesel convencionais. Os MCIs ICID movidos a diesel convencional podem ser melhorados para oferecer melhor economia de combustível e emissões reduzidas. Segundo o autor, a conversão dos motores para a tecnologia Dual-Fuel também abre espaço para melhorias de desempenho e consumo, variando-se o controle da injeção do combustível secundário.

3.3 Avaliação de Ciclo de Vida (LCA)

Sunde, Brekke e Solberg (2011) compararam o ciclo de vida de três tipos de combustíveis verdes: biodiesel, HVO e BTL (do inglês, biomassa para líquido) produzido a partir de madeira. A análise classificou o desempenho ambiental e custos de matéria prima e produção do combustível. Os resultados indicaram que o HVO produzido a partir de resíduos de óleo de cozinha é mais vantajoso que o biodiesel e o BTL tanto em custos de produção quanto em relação aos impactos ambientais. Entretanto, a disponibilidade de matéria prima para a produção de HVO a partir de resíduos de óleo de cozinha é limitada e outras matérias primas devem ser utilizadas no auxílio deste combustível verde. Os autores ainda afirmam que a produção de biocombustíveis a partir de matéria prima vegetal é de extrema importância no setor, todavia, o consumo de energia para a conversão da matéria prima no produto final, demanda alta energia.

Arvidsson *et al.* (2011) realizaram a análise do ciclo de vida do HVO, operando em um MCI para geração de energia, a partir do óleo vegetal de canola, dendê e jatrofa. Foram consideradas como categorias de impacto ambiental: potencial de aquecimento global, potencial de acidificação, potencial de eutrofização. Os resultados mostram que HVO produzido a partir de óleo de palma combinado com o uso do biogás produzido a partir do óleo de palma tem o menor impacto ambiental entre as biomassas estudadas. A análise LCA mostrou que o HVO possui um potencial de aquecimento global menor que o diesel convencional, para qualquer uma das matérias primas utilizadas. Ainda, a poluição do solo, que é um dos maiores impactos causados pelo HVO, ocorre principalmente por ação microbiana ou vazamentos de material. A principal contribuição para o potencial de aquecimento global se deve à emissão de óxido nitroso do solo. As emissões de óxidos de nitrogênio e amônia no solo são responsáveis por quase todo potencial de eutrofização do ciclo de vida do HVO e também contribuem significativamente para o potencial de acidificação.

Moreira, Gurgel e Seabra (2014) avaliaram as emissões de gases do efeito estufa do ciclo de vida do farnesano para aplicação na aviação. A análise incluiu emissões direta e indiretamente associadas à produção de cana-de-açúcar e processamento de combustível, distribuição e uso. O modelo CA-GREET foi usado como a ferramenta analítica básica, enquanto as emissões resultantes da modificação da terra de cultivo empregando o GTAP-BIO-ADV e modelos AEZ-EF. A produção de matéria-prima e os impactos de LUC foram avaliadas como principais fontes de emissões, respectivamente estimadas como 14,6 e 12 g CO₂ eq/ MJ

de biocombustível. No entanto, o combustível renovável para aviação se beneficiaria fortemente da cogeração com bagaço e lixo, o que permitiria uma emissão líquida do ciclo de vida de 8,5 g CO₂ eq/MJ de biocombustível. A análise de sensibilidade mostrou que o rendimento da área de cultivo e a escolha do uso da terra são parâmetros relevantes para o desempenho do ciclo de vida do biocombustível.

Garraín, Lechón e Santamaría (2016) avaliaram, do ponto de vista econômico, as consequências ambientais de um biocombustível HVO, obtido pelo óleo de palma no cenário espanhol. Os resultados foram comparados com duas contrapartes: um diesel fóssil com baixo teor de enxofre (<10 ppm) e outro biocombustível de óleo de palma obtido por transesterificação utilizando o método FAME (do Inglês *fatty acids methyl esters* - Ésteres Metílicos de Ácidos Gordos). A avaliação concluiu que o FAME e HVO teriam um pior desempenho ambiental quando comparado ao diesel devido ao aumento das emissões de óxidos de nitrogênio, pequenas partículas e amônia. Segundo os autores, essas emissões não podem ser compensadas por reduções de emissões de outros poluentes, como dióxidos de enxofre e gases de efeito estufa.

Michailos (2018) realizou o projeto técnico-econômico e a análise do ciclo de vida (LCA) da produção farnesano para aplicação aeronáutica a partir do bagaço de cana, diferente da metodologia tradicional de produção que é baseado no caldo da cana-de-açúcar. Os balanços de massa e energia foram executados no software SuperPro Designer. O rendimento de massa resultante foi igual a 0,121 kg (combustível) / kg (bagaço seco) e uma eficiência energética de 26,5% foi obtida. As reduções de emissões de gases de efeito estufa, em comparação com o combustível fóssil para aviação, pode ser de aproximadamente 47%.

Soam e Hillman (2019) analisaram os fatores que influenciam a sustentabilidade ambiental e o crescimento do HVO na Suécia. As principais matérias-primas identificadas na cadeia de abastecimento de HVO foram o óleo de palma, óleo de canola e destilados de ácidos graxos de palma (PFAD). Os estudos de ACV revelaram que a matéria-prima cultivada (palma, canola e PFAD) tem emissões de GEE ao longo do ciclo de vida maiores do que matérias-primas residuais, como a gordura animal. No entanto, devido ao fornecimento limitado de matéria-prima residual, é necessário ficar mais dependente dos recursos sustentáveis. A complexidade da matéria-prima, origem, tecnologias de processamento, abordagem de alocação, mudanças no uso da terra (LUC) e seleção de categorias ambientais podem resultar em variações dos resultados da LCA.

Demichelis et al. (2020) realizaram um estudo técnico, econômico e ambiental para avaliação da produção de bioetanol a partir de resíduos de biomassa, categorizados em lignocelulose (palha de arroz, esterco de gado e fração orgânica de resíduos sólidos urbanos),

amido (batatas) e à bases de açúcar (cana de açúcar). O estudo técnico compilou um inventário dos resíduos de biomassa e projetou sua conversão biológica em etanol por meio de uma análise de fluxo de material (MFA). A avaliação econômica teve o objetivo de definir o tamanho da planta da biorrefinaria necessária para atingir a lucratividade e a avaliação ambiental, baseada na Análise de Ciclo de Vida (LCA) e no balanço de energia dos processos. A análise técnica demonstrou rendimentos (kg de etanol/kg biomassa) de 0,16 para a cana de açúcar, 0,17 para batatas, 0,22 para a palha de arroz, 0,19 para o esterco de gado e 0,14 para os resíduos sólidos urbanos. Do ponto de vista ambiental, o esterco bovino atingiu a maior redução dos impactos das mudanças climáticas e da acidificação em comparação com outras biomassas, enquanto a cana-de-açúcar obteve o menor consumo de energia (cerca de 64%)

4 ANÁLISE EXPERIMENTAL E METODOLOGIA

No presente capítulo apresentam-se detalhes sobre a bancada experimental utilizada no estudo, bem como detalhes dos combustíveis, instrumentos de medição e condições de operação do motor utilizado. Além disso, é apresentada a metodologia utilizada para a obtenção dos resultados de emissões de gases poluentes do motor.

4.1 Motor de Combustão Interna e Instalações

Os testes foram realizados no Laboratório de Máquinas Térmicas da Universidade Federal de Itajubá - Brasil (LMT-UNIFEI). Um motor monocilíndrico aspirado naturalmente foi usado para os experimentos, alimentado por combustíveis piloto (diesel comercial ou HVO como combustível de alta reatividade) que foram injetados diretamente na câmara de combustão a pressão constante (19,6 MPa) e avanço de injeção fixo, de 22 ° BTDC, através de um injetor de 4 furos com um sistema de bomba de combustível mecânica. Na Tabela 4-1 apresentam-se os principais parâmetros de especificação do motor utilizado neste estudo.

Tabela 4-1 - Especificações do Motor Monocilíndrico utilizado nos testes de emissão de poluentes

Modelo	Buffalo / BFDE 10.0
Tipo	4 tempos, ignição por compressão
Número de cilindros	1
Volume Deslocado	418 cm ³
Diâmetro do cilindro	86 mm
Curso do pistão	72 mm
Comprimento da biela	118 mm
Raio do virabrequim	38 mm
Razão de compressão	19.0:1
Número de Válvulas	1 admissão, 1 exaustão
Diâmetro das válvulas (admissão/compressão)	36 mm / 29 mm
Tipo de admissão de ar	Aspirado Naturalmente
Refrigeração	Ar
Injeção de Combustível	Injeção Direta, bomba mecânica
Número de furos do injetor	4
Avanço de Ignição	22°±1° BTDC
Pressão de Injeção	19.6 MPa
Lubrificante	SAE 15W-40

O motor foi acoplado a um dinamômetro hidráulico para controlar a carga. Para monitorar todas as variáveis em tempo real, diversos sistemas de aquisição de dados foram distribuídos na bancada de testes, incluindo sensores de pressão, temperatura e emissões. Nas figuras 4-1 e 4-2 mostram-se a configuração final da bancada de testes.

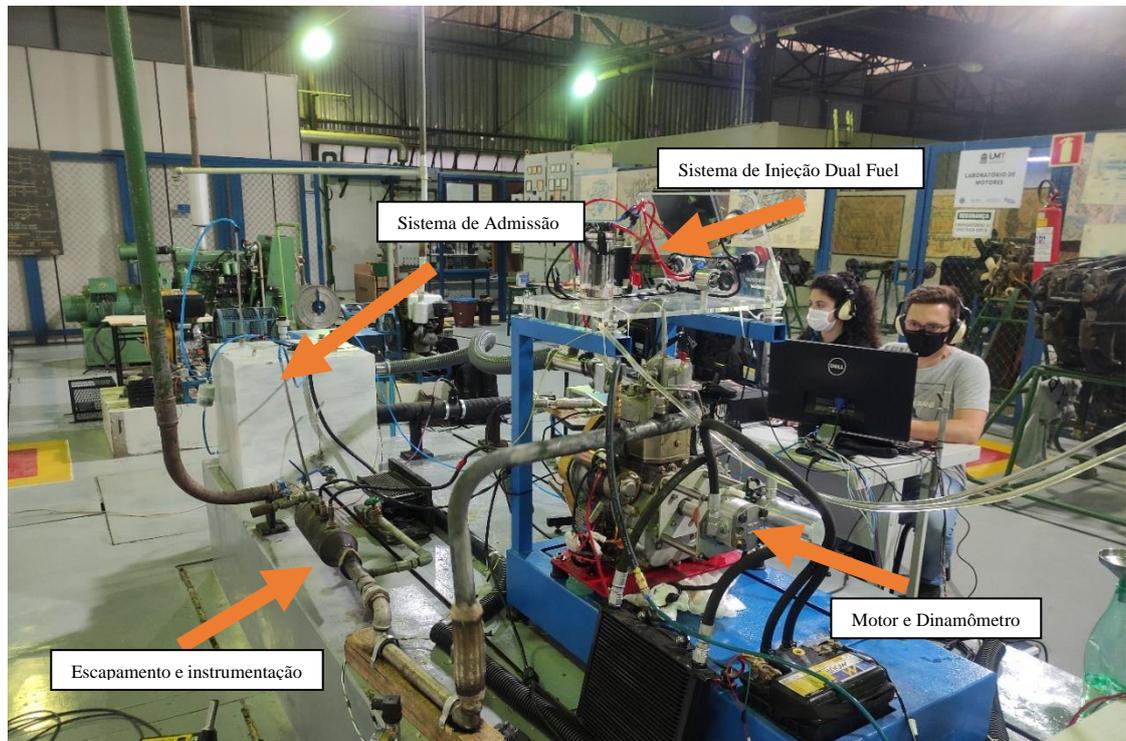


Figura 4-1 - Bancada de Ensaios para motor de combustão interna equipada com dinamômetro e instrumentos de medição.

O ângulo do virabrequim e a medição da pressão no cilindro para análise de combustão foram correlacionados usando um transdutor piezoelétrico, um codificador óptico e um equipamento de aquisição de dados para uma média de 200 ciclos e resolução de intervalos de $0,1^\circ$ de ângulo do virabrequim. Um sensor Bosch 4.2 Lambda foi usado para medir a relação ar-combustível no escapamento, enquanto o consumo de combustível era medido por meio de um sensor volumétrico Classe A Alpax. Um analisador de gases registrou emissões de NO_x (queluminescência) e HC, CO e CO₂ (princípio infravermelho não dispersivo). Os valores medidos de HC (por não serem medidos pela técnica de detecção de ionização de chama) sofreram correções seguindo recomendações propostas por Heywood (2018) e metodologias conforme Costa *et al.* (2021). A fumaça na saída do motor foi medida por meio de um opacímetro Smoke Check Altanova e o número de fumaça do filtro (FSN) foi calculado para corrigir os valores de material particulado (MP) obtidos do analisador, seguindo a metodologia

proposta por Lakshminarayanan (2016) e AVL (2013). O sistema de admissão de ar era composto por um filtro de ar, uma válvula de restrição, um fluxômetro e um reservatório de ar equipado com sensores de temperatura, pressão e umidade. Para manter as mesmas condições operacionais durante todos os testes, uma válvula de controle de contrapressão do escapamento foi utilizada para ajustar a pressão em 100 ± 3 mbar (simulando contrapressão real do escapamento ou/com sistemas de pós-tratamento). Os detalhes dos sensores usados nos experimentos são apresentados na Tabela 4-2.

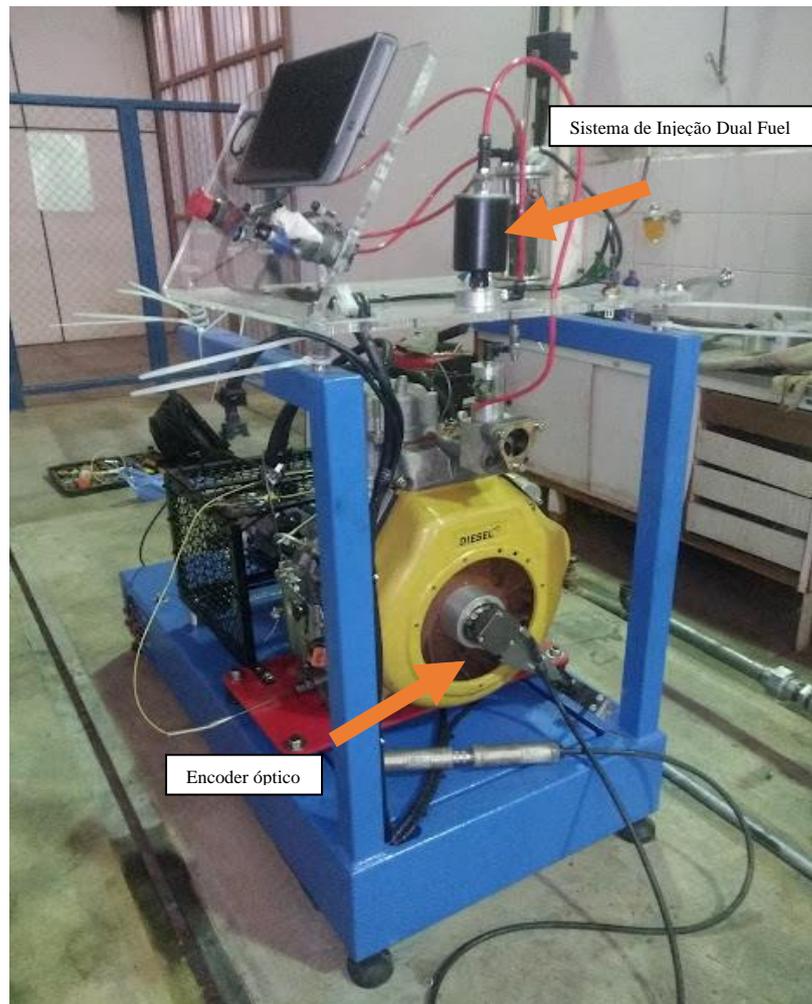


Figura 4-2 - Detalhe do motor com *encoder* óptico e sistema de injeção Dual-Fuel

Tabela 4-2 - Detalhes dos instrumentos de medição.

Variável	Fabricante	Tipo de Sensor	Modelo	Faixa de Medição	Incerteza
Torque	Intechno	Dinamômetro Hidráulico	MD-04	0 – 30 Nm	±0,01
Pressão do Cilindro	AVL	Piezoelectrico	GH14DK	0 – 300 bar	±0,3% (full scale)
Ângulo do Virabrequim	AVL	Encoder Óptico	AVL 365	-	< ±0,03°
Rotação do motor	AVL	Encoder Óptico	AVL 365	50-20,000	±3rpm
Lambda (λ)	Fueltech	Sensor de banda larga	Bosch 4.2	0.65-8.0	±0,009
Consumo de Combustível	Alpax	Volumétrico	Class A	0-25 ml	±0,1%
Vazão de Ar	Bosch	Térmico	HFM 5	8-480 kg/h	<±1,0%
NO_x	NAPRO	Analizador de Gases	PC Multigas	0-5,000 ppm	±4,0%
HC	NAPRO	Analizador de Gases	PC Multigas	0-20,000 ppm	±3,0%
CO	NAPRO	Analizador de Gases	PC Multigas	0-15 %vol	±2,5%
CO₂	NAPRO	Analizador de Gases	PC Multigas	0-20 %vol	±2,5%
Opacidade	Altanova	Opacímetro	Smoke Check 2000	0-9.99 m ⁻¹	±0,5%
Temperatura Ambiente	TC	Termorresistência	PT100	0-650 °C	±0,8%
Pressão Barométrica	Vectus	Analógico	7450	800-1200 mbar	±1,0%
Umidade	Humirel	Piezorresistivo	HPP811B002	0-100 %	±3,0%
Pressão de Admissão	Bosch	Piezorresistivo	0281002437	0-5 bar	±0,1%
Temperatura de Admissão	TC	Termorresistência	PT100	0-650 °C	±0,8%
Pressão de Exaustão	Sabi Control	Piezorresistivo	SBTP	0-2 bar	±0,1% (full scale)
Temperatura de Exaustão	TC	Termopar	Tipo K	0-1372	±1,1%
Temperatura do óleo do motor	TC	Termopar	Tipo K	0-1372	±1,1%

Para a operação *Dual-Fuel*, bioetanol hidratado (E100 como combustível de baixa reatividade) foi injetado no pórtico de admissão perto da válvula de admissão com um injetor Bosch PFI de 3 furos, modelo 0280150993. Uma ECU (modelo Fueltech FT450) foi utilizada para controlar remotamente o fluxo de massa do bioetanol por meio do tempo de abertura do injetor em uma frequência de injeção semi-sequencial. Na Figura 4-3 mostra-se o injetor de etanol no pórtico de admissão do motor. Na Figura 4-4 apresenta-se o projeto geral da bancada de teste usada neste estudo.

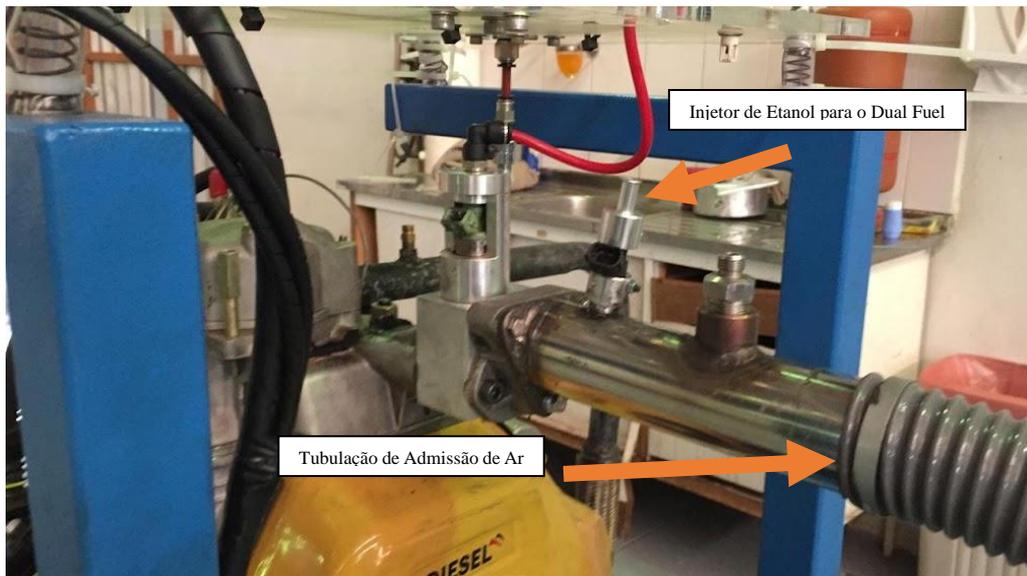


Figura 4-3 - Detalhe do pórtico de injeção do etanol no sistema Dual-Fuel.

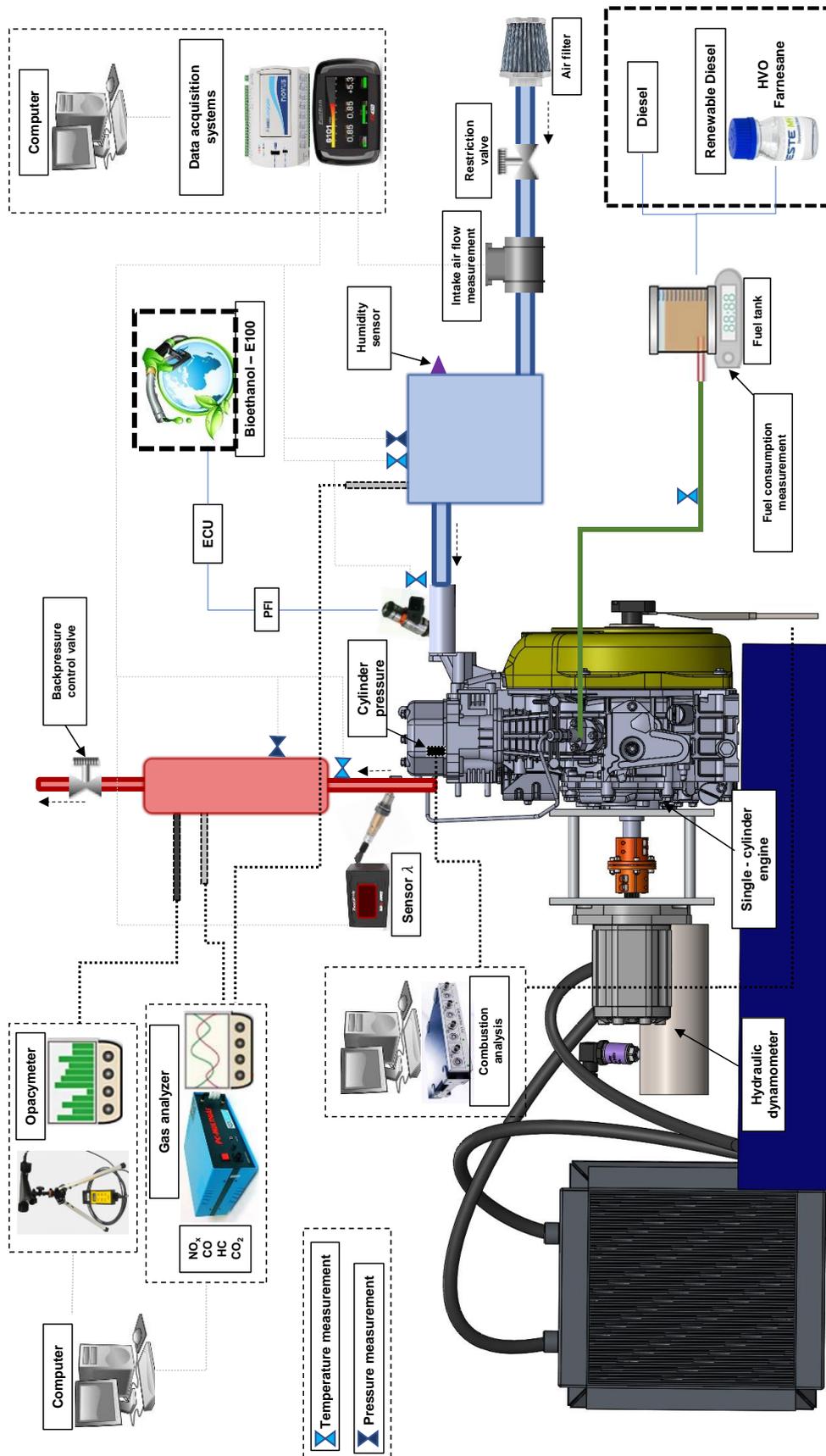


Figura 4-4 - Esquema da Bancada Experimental
 Fonte: Adaptado de Costa (2021)

4.2 Procedimento Experimental

A primeira etapa do procedimento experimental foi a calibração do sistema de injeção no ponto onde seu comportamento foi adquirido para saber o consumo de bioetanol combustível para cada tempo de injeção aplicado pela ECU correlacionado à condição operacional do motor. A pressão de injeção do bioetanol e o tempo de avanço foram mantidos constantes durante todos os testes a 3,8 bar de pressão e 180 ° antes do TDC de compressão, respectivamente. Na Figura 4-5 mostra-se a curva de calibração obtida em função do tempo de abertura do injetor de etanol.

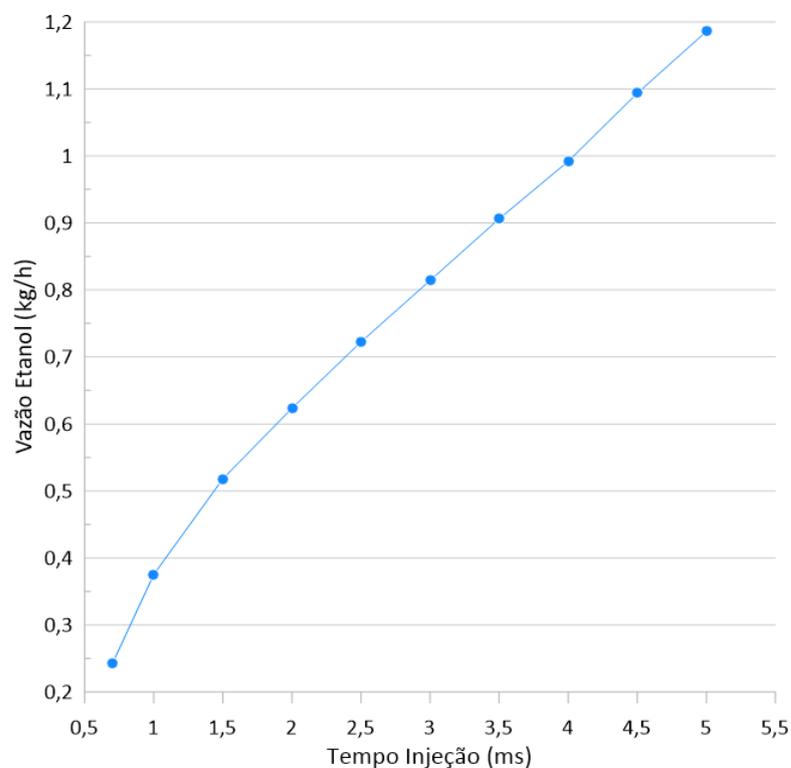


Figura 4-5 - Curva de Calibração do Injetor de Etanol

Fonte: Próprio Autor

Nesse sentido, a operação bicomcombustível consistia no aumento da injeção de bioetanol com conseqüente redução do consumo de combustível piloto, garantindo uma combustão estável e operação segura do motor. A Fração de energia do bioetanol hidratado (EF), calculada por meio da Eq. (2), expressa a razão entre o conteúdo de energia do bioetanol e a energia total disponível na mistura de combustível, onde \dot{m} é a massa do combustível e o "combustível piloto" (ou combustível de alta reatividade) representa o diesel comercial ou HVO (dependendo do ponto de teste, com avanço de injeção estática fixo em 22 ° antes do TDC de compressão e

pressão de injeção fixa em 19,6 MPa, como mencionado anteriormente). As relações de EF testadas e analisadas neste estudo foram EF = 0% (representando operação com um único combustível sem bioetanol), EF = 27%, EF = 32%, EF = 40% e EF = 44%. Uma tolerância de EF de no máximo 1% para cada condição de teste foi assumida devido às dificuldades de configuração da injeção e diferentes características de combustão / desempenho observadas durante os experimentos.

$$EF_{Bioethanol} = \frac{\dot{m}_{Bioethanol} \cdot LHV_{Bioethanol}}{(\dot{m}_{Pilot\ fuel} \cdot LHV_{Pilot\ fuel}) + (\dot{m}_{Bioethanol} \cdot LHV_{Bioethanol})} \quad (2)$$

As condições de teste experimentais levaram em consideração a aplicação não rodoviária ou *off-road* de motores de ignição por compressão de combustão interna na América do Sul, mais especificamente, para geração de energia em nível local ou tratores agrícolas de pequena escala. Os testes foram realizados a uma velocidade constante de 1.800 rpm e torque de freio fixo de 10 Nm, o que representa 50% do torque máximo correspondente do motor monocilíndrico. A condição de operação escolhida representa um ponto do Ciclo Estável Não Rodoviário (NRSC), que é utilizado no Brasil para processos de homologação de motores-geradores e tratores agrícolas. Além disso, a rotação do motor de 1800 rpm escolhida é compatível com a frequência de 60 Hz disponível nas redes latinas de distribuição de eletricidade.

4.3 Caracterização dos Combustíveis

Diesel comercial e HVO foram usados como combustíveis piloto ou combustíveis de alta reatividade, sendo injetados diretamente dentro da câmara de combustão como em um motor de ignição por compressão normal. Para a operação de combustível duplo, o bioetanol (como um combustível de baixa reatividade) foi injetado no pórtilo de admissão perto da válvula de admissão, entrando no cilindro como uma mistura com ar. O diesel comercial consistia em uma mistura B10 (90% diesel, 10% biodiesel, com base no volume) de acordo com as regulamentações brasileiras atuais, conforme descrito por Souza *et al.* (2021). O HVO tipo NExtBTL foi produzido e doado à UNIFEI pela multinacional NESTE. Por fim, o bioetanol hidratado foi obtido em um posto de combustível local, visto que esse combustível já

é amplamente utilizado na matriz de transporte brasileira. Nas Tabelas 4-3 e 4-4 apresentam-se as principais propriedades físico-químicas dos combustíveis citados.

Tabela 4-3 - Propriedades Físico-Químicas do diesel e HVO

Propriedade	Diesel	HVO	Método
Fórmula Molecular Aproximada	$C_{14.22}H_{26.24}O_{0.19}$	$C_{14}H_{30}$	-
Razão H/C	1.84	2.14	Calculado
Razão Estequiométrica ar/combustível	14.21	14.97	Calculado
PCI (MJ/kg)	41.03	44.10	ASTM D 240
Número de Cetano	50.5	76.3	ASTM D 613
Massa específica a 20 °C (kg/m³)	846.6	780.0	ASTM D 4052
Viscosidade Cinemática a 40 °C (mm²/s)	2.88	2.82	ASTM D 445
Destilação (C°)			
10% vol.	195.0	~250	ASTM D 86
50% vol.	262.0	-	ASTM D 86
90% vol.	339.0	~250	ASTM D 86
Composição			
C (% massa)	85.33	84.60	ASTM D 5291
H (% massa)	13.12	15.39	ASTM D 5291
O (% massa)	1.55	0.00	ASTM D 5291
S (% massa)	0.001	0.00	ISO 20884

Fonte: Costa *et al.* (2021); Dimitradis *et al.* (2019); Parravicini, Barro e Boulouchos (2021)

Tabela 4-4 - Propriedades Físico-Químicas do Etanol Hidratado

Fórmula Molecular Aproximada	C_{1.66}H_{5.32}O
Composição (%vol)	C ₂ H ₆ O – 95.1% H ₂ O – 4.9%
Massa específica a 20°C [kg/m³]	805.2
Número de Octanas	91.8
Número de Octanas Teóricas	>100
Temperatura de AutoIgnição [°C]	363
Poder Calorífico Inferior (PCI) [MJ/kg]	24.76 (R.B.R. da Costa et al., 2020; Roberto Berli Rodrigues da Costa et al., 2019, 2015)
Temperatura de Chama Adiabática [°C]	~1920 -2080
Razão ar/combustível estequiométrica	8.36

Fonte: ANP (2015); Coronado *et al.* (2014); Melo *et al.* (2012)

4.4 Parâmetros Gerais de Desempenho e Análise de Emissões dos Gases de Escape

O trabalho indicado líquido entregue ao pistão durante todo o ciclo de quatro tempos (W_{ind}) foi calculado pela Equação (4), onde o ponto zero do ângulo do virabrequim foi definido com o PMS de compressão ($\theta = 0^\circ$).

$$W_{ind} = \int_{\theta=-360^\circ}^{\theta=360^\circ} p_i dV \quad (3)$$

A carga do motor em uma determinada condição foi representada pelo torque definido que resultou na pressão média efetiva indicada líquida de cada estado (IMEP – *Indicated mean effective pressure*), que considera os cursos de admissão e exaustão no cálculo e é relacionada pela relação entre o W_{ind} e o V_d :

$$IMEP = \frac{W_{ind}}{V_d} \quad (4)$$

A potência indicada líquida P_{ind} foi relacionada com o $IMEP$ por:

$$P_{ind} = \frac{IMEP \times V_d \times N}{1,2 \times 10^9} \quad (5)$$

onde N é a rotação em rpm.

A potência de eixo líquida, em [kW], foi calculada por:

$$P_{eixo} = \frac{2\pi N\tau}{60 \times 1000} \quad (6)$$

onde τ é o torque no eixo em [Nm] medido pelo dinamômetro.

A eficiência térmica do motor η_{motor} , em [%], é calculada por:

$$\eta_{motor} = \frac{3,6 \times P_{eixo}}{\dot{m}_{comb} \times PCI_{comb} + \dot{m}_{etanol} \times PCI_{etanol}} \times 100 \quad (7)$$

onde PCI_{comb} é o poder calorífico inferior do combustível piloto, em [MJ/kg] e PCI_{etanol} é o poder calorífico inferior do etanol, em [MJ/kg].

A concentração de cada gás componente na exaustão do motor foi medida pelo analisador de gases da marca NAPRO. As medições foram convertidas em emissões específicas de gases de escape usando a metodologia descrita por Pedrozo (2017). Emissões específicas de eixo de CO_2 , CO , NO_x e HC não queimados, em g/kWh, foram calculados usando as Equações (8) à (11).

$$BSCO = \frac{\dot{m}_{CO}}{P_{eixo}} = \frac{u_{CO}[CO]\dot{m}_{ex}k_{w,r}}{P_{eixo}} \quad (8)$$

$$BSNO_x = \frac{\dot{m}_{NO_x}}{P_{eixo}} = \frac{u_{NO_x}[NO_x]\dot{m}_{ex}k_{w,r}k_{h,D}}{P_{eixo}} \quad (9)$$

$$BSHC = \frac{\dot{m}_{HC}}{P_{eixo}} = \frac{u_{HC}[HC]\dot{m}_{ex}}{P_{eixo}} \quad (10)$$

$$BSCO_2 = \frac{\dot{m}_{CO_2}}{P_{eixo}} = \frac{u_{CO_2}[CO_2]\dot{m}_{ex}k_{w,r}}{P_{eixo}} \quad (11)$$

onde, $\dot{m}_{gás}$ é a concentração do gás componente analisado, em [g/h], [gás] é a concentração do componente em ppm, \dot{m}_{ex} é a vazão mássica total de exaustão, em [kg/h], calculada por:

$$\dot{m}_{ex} = \dot{m}_{comb} + \dot{m}_{etanol} + \dot{m}_{ar} \quad (12)$$

onde \dot{m}_{ar} é a vazão mássica de ar admitida pelo motor, em [kg/h], \dot{m}_{etanol} é a vazão mássica de etanol admitida como combustível de baixa reatividade, em [kg/h] e \dot{m}_{comb} é a vazão de combustível piloto, que pode ser diesel ou HVO, em [kg/h].

O termo $u_{gás}$ é a razão tabulada pela norma NBR ISO 8178-1 entre o correspondente componente e a massa específica dos gases de escape. Neste trabalho, foram utilizados os valores para o diesel, conforme apresentado na Tabela 4-5.

Tabela 4-5 - Razão tabulada para o componente e a massa específica dos gases de escape para cada combustível utilizado

Gás de Escape Bruto	$u_{gás,diesel}$	$u_{gás,HVO}$	$u_{gás,etanol}$
CO ₂	0,001517	0,001517	0,001539
CO	0,000966	0,000966	0,000980
NO _x	0,001586	0,001586	0,001609
HC	0,000482	0,000482	0,000780

Fonte: (ABNT, 2012)

A razão $u_{gás}$ para a mistura aplicada no *Dual-Fuel* é calculada pela Eq. (13).

$$u_{gás,mix} = \frac{\dot{m}_{comb}u_{gás,comb} + \dot{m}_{etanol}u_{gás,etanol}}{\dot{m}_{comb} + \dot{m}_{etanol}} \quad (13)$$

As concentrações de NO_x, CO e CO₂ foram convertidas para base úmida aplicando um fator de correção para o gás de exaustão bruto $k_{w,r}$, apresentado na equação (14), que varia de acordo com a composição e a mistura do combustível no cilindro.

$$k_{w,r} = 1,008 \left[1 - \frac{1,2442 (H_a) + 111,19 C_{\%} \left(\frac{\dot{m}_{comb} + \dot{m}_{etanol}}{\dot{m}_{ar\ seco}} \right)}{773,4 + 1,2442(H_a) + k_{f,w} \left(\frac{\dot{m}_{comb} + \dot{m}_{etanol}}{\dot{m}_{ar\ seco}} \right) \times 10^{-3}} \right] \quad (14)$$

onde $k_{f,w}$ é um fator específico do combustível nos gases de escape úmidos calculado por:

$$k_{f,w} = 0,055594H_{\%} + 0,0070046O_{\%} \quad (15)$$

A determinação dos componentes reais da mistura dentro do cilindro, $C_{\%}$, $H_{\%}$ e $O_{\%}$ é calculada pelas Equações (16), (17) e (18).

$$C_{\%} = \frac{\dot{m}_{comb}C_{\%,comb} + \dot{m}_{etanol}C_{\%,etanol}}{\dot{m}_{comb} + \dot{m}_{etanol}} \quad (16)$$

$$H_{\%} = \frac{\dot{m}_{comb}H_{\%,comb} + \dot{m}_{etanol}H_{\%,etanol}}{\dot{m}_{comb} + \dot{m}_{etanol}} \quad (17)$$

$$O_{\%} = \frac{\dot{m}_{comb}O_{\%,comb} + \dot{m}_{etanol}O_{\%,etanol}}{\dot{m}_{comb} + \dot{m}_{etanol}} \quad (18)$$

O termo H_a na equação (14) é a umidade do ar de admissão em g de água por kg de ar seco, calculado por:

$$H_a = \left(\frac{M_{H_2O}}{M_{ar\ seco}} \right) \frac{p_{vapor}}{(p_{amb} - p_{vapor})} \times 10^{-3} \quad (19)$$

onde " M_{H_2O} " é a massa molar da água de 18,015 g/mol, " $M_{ar\ seco}$ " é a massa molar do ar seco de 28,965 g/mol, e " p_{amb} " é a pressão ambiente (ABNT, 2012). O termo " p_{vapor} " é a pressão parcial de vapor de água no ar, derivada da umidade relativa do ar ambiente (RH) como mostrado na Equação (20):

$$p_{vapor} = p_{sat} \frac{RH}{100} \quad (20)$$

onde p_{sat} é a pressão de saturação do vapor de água em Pa, calculado pela formulação desenvolvida por Wexler (1976):

$$p_{sat} = e^{F(7) \ln(T_{amb}) + \sum_{j=0}^6 F(j)(T_{amb})^{j-2}} \quad (21)$$

onde $F(0) = -0,29912729 \times 10^4$, $F(1) = -0,60170128 \times 10^4$, $F(2) = +0,1887643854 \times 10^2$, $F(3) = -0,28354721 \times 10^{-1}$, $F(4) = +0,17838301 \times 10^{-4}$, $F(5) = -0,84150417 \times 10^{-9}$, $F(6) = +0,44412543 \times 10^{-12}$, $F(7) = +0,28584870 \times 10^1$, e " T_{amb} " é a temperatura ambiente em K.

O termo " $\dot{m}_{ar\ seco}$ " na Equação (14) é a massa de ar admitida em base seca, que foi obtida subtraindo a umidade da massa de ar medida:

$$\dot{m}_{ar\ seco} = \dot{m}_{ar} - \dot{m}_{umidade} = \frac{\dot{m}_{comb}}{1 + H_a \times 10^{-3}} \quad (22)$$

Em particular, a concentração de NO_x também foi corrigida por um fator de correção $k_{h,D}$ relativo à umidade, aplicado em motores de ignição por compressão, dado por (ABNT,2012):

$$k_{h,D} = 15,698 \frac{H_a}{10^3} + 0,832 \quad (23)$$

O cálculo da emissão específica indicada líquida de material particulado ($ISMP$) foi ligeiramente diferente da determinação dos outros gases poluentes de escape. Primeiramente, a medição do coeficiente de absorção pelo opacímetro (k) em m^{-1} foi correlacionada para a base de medição FSN (do inglês, *Filter Smoke Number*) de acordo com a Equação (24) (LAKSHMINARAYANAN e ASWIN, 2017):

$$Opacidade(m^{-1}) = 0,12[FSN]^3 + 0,62[FSN]^2 + 3,96[FSN] \quad (24)$$

A concentração de material particulado ($[MP]$) foi calculada pela Equação (25) (AVL, 2013):

$$[MP] = \frac{5,32[FSN]e^{0,31[FSN]}}{0,405} \quad (25)$$

Finalmente, a emissão de material particulado específica, $ISMP$, em $[g/kW]$ foi calculada por:

$$BSMP = \frac{[MP]\dot{m}_{ex}}{\rho_{ex}P_{eixo}} \quad (26)$$

onde ρ_{ex} é a massa específica dos gases de exaustão determinada pela Equação (27), baseada na NBR ISO 8178-1 (ABNT, 2012):

$$\rho_{ex} = \frac{10^3 + H_a + \left(\frac{\dot{m}_{comb} + \dot{m}_{etanol}}{\dot{m}_{ar\ seco}} \right) \times 10^3}{773,4 + 1,2434H_a + k_{f,w} \left(\frac{\dot{m}_{comb} + \dot{m}_{etanol}}{\dot{m}_{ar\ seco}} \right) \times 10^3} \quad (27)$$

5 INVENTÁRIO

No presente capítulo são mostrados os principais dados de inventário utilizados no estudo, reunindo dados de cultivo e colheita da soja e palma, dados do processo de produção do HVO e também a delimitação do estudo do ciclo de vida do HVO. Foi utilizado o *software* SimaPro 9 para a ACV, utilizando-se dados de inventário secundários para as etapas envolvendo a produção do HVO e dados primários para a combustão do HVO no motor monocilíndrico para a geração de energia. A unidade funcional foi definida como 1000 kWh de energia gerada pelo motor monocilíndrico.

5.1 Inventário de Emissões

Com o aumento do uso de combustíveis fósseis, uso extensivo de terras agrícolas, expansão do desmatamento, entre outros fatores, houve o crescimento de emissões de Gases Efeito Estufa (GEEs). Sua nomenclatura é dada uma vez que possuem a capacidade de reter radiação solar, transformando-a em radiação infravermelha térmica, que fica retida entre a superfície terrestre e sua atmosfera (DOTTO, 2017)

Dentro do grupo de GEEs estão: vapor d'água, gás carbônico (CO_2), gás metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e gases fluorados. O primeiro, é encontrado em suspensão na troposfera. O segundo, gás carbônico, pode ser emitido por várias ações antrópicas, principalmente pelo uso de combustíveis fósseis. O terceiro, gás metano, é produzido pela decomposição de matéria orgânica. O quarto, óxido nitroso, tem como origem por exemplo o tratamento de dejetos de animais e uso de fertilizantes. Por último, os gases fluorados, são gases sintéticos emitidos por vários processos industriais e, apesar de serem emitidos em pequenas quantidades, possuem um alto potencial de aquecimento global (IBTS, 2020). As principais fontes emissoras desses gases são apresentadas na Tabela 5-1.

Com a finalidade de comparar os gases, utiliza-se o método do carbono equivalente (CO_{2e}), que transforma cada gás em CO_{2e} através de um fator de equivalência. Na Tabela 5-2 apresenta-se uma comparação entre os GEEs através da métrica *Global Warming Potential* – Potencial de aquecimento global (GWP)

Tabela 5-1 - Emissões de GEE por tipo de gás e fontes emissoras

GEE	Principais Fontes Emissoras	Geração de GEE por tipo de Gás
Dióxido de Carbono (CO₂)	Combustíveis de origem fóssil, processos industriais	65%
	Desmatamento e Uso do solo	11%
Gás Metano (CH₄)	Atividades agrícolas, gerenciamento de resíduos, uso de energia e queima de biomassa	16%
Óxido de Nitrogênio (N₂O)	Atividades agrícolas, uso de fertilizantes, processo de combustão de combustíveis de origem fóssil	6%
Gases Fluorados	Processos industriais, processos de refrigeração	2%

Fonte: Adaptado de IBTS (2020)

Tabela 5-2 – Fatores de equivalência para GWP

Gás	Símbolo	GWP-100
Dióxido de Carbono	CO ₂	1
Metano	CH ₄	28
Óxido Nitroso	N ₂ O	265
Hidrofluorcarbonetos	HFC-23	12400
	HFC-125	3170
	HFC-134a	1300
	HFC-143a	4800
	HFC-152	138
Perfluorcarbonetos	CF ₄	6630
	C ₂ F ₆	11100
Hexafluoreto de Enxofre	SF ₆	23500

Fonte: Adaptado de IBTS (2020)

Com a grande presença de NO_x em fertilizantes e pesticidas os quais são muito usados na agricultura, este se torna um importante setor na emissão de GEEs, contribuindo com 31% do total de emissões globais. A partir da Figura 5-1 é possível observar as atividades dentro do setor que se apresentam como fontes de GEEs na agricultura.

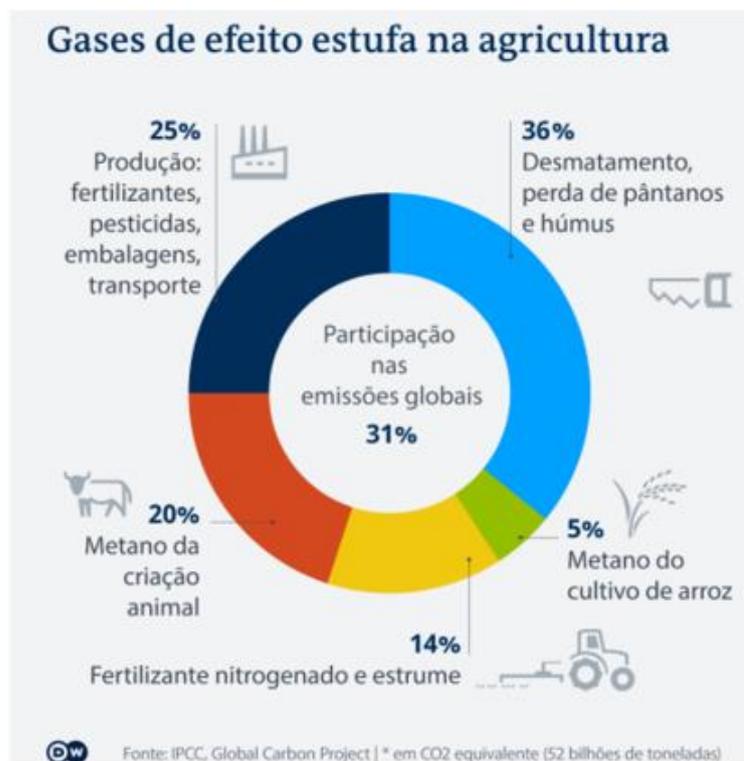


Figura 5-1 - Gases Efeito Estufa na agricultura (RUETER, 2020)³.

Nesse sentido, o Brasil, sendo o 4º maior produtor de grãos do mundo, tem um campo rico de estudo sobre a emissão de gases no setor agrícola e que comprovam o impacto nas emissões de gases efeito estufa, como por exemplo Souza (2010) que realizou um estudo no estado do Pará, na região amazônica, sobre análise de ciclo de vida do uso de óleo de palma na produção de biodiesel. Em seu estudo considerou as emissões indiretas e diretas na fase de agricultura e encontrou que esta foi responsável por 64% das emissões de todo o processo, contabilizando 1165,08 (kg CO₂ eq/ha ano) só nas emissões de fertilizantes e pesticidas e 274.54 (kg CO₂e/ha ano) no consumo de diesel por máquinas e meios de transporte

5.2 Plantio e Cultivo de oleaginosas

A produção, tanto de biocombustíveis convencionais quanto a do Diesel Verde, é dependente da extração de óleos compostos por triglicerídeos que serão posteriormente tratados

³ Disponível em: <https://p.dw.com/p/3jpGP>

e por meio de seu processo específico de produção, serão transformados no combustível desejado. Para tanto, uma das principais matérias primas utilizadas na extração do óleo base é de origem vegetal. Dentre as principais plantas cultivadas para a produção dos combustíveis verdes, destacam-se a soja, a palma, canola, semente de girassol, mamona, entre outras. Nos tópicos seguintes serão mostrados detalhes do plantio, cultivo, extração e transporte de algumas das principais oleaginosas para a produção do HVO.

5.2.1 Soja

Soja é uma oleaginosa de importância internacional devido à sua demanda de proteína, óleo comestível e à produção de biodiesel. No Brasil, a área total de produção de soja, na safra 2020/2021, foi de 38,502 milhões hectares (CONAB, 2021) com produtividade média de 3517 kg/ha do grão. A produção de soja pode ocorrer de diferentes maneiras, dependendo do uso de produtos químicos e sistema de gestão. O mais adotado pelos agricultores brasileiros é a agricultura química e herbicida, que consiste na aplicação de pesticidas como estratégia de combate a pragas no campo (EMBRAPA, 2011).

Um sistema de gestão aplicado na produção de soja é o plantio direto. Este reduz a erosão do solo, a quantidade de insumos (calcário, pesticidas e fertilizantes) e maquinário em comparação com o sistema tradicional. Nas práticas tradicionais de produção de soja, para determinar a quantidade de insumos necessário (por exemplo, fertilizantes, calcário), empregava-se um valor médio para toda a área (EMBRAPA, 2011). Desta forma, partes da área recebem quantidades maiores de insumos do que o necessário, e outras menores.

Segundo Whelan e Mcbratney (2000) para resolver este problema, pode-se utilizar a técnica de agricultura de precisão (AP). O desenvolvimento da AP começou com a constatação de que nem todos os campos, nem mesmo partes do mesmo campo, têm a mesma resposta econômica ótima com a aplicação de uma quantidade determinada de insumos. Esta técnica está associada à utilização de equipamentos de alta tecnologia como: sistema de posicionamento global (GPS); sistema de informação geográfica (SIG); e sensores eletrônicos. O objetivo da agricultura de precisão é avaliar ou monitorar as condições de uma determinada parcela da terra, considerando suas variações espaciais e temporais, que influenciarão a produtividade da soja. O resultado é a possibilidade de aplicar a quantidade de insumos necessária em porções do campo, permitindo uma melhor gestão do processo de produção através da variabilidade observada (WHELAN e McBRATNEY, 2000; COELHO e SILVA, 2009).

5.2.1.1 Cultivo da Soja

A produção de soja é composta pelos fatores mostrados na Figura 5-2, a seguir. Pode-se observar que no cultivo da soja, os principais processos envolvidos são a produção de óleo diesel que será utilizado nas máquinas, produção de fertilizantes, produção de calcário, produção de defensivos e a produção de sementes.

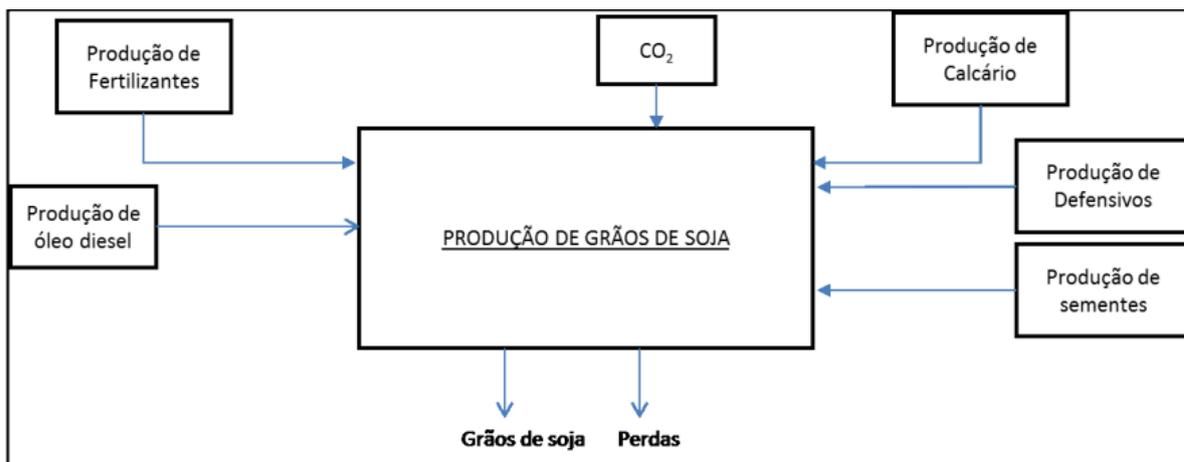


Figura 5-2 - Principais atividades da produção de soja.

Fonte: Adaptado De Tomadon Júnior, Ugaia E Gimenes (2017)

Dessa, forma, Tomadon Júnior, Ugaia E Gimenes (2017), mostraram que, para a produção de 1000 kg de soja, os seguintes dados de entrada e saída de insumos são necessários, conforme mostra a Tabela 5-3.

Tabela 5-3 - Entradas e Saídas Majoritárias para a Produção de 1000 kg de Grãos de Soja no Brasil

Entradas	Unidade	Quantidade
Sementes	kg	19,243
Ocupação	ha.a	0,2614
Dióxido de carbono	kg	1980,336
Energia	MJ	598,416
Calcário	kg	176,396
Fósforo	kg	35,459
Potássio	kg	28,741
Fungicida	kg	0,129
Inseticida	kg	0,2349
Herbicida	kg	1,327
Emissões para o Ar	Unidade	Quantidade
Monóxido de Carbono	g	136,377
Dióxido de Carbono	g	39,396
Metano	g	0,6857
Óxidos de Nitrogênio	g	436,881
Monóxido de Nitrogênio	g	1,696
Amônia	g	0,0997
NMVOC	g	41,9639
PM10	g	21,668
PM2,5	g	21,668
TSP	g	21,668
Emissões para o Solo	Unidade	Quantidade
Fungicida	kg	0,0784
Inseticida	kg	0,1339
Herbicida	kg	1,3309
Cádmio	mg	1747,25
Cromo	mg	70731,82
Níquel	mg	-1297,122
Cobre	mg	-13996,407
Chumbo	mg	519,335
Zinco	mg	-29460,07
Emissões para a água	Unidade	Quantidade
Nitrato	kg	5,321
Compostos de Fósforo	kg	0,061
Fungicida	kg	0,0481
Inseticida	kg	0,0822
Herbicida	kg	0,8172
Cádmio	mg	36,897
Cromo	mg	7583,586
Níquel	mg	1907,231
Cobre	mg	3670,318
Chumbo	mg	2014,613
Zinco	mg	11831,099

Fonte: Adaptado De Tomadon Júnior, Ugaia e Gimenes (2017)

O inventário mostra um fluxo de massa para o sistema de 273,99 kg de insumos para a produção de 1000 kg de soja. Os principais produtos deste fluxo são os fertilizantes, onde a calcário tem o maior valor, correspondendo a 64,38%. Fosfato e potássio correspondem a 12,94% e 10,49% do fluxo de massa, respectivamente. Os pesticidas utilizados não representam um fluxo de massa significativo para a produção de soja: fungicida, inseticida e herbicida correspondem a 0,047%, 0,0857% e 0,4843% do fluxo de massa do sistema, respectivamente. No entanto, estes produtos devem ser considerados no inventário e na avaliação ambiental devido a sua alta toxicidade, tanto para o ser humano como para o ecossistema. Além disso, apresenta-se uma alta taxa de dióxido de carbono, que é utilizado na fotossíntese para o desenvolvimento da planta, o que é considerado um fator positivo no cultivo da soja.

5.2.1.2 Consumo de Diesel nos Tratos Culturais

Durante toda etapa de produção da soja há o consumo de diesel por tratores, caminhões e aviões que são utilizados na etapa de plantação, aplicação de fertilizantes, pesticidas e colheita do grão. Como de conhecimento geral, a queima de combustíveis fósseis acarretam em elevada taxa de emissão de gases de efeito estufa e, portanto, não pode ser desconsiderada na análise.

Nessa fase é possível levar em conta o consumo direto e indireto do diesel, sendo o segundo o consumo utilizado na fabricação dos fertilizantes e pesticidas, por exemplo, aplicados na plantação. Esta emissão indireta será considerada com base nos dados fornecidos pela biblioteca *EcoInvent 3* do *software* SimaPro.

Já em relação às emissões diretas, Altamirano (2013) considera em seus estudos o consumo total de diesel em 50,26 L/ha para as atividades de secagem, calagem do solo, semeadura, aplicação de inseticida, fungicida, colheita e semeadura de cobertura verde. Assim, considerando a massa específica do diesel em 0,84 kg/L (ANP, 2014) e a produtividade da safra em 3517 kg/ha, pode-se dizer que o consumo de diesel para 1 tonelada de soja é de 12 kg de diesel.

5.2.1.3 Extração do Óleo de Soja

Após colhidos os grãos de soja, é necessária uma série de processos que entregarão como produto final o óleo vegetal utilizado para a produção do biocombustível. Segundo Dorsa (2004), para a produção de combustíveis renováveis, não é necessário o refino do óleo vegetal, assim, somente o óleo produzido a partir da degomagem do grão de soja é suficiente. A seguir,

são descritas, segundo Dorsa (2004), algumas das etapas necessárias para a obtenção do óleo base que será posteriormente submetido ao hidrotreatamento.

- **Recebimento e Pré-Limpeza** → Após da etapa de colheita, os tratores transportam a os grãos soja até a unidade de recebimento, onde são transportados por faixas transportadores até a unidade de beneficiamento. Dependendo do teor de impurezas presente, torna-se necessária a prélimpeza antes da secagem e armazenagem, a fim de proteger os equipamentos da ação erosiva da areia e pedras, e eliminar outro tipo de contaminantes que possam prejudicar a qualidade do produto. A pré-limpeza é feita nas denominadas peneiras gravitacionais (por diferença de peso) e nas peneiras classificadoras (por diferença de tamanho). Segundo Sheehan (1998) nesta etapa existe uma perda de 0,79% em relação à quantidade dos grãos transportados.

- **Secagem** → Para que o produto não sofra deterioração, deve ser seco até atingir uma umidade pré-determinada, para ser armazenado em condições controladas. A umidade dos grãos que chegam à unidade de recebimento tem entre 14 a 18%, e são secos até remover aproximadamente 34% dessa umidade (SHEEHAN,1998). A secagem é normalmente feita em secadores verticais tipo cascata, com utilização de gás quente de combustão ou gás natural dependendo da configuração da usina. Os secadores requerem 1940 kcal/kg de umidade removida, considerando que o calor latente de vaporização da água é de 610 kcal/kg, correspondendo a uma eficiência térmica de 31%. (SHEEHAN,1998). Segundo Dorsa (2004), a umidade depois da secagem deve ser menor que 12%, considerada ótima para evitar deterioração durante sua armazenagem e para a etapa de moagem.

- **Preparação** → A etapa de preparação tem por objetivo submeter os grãos a diversos processos físicos, a fim de facilitar a extração do óleo. A etapa de preparação dos grãos de soja envolve as operações de moagem, descascamento, novamente moagem, condicionamento e laminação. Inicialmente os grãos de soja passam por moinhos quebradores, onde são reduzidos, na primeira passagem a 1/2 grão, e na segunda passagem a 1/4 de grão. Após a redução dos grãos é feita a separação da casca que é enviada à unidade de processamento de farelo. A casca é separada utilizando separadores por aspiração tipo cascata.

5.2.1.4 O Óleo de Soja

O óleo de soja é extraído por extração por solvente. Segundo Dorsa (2004) este processo é composto de: (1) unidade de extração de óleo com solvente, (2) unidade de

recuperação do solvente da mistura, (3) unidade de dessolventização do farelo e (4) unidade de condensação de solvente.

- Unidade de Extração → Quatro tipos de extratores são amplamente utilizados: rotatório, leito profundo, faixa horizontal e extrator de esteira contínua, sendo o mais comum o do tipo esteira contínua, com ou sem caçambas, ou do tipo rotativo. O solvente entra em contato com a massa laminada no interior do extrator, usando-se uma relação de 1,2 kg de solvente/massa laminada. (SHEEHAN,1998). Para melhor efeito de extração, a miscela mais concentrada é usada para extrair o óleo em contracorrente à massa de soja, ou seja, a miscela lava a massa com maior teor de óleo. A miscela com baixa concentração é usada para a extração de óleo da massa com menor teor de óleo, sendo que a massa à saída do extrator é lavada com solvente puro. A miscela resultante contém de 19 a 24% de óleo (SHEEHAN,1998), e o farelo não deve conter mais de 1% de óleo (Dorsa 2004), representando uma eficiência de extração de aproximadamente 96%. O solvente é posteriormente recuperado e recirculado ao processo, junto com uma corrente de make-up de 0,0024kg de solvente/kg de massa laminada. (SHEEHAN,1998)

- Unidade de Recuperação de Solvente → A mistura óleo-solvente passa pela unidade de evaporação, onde é feita a separação do óleo do solvente. É constituída por evaporadores tubulares verticais de múltiplo efeito aquecidos a vapor. Uma última etapa é a injeção de vapor direto que reduz o teor de solvente no óleo a 120mg/L.

- Unidade de Dessolventização do farelo → O farelo resultante do extrator tem aproximadamente 40% de solvente. O objetivo desta unidade é eliminar o solvente absorvido pelo farelo. Em seguida o farelo é tostado e, por final resfriado, estabilizando sua umidade na faixa de 12%. Esta unidade é constituída por diversos estágios sobrepostos, por onde o farelo passa em fluxo descendente. Os estágios são dotados de camisa de vapor e fundos duplos, sob a injeção de vapor e de subsequente ar frio para o resfriamento. O farelo resultante desta unidade contém uma quantidade residual de solvente cerca de 400ppm.

- Unidade de Condensação de Solvente → Esta unidade é formada por uma série de condensadores tubulares resfriados a água, que tem por função recuperar o solvente evaporado nas etapas de recuperação de solvente e dessolventização. A aspiração dos gases de solvente é feita por sistema de vácuo por ejetores a vapor.

5.2.1.5 Degomagem

Os óleos vegetais contêm fosfolipídios, também conhecidos como fostatídeos ou simplesmente gomas. Existem dois tipos de gomas: as hidratáveis e não hidratáveis. O óleo de soja de qualidade normal, proveniente de uma extração convencional contém cerca de 90% de gomas hidratáveis e 10% de gomas não hidratáveis e seu conteúdo total de fosfatídeos está na faixa de 1,1 a 3,2% em massa. A degomagem é o processo de remoção das gomas do óleo bruto de soja. As gomas hidratáveis podem ser facilmente removidas pela adição de água quente, na proporção de 1 a 2% em peso do óleo bruto, dependendo do conteúdo de gomas. O óleo bruto é aquecido a 70-90°C imediatamente misturado com água abrandada quente a 90°C. Em seguida, as gomas podem ser separadas por centrifugação. Na degomagem com água, apenas as gomas hidratáveis podem ser removidas. (SCHUCK, 2004)

Posteriormente, no processo de refino alcalino, as gomas não hidratáveis são removidas com a borra durante a neutralização dos ácidos graxos livres com soda cáustica. Após a separação das gomas, o óleo pode conter ainda cerca de 0,3-0,4% de água, o que pode resultar em uma subsequente hidratação de parte das gomas, durante um longo período de estocagem. Por este motivo, o óleo degomado é previamente seco em um sistema de vácuo a vapor, antes da sua estocagem. (MOURA, 2002).

5.2.2 Óleo de Palma

Segundo Mekhilef, Siga E Saidur (2011), o óleo de palma é uma das matérias-primas para a produção de biocombustíveis de maior prospectiva em comparação com outras sementes oleaginosas. O óleo de palma tem maior rendimento de produção, menos fertilizantes, água e pesticidas são necessários para a plantação. A produção de óleo de palma requer menos luz solar em termos de balanço de energia para produzir uma unidade de óleo, pois produz mais óleo por hectare.

Segundo Carvalho (2015), a expansão da palma pode causar diversos tipos de impacto ambiental e social ligados principalmente à segurança alimentar, demanda por terras, mudanças climáticas, perda de biodiversidade, conflitos fundiários e sociais. Portanto, sua expansão requer a busca de soluções integradas e sinérgicas, visto que esses impactos estão intimamente relacionados entre si. É necessário abordar mais profundamente a questão de cada um, já que cada impacto ambiental gera um social, e vice-versa, pois não há como alterar o meio ambiente

sem alterar as condições de vida de quem vive nele (JOHNSON, 2012). No Pará, e especificamente no polo produtor de óleo de palma no Pará, boa parte da população dos municípios é composta de ribeirinhos, quilombolas, agricultores familiares e trabalhadores rurais intensamente dependentes de suas terras (GLASS, 2013). Portanto, a expansão da palma acarretará em impactos ambientais e sociais negativos, a menos que as diretrizes dos programas lançados pelo governo sejam atendidas e que o processo seja constantemente monitorado.

Contudo, em termos de produção de óleo de palma por homem em um dia, não é tão competitivo quanto outras sementes oleaginosas por causa da dificuldade de trabalho manejo da plantação e colheita do fruto. O fruto da palma é conhecido como *Elaeis guineensis*. A parede interna da fruta, chamada de mesocarpo, é necessária para o processamento a fim de obter o óleo de palma. Na Figura 5-3 mostra-se as principais etapas do processo de transformação do óleo de palma em óleo de palma bruto, que é então transformado em outros produtos.

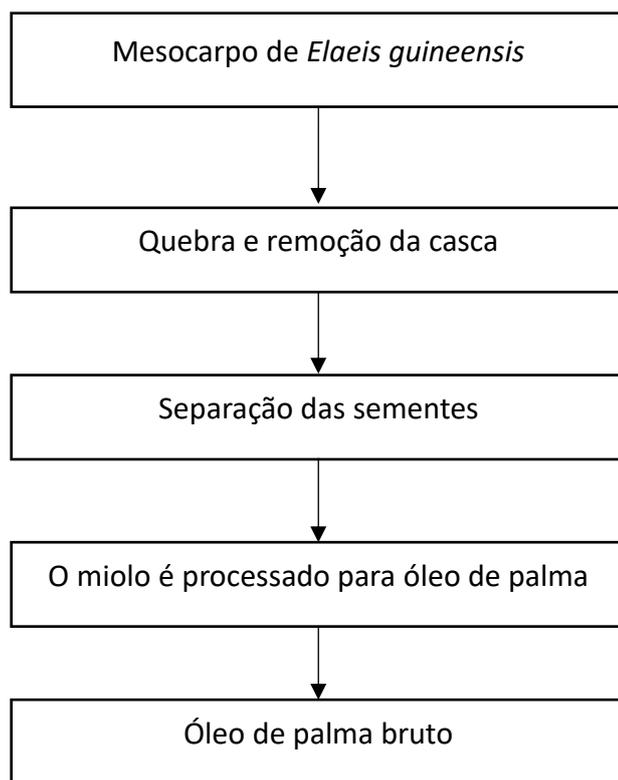


Figura 5-3 - Principais etapas na produção do óleo de palma

Fonte: Adaptado de Mekhilef, Siga E Saidur (2011).

5.2.2.1 Cultivo e colheita da Palma

Segundo EPE (2005), O tempo estimado de vida útil da palma é de 27 anos. A produtividade média anual é de 15 toneladas de cacho por hectare por ano e a produção de frutos se dá em até quatro anos após o plantio. A segunda etapa do ciclo produtivo da lavoura de palma é denominada de Pré-Plantio e consiste na produção das mudas (germinação das sementes, pré-viveiro e viveiro). Nesta etapa, se inicia a adubação da muda, realizada semanalmente com uma mistura de 3 kg de N, 4 kg de P₂O₅, 1kg de K₂O e 2 kg de sulfato de magnésio. A terceira etapa da fase agrícola é o Plantio Definitivo realizado na época mais chuvosa do ano, que compreende o intervalo de janeiro a maio, no caso da região Amazônica. As mudas são colocadas em covas, normalmente abertas de forma manual, e dispostas em triângulo equilátero, com 9 metros de lado, dando uma densidade final de 143 palmeiras por hectare.

Após o plantio definitivo, os tratos culturais asseguram o melhor desenvolvimento das palmeiras, tendo em vista as condições de solo e clima. Os tratos culturais incluem o replantio para substituir as plantas que morrem ou que apresentam problemas em seu desenvolvimento, o coroamento – que é uma limpeza manual do solo em torno da planta, o controle fito-sanitário para verificar o aparecimento de pragas e doenças, e a adubação.

EPE (2005) ainda afirma que a colheita dos cachos de palma é manual e praticada durante todo o ano. A colheita é a etapa mais importante e delicada, pois dela dependem a quantidade e qualidade do óleo que será extraído futuramente. A maturação dos cachos exige que os intervalos de colheita sejam de 10 a 15 dias e que o transporte do mesmo para o beneficiamento deva ser feito o mais rápido possível, em menos de 24 horas, para evitar degradação dos frutos. Da plantação até a beira da estrada, o transporte pode ser feito por tração animal ou motorizada (pequenos tratores) e, da estrada para as usinas de beneficiamento, por caminhões. Na figura 5-4 esquematiza-se o processo de produção da palma.

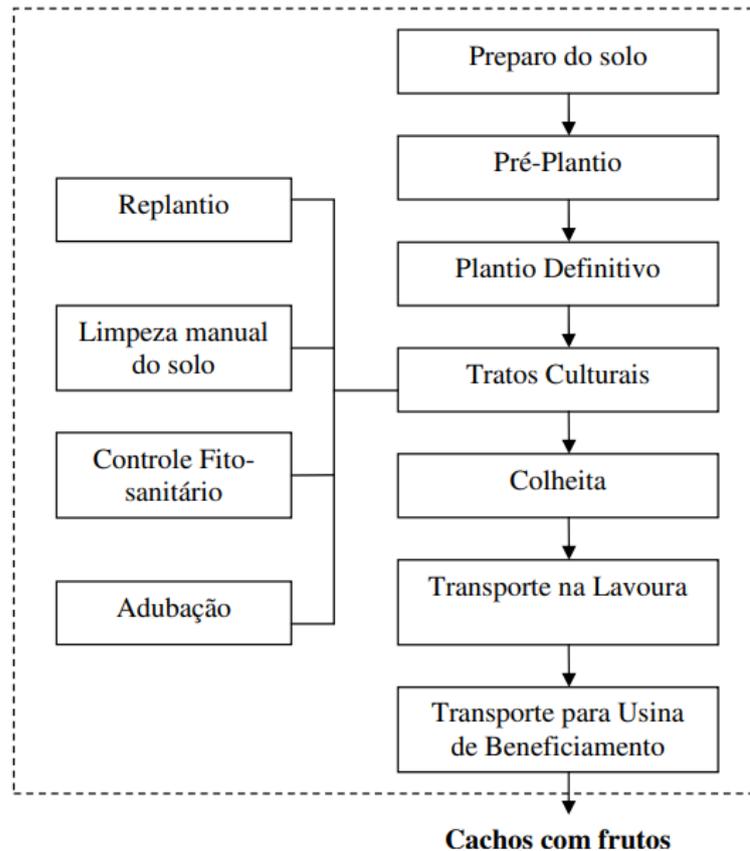


Figura 5-4 - Processo de Produção da palma

Fonte: EPE (2005).

O inventário apresentado a seguir, na Tabela 5-4 para o ciclo produtivo da plantação de palma quantifica os fluxos de entrada em função da produção de 1.000 kg de cachos com fruto. Considera-se o ciclo completo da lavoura de 33 anos. No ano 0 (zero) é realizado o preparo do solo (limpeza do terreno); nos anos 1 e 2, o pré-plantio. No ano 3 realiza-se o plantio definitivo e inicia-se a produção no ano 6, realizando-se 27 colheitas ao longo do ciclo completo. A produtividade anual média por hectare das árvores em produção é de 15 toneladas. Deste modo, a produtividade média do ciclo produtivo é de 12,3 toneladas de cacho por hectare-ano.

Tabela 5-4 - Inventário do cultivo para 1000 kg de frutos de palma

Etapa	Entrada	kg	GJ
Preparo do Solo	Diesel	1,84E-0,1	1,05E-02
Plantio Definitivo	Trabalho Manual	Não quantificado	
Tratos Culturais e Pré-Plantio: Adubação	N	9,82E-0,1	6,04E-02
	P	1,52	1,47E-02
	K	23,89	1,60E-01
	Mg	2,09	N.D.
	Mn	2,59E-02	N.D.
	Zn	7,04E-02	N.D.
	B	1,66E-02	N.D.
	Glifosato	4,71E-01	2,13E-01
	Carbaryl	1,89E-01	2,88E-02
	Acefato	9,65E-05	4,37E-05
	Colheita	Manual	Não quantificado
Transporte na lavoura	Animal	Não quantificado	
Transporte para usina	Diesel	9,94E-01	5,66E-02
Energia Total			5,44E-01
Emissões	kg	kg CO2 eq	
CO2	3,93E+00	3,93E+00	
CH4	2,58E-03	5,42E-02	
N2O	9,17E-02	2,84E+01	
CO	2,35E-02		
SO2	3,15E-03		
Nox	7,77E-02		
Material Particulado	1,49E-03		
COVNM	1,44E-02	3,24E+01	

Fonte: Adaptado de EPE (2005)

5.2.2.2 Recebimento, Preparo da Matéria Prima e Extração do Óleo

Costa (2007) cita que os frutos colhidos no campo são transportados em caminhões e são transferidos para a rampa de recebimento onde são direcionados aos processos de esterilização e cozimento. Após serem esterilizados e cozidos, os frutos passam pelo debulhador, onde ocorre a separação dos cachos e frutos. Os frutos são transferidos então para o digestor e os cachos vazios são transferidos para a área de estocagem através do transportador. Os frutos são macerados em um digestor e prensados mecanicamente por uma prensa contínua para a retirada do óleo do mesocarpo carnoso.

O óleo cru, obtido na prensagem é transferido para o desaerador, onde são retiradas as partículas pesadas e depois clarificado e purificado para a remoção de umidade, sujeira e outras impurezas. As fibras e impurezas retidas na peneira voltam para a prensagem e o óleo bruto é transferido para o tanque de decantação através de bomba centrífuga. Neste tanque ocorre a separação do óleo e da borra. O óleo é transferido para o tanque de armazenagem.

As amêndoas do fruto da palma são quebradas e laminadas por um cilindro laminador. A pasta produzida na laminação é cozida e prensada. O óleo bruto (palmiste) é filtrado no filtro prensa e a seguir transferido para o tanque de armazenagem, extraído mecanicamente ou por solvente. As extratoras de fruto de palma devem ser bem localizadas, estrategicamente próximas às plantações, com o objetivo de facilitar o transporte dos frutos até a indústria de extração. Vários processos operacionais são utilizados para obter o produto acabado. O primeiro passo do processamento produz o óleo bruto, extraído do mesocarpo do fruto. O óleo bruto de palma, na sua segunda fase, pode ser refinado ou também fracionado usando um processo de cristalização e separação simples onde são obtidas frações sólidas (estearina) e líquidas (oleína). Na figura 5-5 esquematiza-se um processo de produção do óleo de palma. A tabela 5-5 apresenta o inventário consolidado do processo de extração do óleo de palma. Os dados apresentados já consideram a etapa de cultivo da palma e consideram um rendimento de 20% de transformação do fruto da palma em óleo bruto.

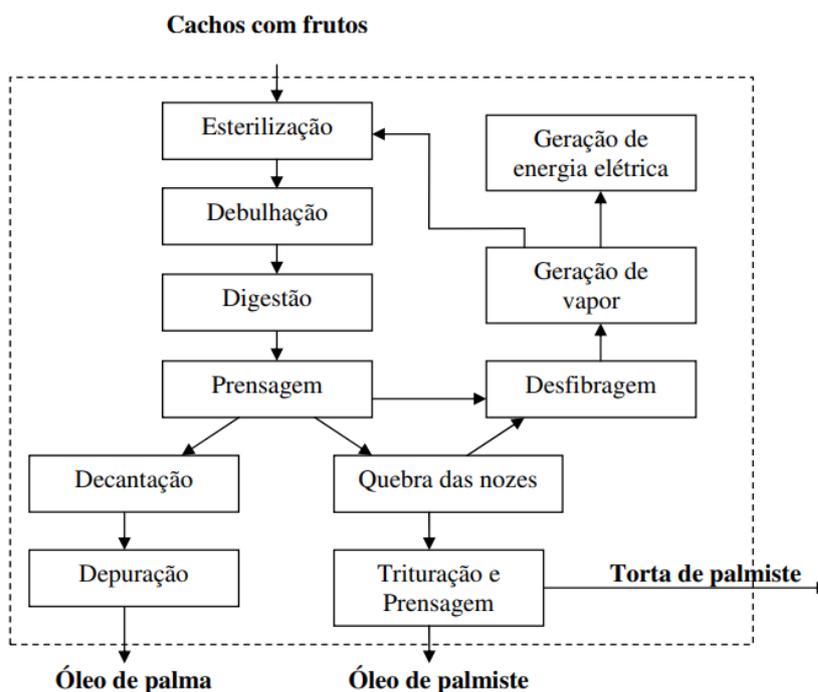


Figura 5-5- Modelo de Obtenção de óleo de palma

Fonte: EPE (2005)

Tabela 5-5 – Inventário consolidado para a produção de 1000 kg de óleo de palma, compilando a etapa de cultivo e extração do óleo

Entrada	kg
Diesel	7,96
N	4,42
P	6,84
K	107,51
Mg	9,41
Mn	1,17E-01
Zn	3,17E-01
B	7,47E-02
Glifosato	2,12
Carbaryl	8,51E-01
Acefato	4,34E-04
<hr/>	
Produto	kg
Óleo de Palma	1000
<hr/>	
Emissões	kg
CO₂	2,67E+01
CH₄	1,16E-02
N₂O	4,30E-01
CO	1,07E-01
MP	1,22E-02
SO_x	5,86E-02
NO_x	3,50E-01
HC	6,56E-02

Fonte: Adaptado de EPE (2005)

5.3 Usina de HVO

Na usina de HVO o óleo vegetal será transformado em biocombustível. Esse processo é composto por algumas etapas, a primeira sendo o pré-tratamento da matéria prima, afim de purificá-la. Em seguida, há a produção de hidrogênio, necessário no processo de hidrotreatamento. Por último, o próprio processo de hidrotreatamento, que converterá o óleo vegetal pré-tratado em HVO.

As etapas serão descritas neste tópico com base nas entradas e saídas dos subsistemas para produção de 1000 kg de HVO.

5.3.1 Pré-Tratamento

O subsistema de pré-tratamento para geração de 1000 kg de HVO é representado por meio do esquema da Figura 5-6.

Segundo Nikander (2008), as entradas no sistema de pré-tratamento podem ser sintetizadas em óleo vegetal (matéria prima), eletricidade, vapor, água e produtos químicos de lavagem (consistem aproximadamente 0,2% da quantidade de matéria prima). Na Tabela 5-6 apresenta-se os valores de entrada necessários no subsistema

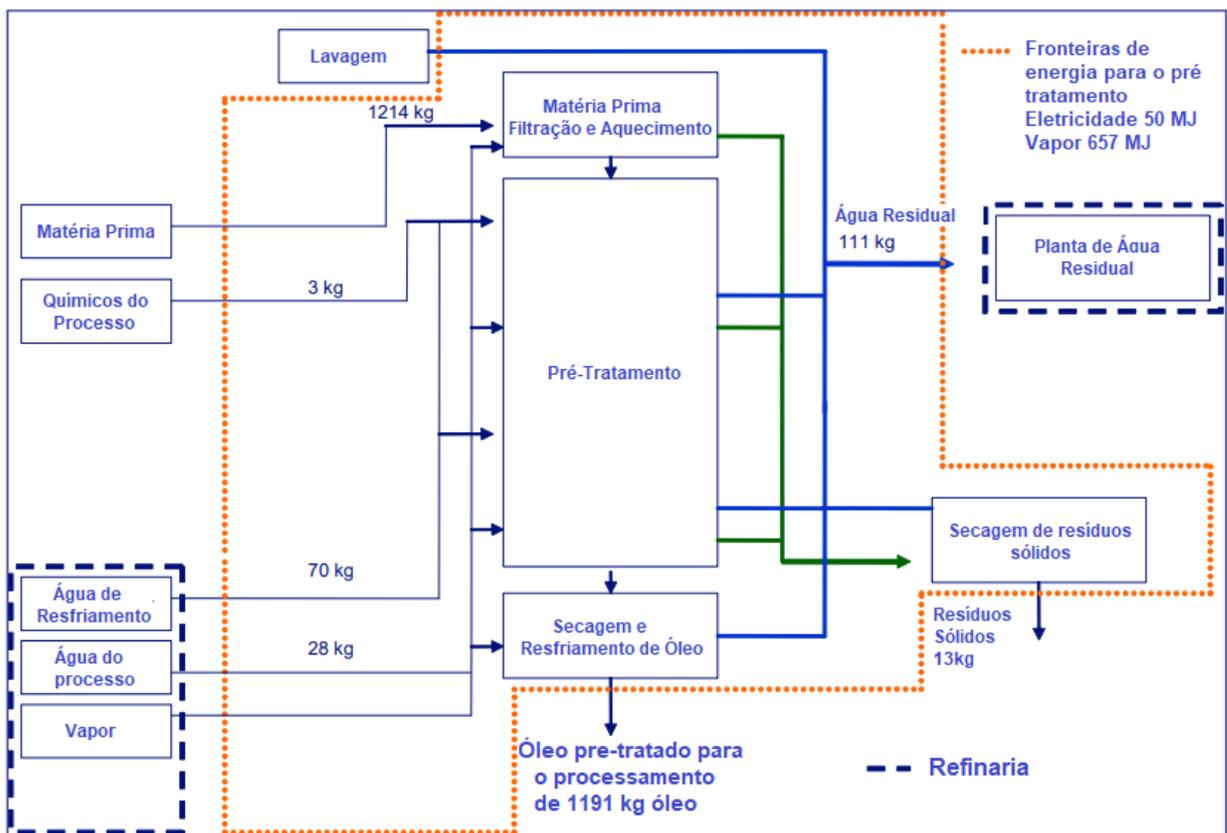


Figura 5-6 - Representação do sub-sistema de pré tratamento com suas principais entradas e saídas para produção de 1000 kg de biocombustível

Fonte: Nikander (2008)

Tabela 5-6 - Entradas no processo de pré-tratamento na geração de 1000 kg de HVO

Entradas do processo de pré-tratamento	
Matéria prima necessária	1 214 kg
Água de resfriamento	70 kg
Eletricidade	50 MJ
Químicos do processo	3 kg
Água do processo	28 kg
Vapor	657 MJ

Fonte: Nikander (2008)

O processo gera alguns resíduos sólidos nas etapas de pré-filtração e separação e gera também água residual. Para a água residual existe na unidade uma planta onde será feito o seu tratamento. Já os resíduos sólidos devem ser secos e tratados fora da unidade e podem ser reutilizados como fonte de energia. Na Tabela 5-7 apresentam-se os valores de saída do processo.

Tabela 5-7 - Saídas no processo de pré-tratamento na geração de 1000 kg de HVO

Saídas do processo de pré-tratamento	
Óleo Pré-tratado	1 191 kg
Resíduo sólido seco	13 kg
Água residual	111 kg
CO₂e da produção de eletricidade (indireto)	3 kg
CO₂e da produção de vapor (indireto)	40 kg

Fonte: Nikander (2008)

5.3.2 Produção de Hidrogênio

O processo de produção de hidrogênio ocorre da seguinte forma: em um reformador a vapor, onde são misturados gás natural e gás hidrogênio (proveniente do processo de refinamento do HVO, a ser explicado no tópico posterior), metano e vapor reagem formando hidrogênio e monóxido de carbono (CO). Em seguida, esse monóxido de carbono residual tem uma reação rápida com vapor, produzindo mais hidrogênio. Por fim, esse hidrogênio é resfriado e transferido a PSA para ser purificado e logo é mandado para rede da refinaria

(NIKANDER, 2008). O subsistema de produção de hidrogênio com suas principais entradas e saídas é representado na Figura 5-7.

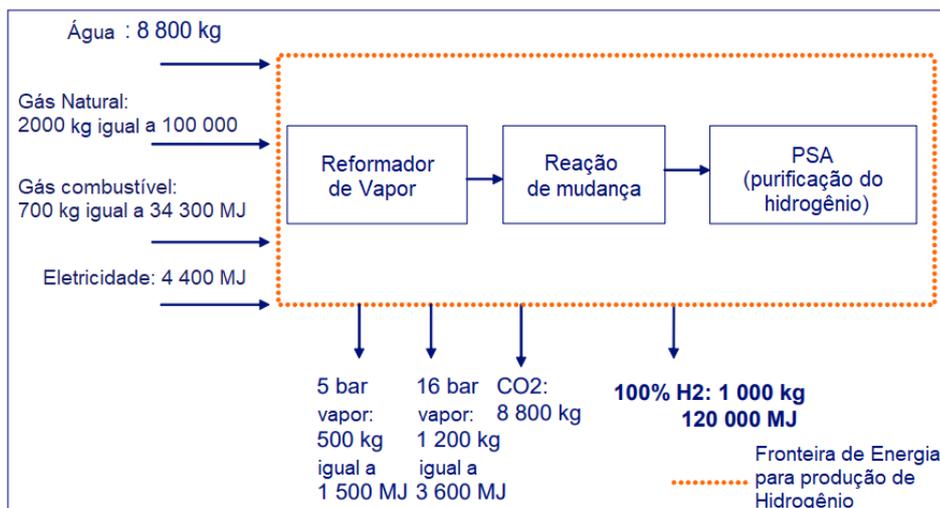


Figura 5-7 - Representação do sub-sistema de produção de hidrogênio com suas principais entradas e saídas para produção de 1000 kg de biocombustível

Fonte: Adaptado de Nikander (2008)

Nas tabelas 5-8 e 5-9 apresentam-se as entradas e saídas do processo de produção de hidrogênio

Tabela 5-8 - Entradas no processo produção de hidrogênio para geração de 1000 kg de HVO

Entradas no processo produção de hidrogênio	
Eletricidade	4400 MJ
Gás combustível	700 kg igual a 34 300 MJ
Gás Natural	2 000 kg igual a 100 000 MJ
Água do processo	8 800 kg

Fonte: Adaptado de Nikander (2008)

Tabela 5-9 - Saídas no processo produção de hidrogênio para geração de 1000 kg de HVO

Saídas do processo produção de hidrogênio	
100 % Hidrogênio	1 000 kg igual a 120 000 MJ
Vapor a 5 bar	500 kg igual a 1500 MJ
Vapor a 16 bar	1 200 kg igual a 3600 MJ
Perdas de Energia	13 600 MJ
CO2e da produção de eletricidade	270 kg
CO2e da produção de hidrogênio	8 530 kg

Fonte: Adaptado de Nikander (2008)

5.3.3 Hidrotratamento

É nesta etapa em que ocorre a produção do biocombustível HVO. A matéria prima pré-tratada é bombeada para dar início ao processo de hidrotratamento, onde ocorrerá a conversão dos triglicerídeos do óleo vegetal em hidrocarbonetos.

O subsistema do processo de hidrotratamento com suas principais entradas e saídas para produção de 1000 kg de HVO é representado na Figura 5-8.

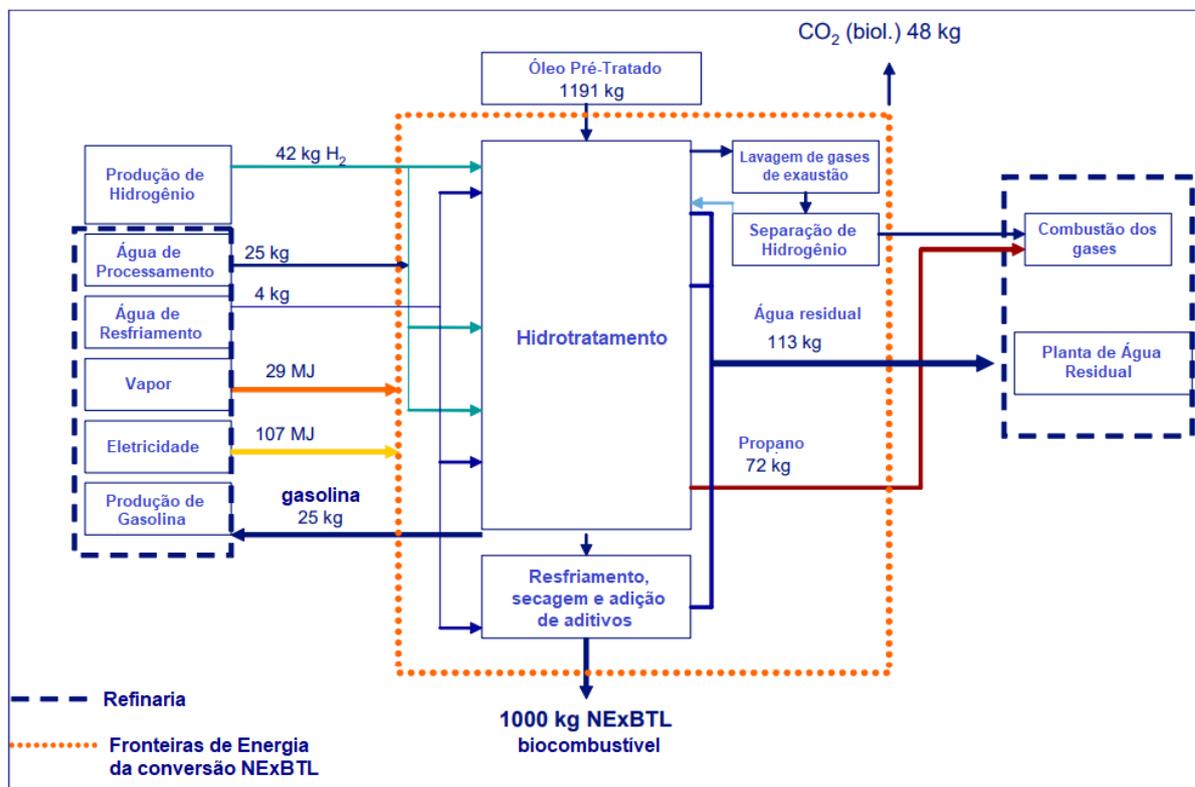


Figura 5-8— Representação do sub-sistema do processo de hidrotratamento com suas principais entradas e saídas para produção de 1000 kg de biocombustível

Fonte: Adaptado de Nikander (2008)

Além da matéria prima, é necessária eletricidade, hidrogênio, vapor e água para iniciar o processo. Os valores de entrada são apresentados na Tabela 5-10.

Tabela 5-10 - Entradas do processo de hidrotreatmento para geração de 1000 kg de HVO

Entradas do processo de hidrotreatmento	
Matéria prima necessária	1 191 kg
Hidrogênio necessário	42 kg
Água de resfriamento	4 kg
Eletricidade	107 MJ
Água do processo	25 kg
Vapor	29 MJ

Fonte: Adaptado de Nikander (2008)

O processo formará, além dos 1000kg de HVO com a tecnologia NExBTL, resíduos como propano, dióxido de carbono, água e biogolina. Os valores de saída do processo estão apresentados na Tabela 5-11.

Tabela 5-11 -Saídas no processo de hidrotreatmento para geração de 1000 kg de HVO

Saídas do Processo de Hidrotreatmento	Quantidade
NExBTL	1000 kg
Biogolina	25 kg
Propano	72 kg
Água residual	113 kg
CO2 Biológico do processo	48 kg
CO2e da produção de eletricidade (indireto)	7 kg
CO2e da produção de vapor (indireto)	2 kg

Fonte: Adaptado de Nikander (2008)

5.4 Emissões nos Sistemas de Transporte Rodoviário

A regulação brasileira relativa ao controle das emissões de veículos pesados preconizados pelo PROCONVE tem como base a correspondente regulamentação da União Europeia (UE). A fase em curso do PROCONVE para essa categoria de veículos, a fase P-7, é baseada na fase EURO V da UE - e foi disciplinada pela Resolução CONAMA nº 403/2008 e perdura até dias atuais no Brasil. Em 18 de junho de 2009, o Parlamento Europeu e o Conselho da UE já aprovavam o Regulamento CE nº 595/2009 instituindo a fase EURO VI. Dois anos após, esse marco foi complementado pelo Regulamento CE nº 582/2011 de 25 de maio de 2011,

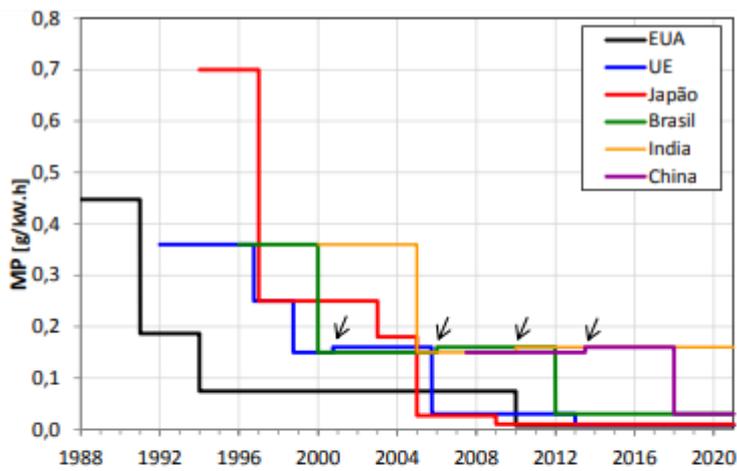
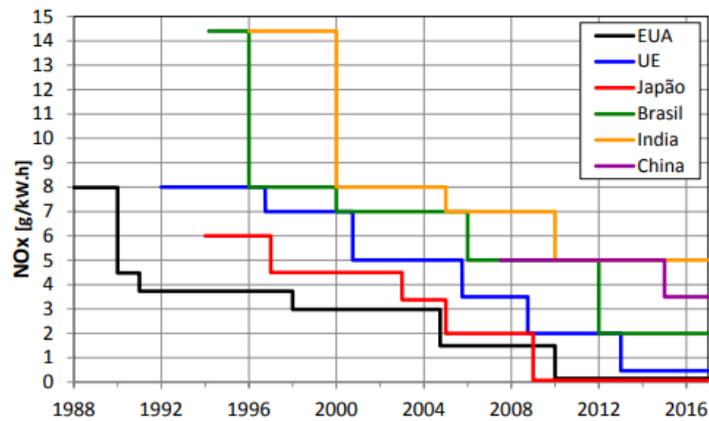
cujos novos preceitos entraram em vigor a partir de 2013 para os modelos novos e em 2014 para todos os veículos novos.

Dada a prática exercitada pelo PROCONVE de seguir a regulação Europeia com algum atraso, tudo leva a crer que o Brasil em futuro próximo, poderá vir a instituir novas fases do seu programa, tendo como base a fase EURO VI. O Regulamento CE nº 595/2009, que estabeleceu o padrão EURO VI considera que ao estabelecer normas para as emissões, é importante ter em conta as repercussões para a competitividade dos mercados e dos fabricantes, os custos diretos e indiretos impostos às empresas e os benefícios decorrentes em termos de incentivo à inovação, de melhoria da qualidade do ar, de redução das despesas com a saúde e de maior esperança de vida. (INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE, 2015)

Assim, as principais metas da implantação de uma regulamentação nacional baseada no padrão vigente na Europa hoje seriam: melhorar a qualidade do ar e, conseqüentemente, dar maior qualidade e esperança de vida a população dos grandes centros; e reduzir as despesas associadas a saúde pública. Outros benefícios difíceis de serem quantificados estariam na preservação do meio ambiente, nos ganhos com inovação tecnológica e competitividade da indústria automotiva aqui instalada, e, potencialmente, a redução das emissões de gases de efeito estufa. Por outro lado, sua implantação envolve questões como potenciais aumentos nos custos de transporte de cargas e passageiros, suposto maior custo operacional dos veículos com implicações no aumento de tarifa do transporte público, competitividade de produtos brasileiros no mercado internacional, e correspondentes impactos no desenvolvimento econômico e no bem estar social - questões que se apresentam relevantes dada a forte dependência do país do transporte rodoviário. Esses são apenas alguns dos pontos a serem considerados na construção da narrativa para justificar a ação do poder público e da indústria automotiva, e o custo que a sociedade terá que arcar devido à implantação de um novo regulamento. Levando isso em conta, é oportuno não somente analisar as condições para adotar uma possível nova fase do PROCONVE, mas também, aproveitar esse momento para avaliar se as fases anteriores – em especial a P7 - estão sendo eficazes no cumprimento das metas do Programa.

A evolução de regulamentações similares em outros países, em princípio, vem estabelecendo não somente limites cada vez mais rigorosos para poluentes tóxicos a serem atendidos nos ensaios de homologação, mas também, mecanismos e procedimentos técnicos mais aperfeiçoados visando, principalmente, as emissões durante o uso dos veículos. Além disso, como será visto adiante, tais regulamentações estão se mesclando com outras relativas à emissão de gases de efeito estufa (GEE). Os aperfeiçoamentos referentes estritamente às emissões tóxicas envolvem:

Segundo o INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (2014) A evolução dos limites de emissões dos poluentes mais críticos e difíceis de serem atingidos por motores ciclo Diesel (NO_x e MP), são apresentados na Figura 5-9 para alguns países. É importante destacar que os procedimentos de medição dos EUA e Japão diferem dos demais países e, rigorosamente, não podem ser diretamente comparados. Além disso, alguns se referem a medições realizadas com os motores operando em regime estacionário e outros em regime transiente. Visando esta comparação foram utilizados preferencialmente os limites relativos aos ensaios em regimes transientes, mais representativos, mas o único país que o utiliza desde o princípio é os EUA. Os demais, no início, utilizavam exclusivamente ensaios estacionários. Como consequência, é possível observar nos gráficos relacionados à evolução do MP, indicados por meio de setas, um aparente crescimento dos limites ao longo do tempo. Mas isso é decorrente da transição de procedimentos de ensaios em regime estacionário para regime transiente. Esse crescimento, de fato, não existe, porque a emissão de MP é muito mais crítica em regime transiente. Destaque-se ainda que a Índia antecipou a implantação do padrão EURO IV e a China possivelmente antecipará o padrão EURO V especificamente nas regiões metropolitanas com problemas mais agudos de poluição. Ainda quanto às datas, cabe destacar que as diferentes fontes de informação podem usar diferentes valores, dependendo de como é considerado o "*phase-in*".



detalhe ↓

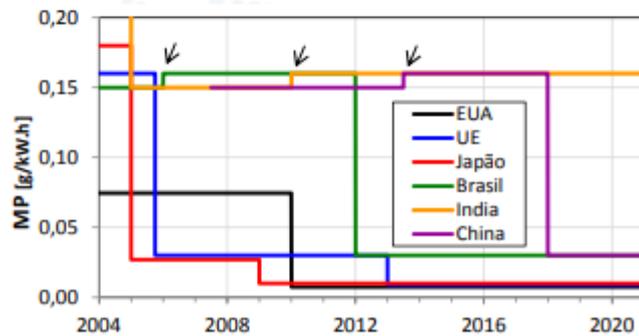


Figura 5-9 - Evolução dos limites de emissão de NOx e MP em motores de combustão interna em diferentes países

Fonte: (INSTITUTO DE ENGENHARIA E MEIO AMBIENTE, 2015)

A evolução dos limites nacionais confrontados aos da União Europeia, na qual a legislação brasileira se baseia, é também apresentada na Tabela 5-12.

Tabela 5-12 - Evolução dos limites de emissão de poluentes no Brasil - Baseado na legislação europeia.

EU ⁽¹⁾		Brasil		Procedim. de ensaio	CO	HC	NMHC ⁽²⁾	CH4 ⁽²⁾	NOX	MP	NH3	NP
Fase	Ano	Fase	Caminhão		g/kWh					ppm	nº/kWh	
-	-	P-1	1989	NBR 7026/7027	Somente índice de fumaça (teor de fuligem)							
Euro 0	1988	P-2	1994/1996	ECE R49	11,2	2,4	-	-	14,4	-	-	-
Euro I	1991	P-3	1996/2000	ECE R50	4,5	1,1	-	-	8	0,36	-	-
Euro II	1996	P-4	2000/2002	ECE R51	4	1,1	-	-	7	0,15	-	-
Euro III	2000	P-5	2005/2006	ESC ⁽³⁾	2,1	0,66	-	-	5	0,1	-	-
				ETC ⁽⁴⁾	5,45	-	0,78	1,6	5	0,16	-	-
Euro IV	2005	P-6	2009	ESC	1,5	0,46	-	-	3,5	0,02	25	-
				ETC	4	-	0,55	1,1	3,5	0,03	-	-
Euro V	2008	P-7	2012	ESC	1,5	0,46	-	-	2	0,02	25	-
				ETC	4	-	0,55	1,1	2	0,03	-	-
Euro VI	2014	P-8	?	WHSC ⁽⁵⁾	1,5	0,13	-	-	0,4	0,01	10	8,0X10 ¹¹
				WHTC ⁽⁶⁾	4	-	0,16	0,5	0,46	0,01	-	8,0X10 ¹¹

(1) União Europeia.

(2) Aplicável a motores ciclo Otto.

(3) Sigla em inglês de Ciclo Estacionário Europeu.

(4) Sigla em inglês de Ciclo Transiente Europeu.

(5) Sigla em inglês de Ciclo Estacionário Harmonizado Mundial.

(6) Sigla em inglês de Ciclo Transiente Harmonizado Mundial.

Fonte: (INSTITUTO DE ENGENHARIA E MEIO AMBIENTE, 2015)

Os fatores de emissão de poluentes em função da distância percorrida pelo meio de transporte, de acordo com cada fase de implantação dos limites de emissão pelo PROCONVE, para caminhões pesados (*Heavy Duty*) são apresentados na Tabela 5-13.

Tabela 5-13 - Fatores de emissão de CO, NO_x, HC e MP para motores diesel equipados em caminhões tipo *Heavy Duty*

Fase do PROCONVE	CO	NO_x	HC	MP
	g/km	g/km	g/km	g/km
Pré-Proconve, P1 e P2	2,21	0,81	12,73	0,785
P3	1,99	0,66	8,04	0,391
P4	1,08	0,37	7,85	0,153
P5	1,01	0,19	5,68	0,095
P7	1,06	0,20	2,30	0,023

Fonte: (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2011)

Assim, o inventário de emissões no sistema de transporte do óleo vegetal em etapas terrestres será feito com base na regulamentação de emissões disponibilizadas pelo PROCONVE. As emissões no transporte marítimo foram feitas utilizando-se a base de dados Ecoinvent 3.0, disponível na biblioteca do software SimaPro 9.

5.5 Ciclo de Vida do Etanol Hidratado e Diesel

Devido ao seu amplo estudo, dados de desempenho ambiental tanto do Etanol Hidratado, quanto do Diesel, foram obtidos dados a partir de dados secundários, como a base de dados do SimaPro 9 Agrofootprint e Ecoinvent.

5.6 Delimitação do Estudo

A avaliação foi realizada com o auxílio do software Simapro 9, uma importante ferramenta de mensuração dos impactos ambientais de diversos processos. Além disso, os bancos de dados Ecoinvent 3 e Agro-footprin foram usados como dados de inventário complementar e o ReCiPe 2016 Midpoint (E) foi usado como método de cálculo dos impactos. O motor tem uma potência máxima de 7,1 kW a 3600 rpm e um torque máximo de 27 Nm a 2800 rpm. O óleo vegetal utilizado na operação foi considerado produzido a partir do óleo de palma e óleo de soja, cultivados no estado do Pará e Mato Grosso, respectivamente, e são algumas das matérias-primas utilizadas pela Neste Oil, O hidrotratamento foi considerado realizado pela Neste Oil, em Porvoo, Finlândia. A Figura 5-10 mostra a delimitação da ACV,

identificando as etapas do processo, suas entradas de material e energia e suas saídas. As categorias de impacto consideradas neste estudo foram potenciais de aquecimento global (GWP), potencial de acidificação (AP), Formação de Ozônio, Consumo de Recursos Fósseis, Consumo de Água e Eutrofização Marinha e de Água Doce.

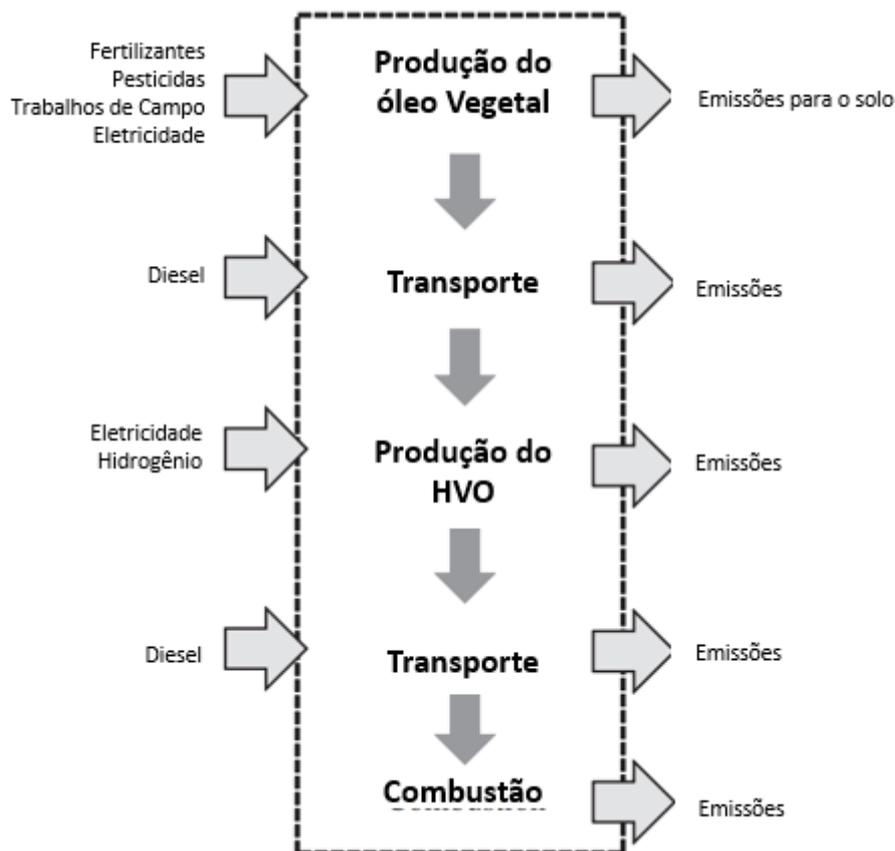


Figura 5-10 – Processos englobados no ciclo de Vida do HVO [Arvidsson (2011)]

5.6.1 Cultivo e Extração do Óleo Vegetal

5.6.1.1 Óleo de Palma

Os dados utilizados para a etapa de plantio e cultivo do dendê foram utilizados principalmente de EPE (2005), Costa (2007), Mekhilef, Siga E Saidur (2011) e Carvalho (2015). Segundo Mekhilef, Siga E Saidur (2011), o óleo de palma é uma das matérias-primas para a produção de biocombustíveis com maior perspectiva, se comparado às demais oleaginosas. O óleo de palma tem maior rendimento de produção e menos fertilizantes, água e

pesticidas são necessários para o plantio. A produção de óleo de palma requer menos luz solar, em termos de balanço energético para produzir uma unidade de óleo, pois produz mais óleo por hectare. Segundo a EPE (2005), a vida útil estimada da palma é de 27 anos. A produtividade média anual é de 15 toneladas de cachos por hectare por ano e a produção de frutas ocorre em até quatro anos após o plantio. Costa (2007) cita que após a colheita, os frutos são transportados para a unidade de beneficiamento, onde serão esterilizados e cozidos. Em seguida, os frutos são macerados e prensados em um digestor, de onde é retirado o óleo do mesocarpo carnudo do cacho. O óleo cru obtido da prensagem é transferido para um desaerador, onde as partículas pesadas são removidas e depois clarificadas para remover a umidade e as impurezas. As amêndoas dos frutos da palma são quebradas e laminadas por um rolo laminador. A pasta produzida na laminação é cozida e prensada. O óleo cru (palmiste) é filtrado no filtro-prensa e, em seguida, transferido para o tanque de armazenamento, extraído mecanicamente ou por solvente. Segundo Arvidsson (2011), é possível obter anualmente 4.220 kg/ha de óleo vegetal com o cultivo da palma. Para equipamentos motorizados em cultivo, como tratores e caminhões, o diesel fóssil foi considerado como combustível.

5.6.1.2 Óleo de Soja

Os dados utilizados para o inventário de cultivo e extração do óleo de soja foram utilizados principalmente de Sheehan (1998), Dorsa (2004), Altamirano (2013) e Tomadon Júnior, Ugaia E Gimenes (2017). A soja é uma oleaginosa de importância internacional devido à sua demanda de proteína, óleo comestível e à produção de biodiesel. No Brasil, a área total de produção de soja, na safra 2020/2021, foi de 38,502 milhões hectares (CONAB, 2021) com produtividade média de 3517 kg/ha do grão. A produção de soja pode ocorrer de diferentes maneiras, dependendo do uso de produtos químicos e sistema de gestão. O mais adotado pelos agricultores brasileiros é a agricultura química e herbicida, que consiste na aplicação de pesticidas como estratégia de combate a pragas no campo (EMBRAPA, 2011). A extração do óleo de soja passa por algumas etapas, como cita Dorsa (2004), recebimento e pré-limpeza, secagem e preparação e em seguida serão submetidos ao processo de extração do óleo.

5.6.2 Transporte do Óleo Vegetal

5.6.2.1 Transporte do Óleo de Palma

A etapa de cultivo e extração de óleo vegetal foi considerada realizada no estado brasileiro do Pará, maior produtor de palma do país e onde está localizada a Abrapalma, maior produtora de óleo de palma do Brasil. Transporte terrestre até o Porto de Belém em caminhões pesados com reboques, utilizando um ciclo operacional baseado na norma europeia de emissões Euro IV. Os caminhões são do tipo *Heavy Duty*, com carga máxima de 40 toneladas e o consumo de diesel considerado é de 4,9 l por 10 km. A distância é de aproximadamente 200km. No porto, o óleo é transferido para o cargueiro e transportado para Porvoo, na Finlândia, onde ocorrerá a produção de HVO, com uma distância de 9.820km. O transporte do porto para o complexo industrial da Neste Oil é feito por oleodutos.

5.6.2.2 Transporte do Óleo de Soja

A etapa de cultivo e extração de óleo vegetal foi considerada realizada no estado brasileiro de Mato Grosso, maior produtor de soja no país. Transporte terrestre até o Porto de Belém em caminhões pesados com reboques, utilizando um ciclo operacional baseado na norma europeia de emissões Euro IV. Os caminhões são do tipo *Heavy Duty*, com carga máxima de 40 toneladas e o consumo de diesel considerado é de 4,9 l por 10 km. A distância é de aproximadamente 2700km. No porto, o óleo é transferido para o cargueiro e transportado para Porvoo, na Finlândia, onde ocorrerá a produção de HVO, com uma distância de 9.820km. O transporte do porto para o complexo industrial da Neste Oil é feito por oleodutos.

5.6.3 Produção do HVO

A produção do HVO passa por diferentes etapas, sendo as principais a produção do hidrogênio utilizado no hidrotreatamento, o hidrotreatamento dos triglicerídeos, a isomerização das cadeias parafínicas obtidas e a combustão do propano obtido no processo. A produção de hidrogênio geralmente é realizada em um reformador a vapor, onde água e gás natural são misturados e reagem para formar hidrogênio e monóxido de carbono, conforme explicado por Nikander (2008). Depois, há o hidrotreatamento, etapa em que ocorre a produção do biocombustível HVO. Para produzir 1000 kg de diesel verde, são necessários 1191 kg de óleo

vegetal e 42 kg de hidrogênio. Neste estudo, considerou-se que os processos envolvendo a produção do HVO não são alterados com a utilização do óleo bruto de soja ou de palma.

De acordo com Lorenzi et al. (2020), as reações de hidrotratamento devem ocorrer frequentemente entre 300 e 450°C e o hidrogênio deve estar em uma condição de pressão entre 3 e 20 MPa. A reação ocorre em algumas etapas principais, que são descarboxilação, descarbonilação e desoxigenação. Na Figura 5-11 exemplifica-se o processo de hidrotratamento da molécula de trioleína, que é um dos compostos presentes no óleo de palma.

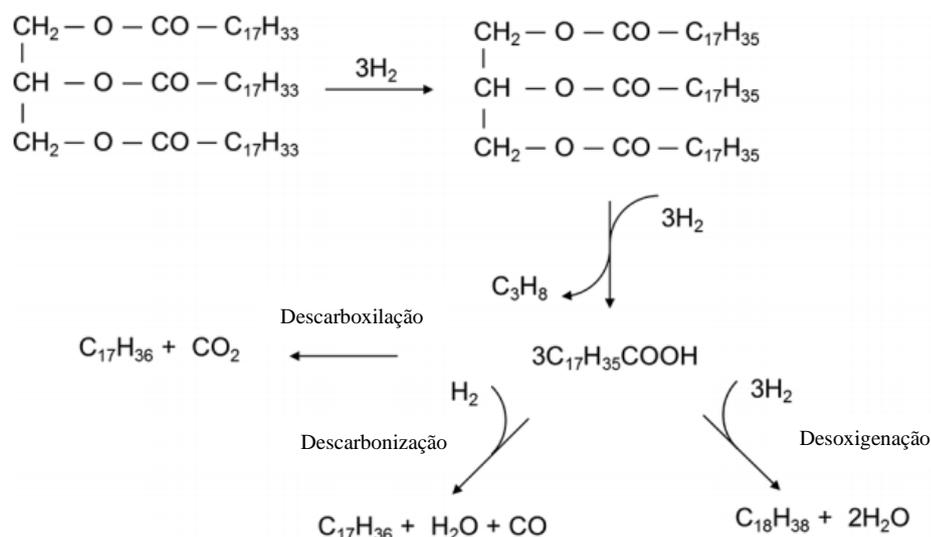


Figura 5-11 – Processo de hidrogenação da molécula de trioleína produzindo heptadecano, octadecano, propano, água, monóxido de carbono e dióxido de carbono [LORENZI et al. (2020)]

5.6.4 Transporte do HVO

Da planta de produção em Porvoo, o HVO é transportado por oleoduto até o porto e transportado por navio até o Porto de Santos, Brasil, cobrindo uma distância de 11.371 km. A carga será então transferida para caminhões pesados, utilizando um ciclo operacional baseado no padrão europeu de emissões Euro IV. Os caminhões são do tipo *Heavy Duty*, com carga máxima de 40 toneladas e o consumo de diesel considerado é de 4,9 l por 10 km. A distância até o destino final é de 350km.

5.6.5 Combustão do HVO

As emissões provenientes da combustão do biocombustível foram obtidas por meio de testes em motor monocilíndrico de combustão interna com ignição por compressão, operando em regime de geração de energia, localizado no Laboratório de Máquinas Térmicas (LMT) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Seguindo as orientações da norma ISO 8178, que regulamenta os testes de emissões em motores diesel em aplicações de geração de energia, foi adotado o funcionamento do motor a 1800 rpm e carga operacional de 10Nm 50% da carga máxima para a velocidade selecionada. A rotação escolhida devido ao fato da frequência da energia elétrica disponível na rede elétrica brasileira ser de 60 Hz e, portanto, o acoplamento do motor com o gerador pode ser feito diretamente.

Este estudo não realiza a análise de sensibilidade do Ciclo de Vida do HVO. A análise de sensibilidade tem como objetivo avaliar o impacto que variações nas quantidades utilizadas no inventário têm no resultado final, em cada categoria estudada. A análise de sensibilidade fica como recomendação para estudos futuros.

6 RESULTADOS

6.1 Análise Experimental

A análise de emissões indicou que o uso do combustível renovável puro (HVO) em vez do diesel tem o potencial de diminuir NO_x, CO, CO₂, HC não queimado e material particulado, o que está de acordo com estudos publicados anteriormente [DIMITRADIS *et al.*, 2019; COSTA *et al.*, 2021; PARRAVACINI, BARRO E BOULOUCHOS, 2021;]. Conforme Dimitradis *et al.* (2018), a ausência de oxigênio e aromáticos no HVO evitam a formação de NO_x, uma vez que compostos aromáticos têm temperatura de chama adiabática mais alta produzindo temperaturas de combustão locais mais altas. O HVO também pode reduzir a emissão de HC e material particulado devido ao alto número de cetano, conteúdo aromático nulo, maior razão de H/C, não possuir conteúdo de enxofre e outras impurezas minerais que são responsáveis pela emissão de material particulado.

Para ambos os combustíveis testados, as emissões de NO_x – Figura 6-1 - diminuíram durante a operação *Dual-Fuel* com o bioetanol. Esse efeito indica uma temperatura potencialmente mais baixa no cilindro devido à injeção de etanol no pórtico de admissão, o que melhora a combustão pré-misturada e elimina regiões de alta temperatura na câmara de combustão. Nesse sentido, a redução de NO_x relatada por Pedrozo *et al.* (2018) para o *Dual-Fuel* diesel-etanol também pode ser observado para o combustível renovável utilizado no presente estudo. Na taxa de substituição máxima do etanol (aproximadamente 45%), ambos combustíveis apresentaram as emissões mínimas de NO_x, o que se deve a uma intensificação do já discutido efeito da redução da temperatura. A vaporização do etanol também pode diminuir a pressão e a temperatura final da compressão, o que também contribui para reduzir as emissões de NO_x, conforme discutido por Asad, Divekar e Zheng (2021).

Conforme observado para as emissões de NO_x, a emissão de CO – Figura 6-2 - foi menor para o diesel renovável quando comparado ao diesel fóssil, indicando uma combustão mais completa. Esse comportamento pode ser explicado pelo menor C/H e maior número de cetano no HVO. Conforme já relatado por Pedrozo *et al.* (2018), a operação bicomcombustível do etanol aumenta o CO em comparação à combustão do diesel convencional, principalmente para cargas parciais, e o presente estudo indicou que o mesmo efeito é observado para HVO. A operação com duplo combustível não alterou significativamente as emissões de CO para baixas taxas de substituição (até 28%), mas apresentou um aumento repentino após este ponto, que

pode ser associado ao menor PCI do etanol. Além disso, o aumento repentino de CO após uma certa taxa de substituição pode indicar uma saturação na mistura de etanol-ar, após a qual a combustão pré-misturada não pode ser aumentada ainda mais. Por fim, a mesma tendência observada para as emissões de CO também foi reportada para os hidrocarbonetos não queimados, Figura 6-3, que também está associada à combustão menos completa para maiores taxas de substituição do etanol.

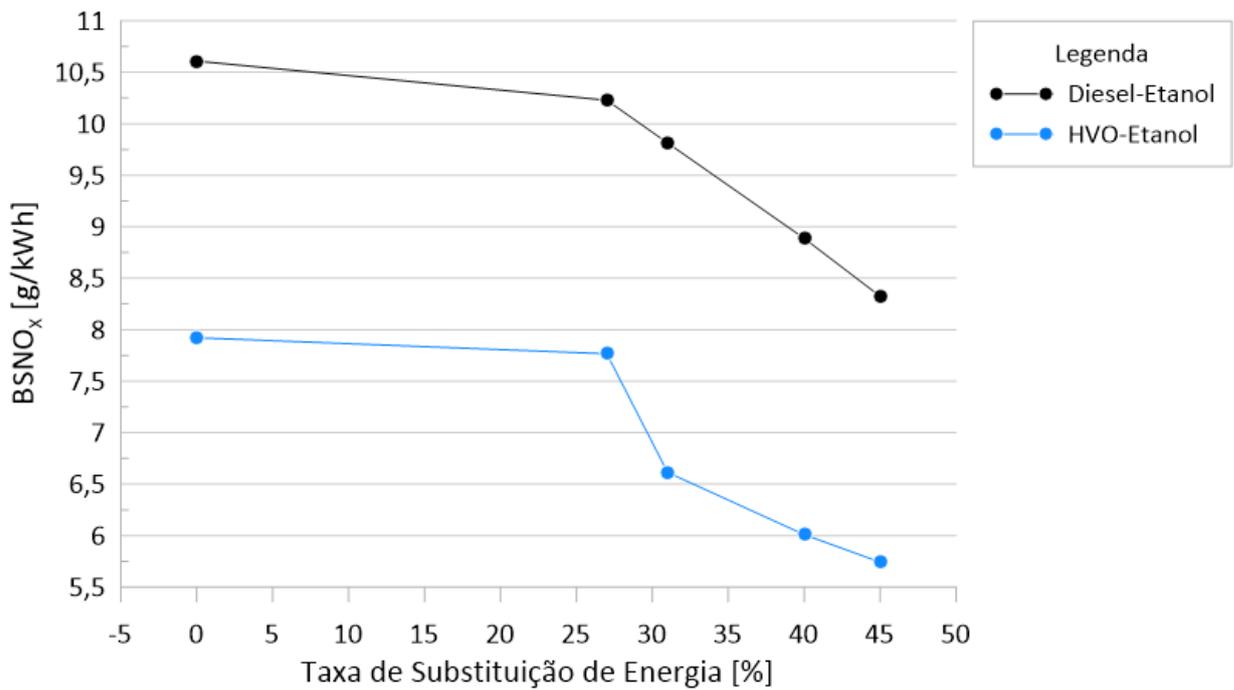


Figura 6-1- Emissões Específicas de NO_x na operação Dual-Fuel

Fonte: Próprio Autor

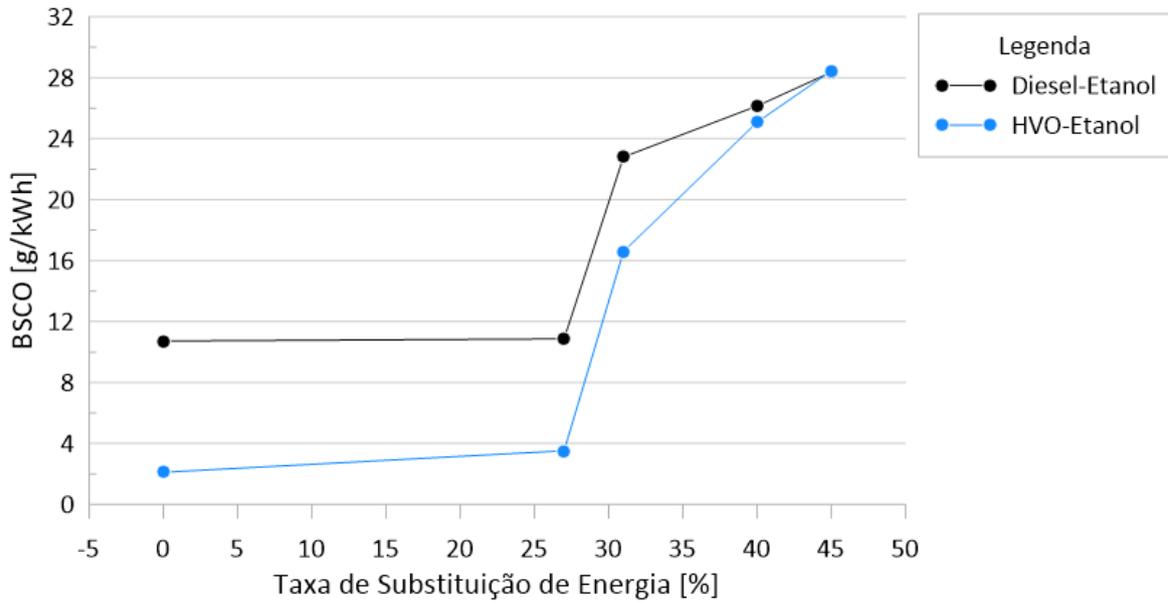


Figura 6-2- Emissões Específicas de CO na operação Dual-Fuel

Fonte: Próprio Autor

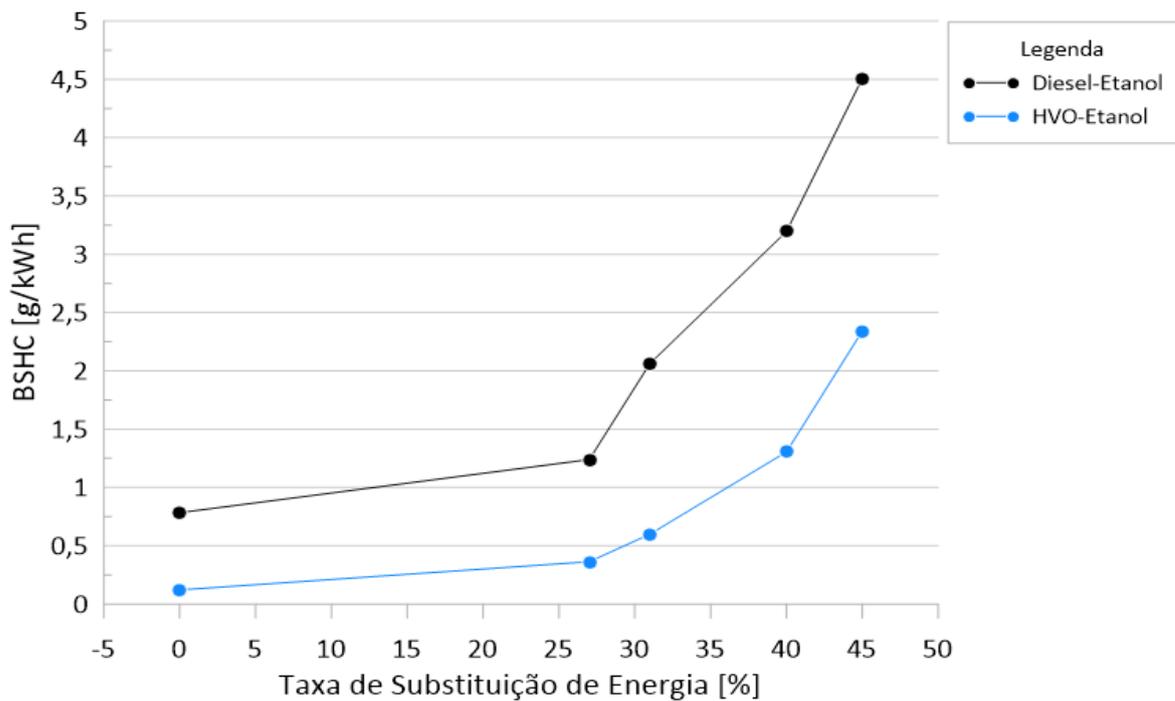


Figura 6-3- Emissões Específicas de HC na operação Dual-Fuel

Fonte: Próprio Autor

Para baixas taxas de substituição do etanol, as emissões de CO₂ – Figura 6-4 - foram bastante afetadas pela relação C/H: o diesel fóssil (H/C = 6,50) apresentou as maiores emissões, enquanto o HVO (H/C = 5,67) apresentou os menores valores. À medida que mais etanol era injetado no pórtrico de admissão, as emissões de CO₂ diminuíram, indicando uma combustão menos completa, conforme já discutido para as emissões de CO. Ao mesmo tempo, a diferença

entre o diesel fóssil e o renovável também diminuiu para maiores taxas de substituição, o que se justifica pela maior influência do etanol na relação H/C de cada mistura. A alta covariância para a taxa máxima de substituição de etanol pode justificar o aumento inesperado nas emissões de CO₂ para o HVO para frações de etanol / diesel de 45%. Esse resultado destaca que, quando grandes quantidades de etanol são utilizadas na combustão dual, os parâmetros do motor, como o tempo de injeção, devem ser ajustados para compensar o aumento do atraso de ignição causado pela combustão do etanol (ASAD, DIVEKAR E ZHENG, 2021).

De maneira semelhante, observa-se, na Figura 6-5, a redução da emissão de MP para a operação Dual-Fuel, Conforme Rodríguez-Fernández, Hernández e Sánchez-Valdepeñas (2016), a molécula de oxigênio presente na composição do etanol hidratado promove a melhor oxidação dos componentes presentes no combustível formadores de fuligem. Também, a ausência de compostos aromáticos na composição do biocombustível promove redução da emissão de material particulado.

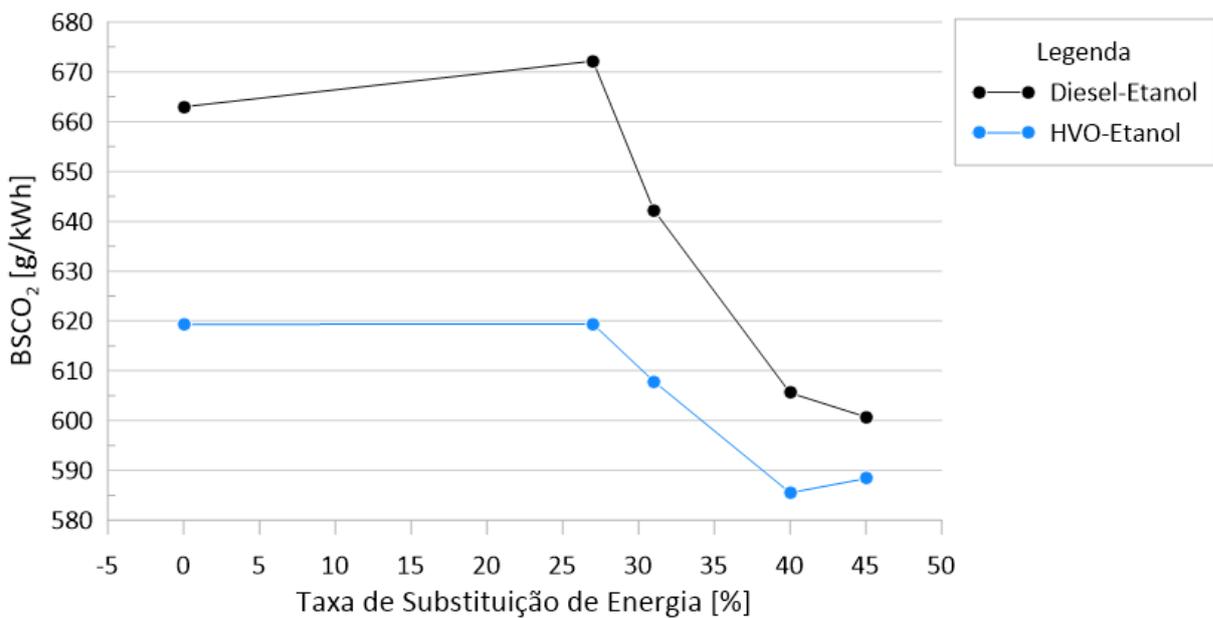


Figura 6-4 - Emissões Específicas de CO₂ na operação Dual-Fuel

Fonte: Próprio Autor

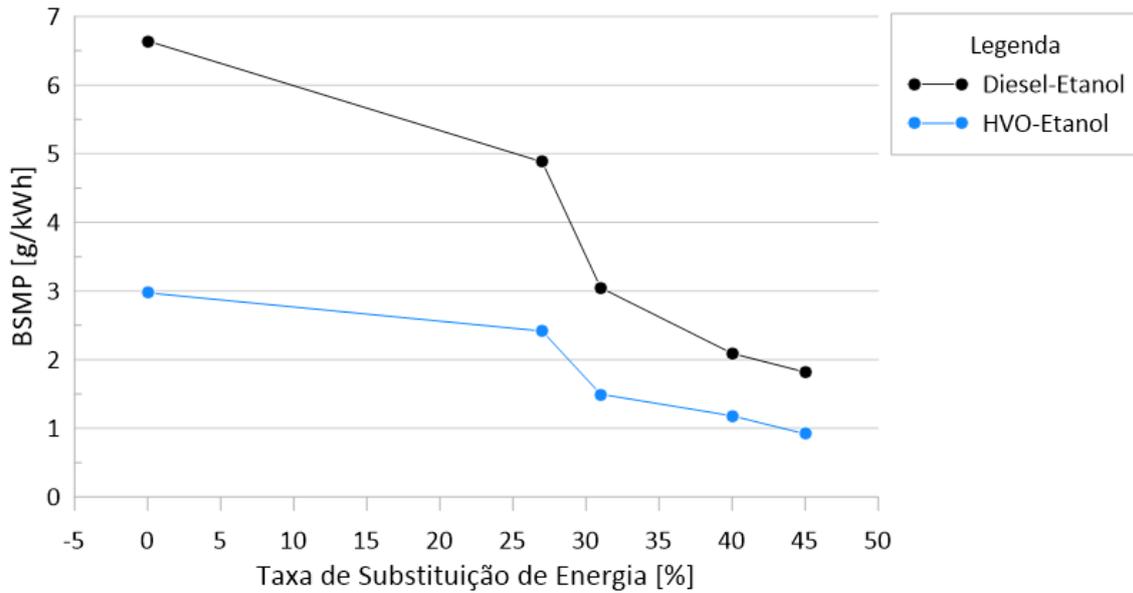


Figura 6-5- Emissões Específicas de MP na operação Dual-Fuel

Fonte: Próprio Autor

Em relação à eficiência do motor, Figura 6-6, o diesel apresentou os valores mais baixos para todas as condições. Com o aumento da taxa de substituição do etanol, ambos os combustíveis apresentaram comportamento quase linear, com eficiência diminuindo para fluxos maiores de etanol. A operação *Dual-Fuel* apresentou valores de eficiência que diminuiriam à medida que mais etanol era injetado, com cerca de 2% de redução para o HVO-Etanol e 1% de redução para o Diesel-Etanol.

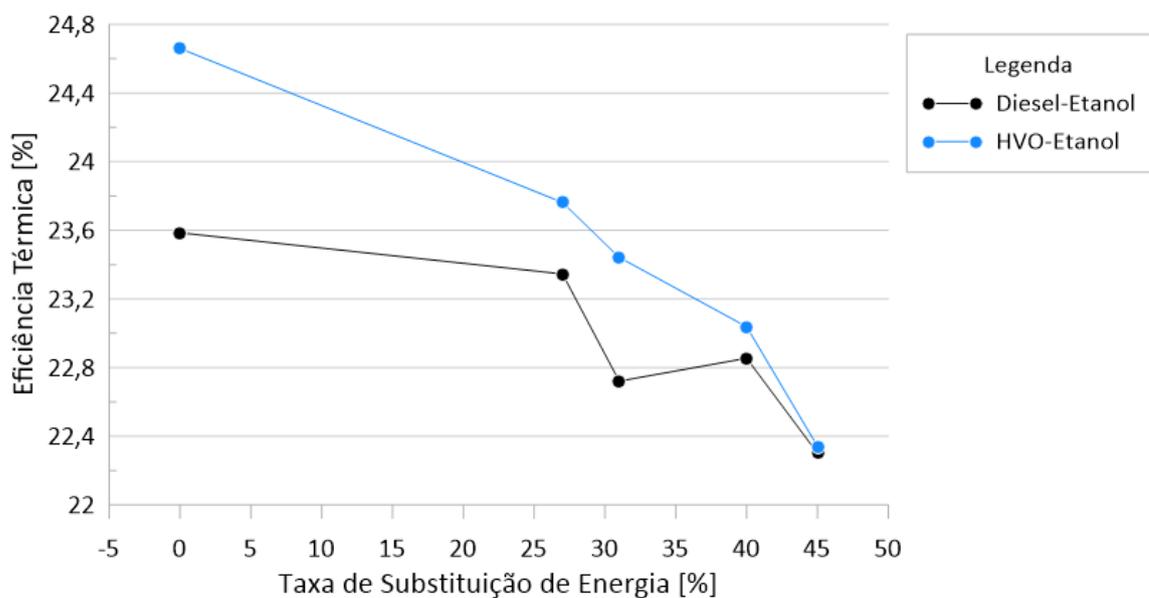


Figura 6-6 - Eficiência Térmica do Motor na operação Dual-Fuel

Fonte: Próprio Autor

6.2 Avaliação do Ciclo de Vida – HVO produzido da soja e da Palma

Na Figura 6-7 apresenta-se o GWP do Ciclo de Vida do HVO quando aplicado em modo *single fuel* no motor de combustão interna na geração de energia em pequena escala. É possível verificar as diferentes contribuições de cada processo ao longo da cadeia de produção do combustível parafínico até a aplicação final. De imediato, conforme descrito no inventário, a etapa de transporte marítima tanto do óleo de palma quanto do óleo de soja são exatamente as mesmas. Também, todas as etapas que se dão na usina de HVO – pré-tratamento do óleo vegetal, hidrogenação – o hidrogênio utilizado e a combustão final do HVO são consideradas sob as mesmas circunstâncias. Sendo assim, as etapas de cultivo e extração e transporte terrestre serão diferentes para os dois tipos de biomassa diferentes.

Primeiramente é possível notar maiores contribuições para a categoria principalmente das etapas de cultivo e extração do óleo vegetal e nas etapas de transporte. Tratando-se da etapa de cultivo da Palma, o principal contribuinte para o impacto está concentrado nas emissões feitas no solo necessárias para o plantio da *Árvore da Palma* e na produção dos fertilizantes utilizados nesse processo. O plantio da Palma envolve a retirada de mata nativa da região e sua substituição por um único tipo de planta, que, ao longo de seu período de permanência, não terá a capacidade de reabsorção do CO₂ emitido ao longo do processo equivalente ao da floresta original. As emissões para o solo devido à utilização de fertilizantes também contribuem para este impacto, sendo a utilização de fertilizantes, como o glifosato, grande influenciadora. O mesmo também é válido para o cultivo da soja, porém, observa-se um potencial de aquecimento global cerca de 4 vezes maior quando comparado à palma. Isso se dá pela maior necessidade de utilização de fertilizantes e pesticidas e também pela utilização do hexano como químico do processo de extração do óleo de soja, o que contribui para a elevação do potencial de aquecimento global. Tratando-se das etapas de transporte e de extração do óleo de palma e da soja, a contribuição para o GWP se dá principalmente pela utilização de combustíveis fósseis – majoritariamente o diesel – nos caminhões e navios e nos maquinários utilizados na extração do óleo vegetal. A soja apresenta maior potencial de aquecimento global na etapa de transporte terrestre devido à distância maior percorrida nessa etapa. Na cadeia de produção descrita, o hidrogênio utilizado para o hidrotreamento do óleo vegetal provém da reforma do gás natural e, portanto, existe a emissão de carbono associada à extração deste gás.

A combustão do HVO não gerará impactos quando se trata do GWP. Conforme descrito por Head *et al.* (2021), a utilização de biocombustíveis é vantajosa e indicada devido à capacidade de reabsorção, ao longo do ciclo de vida, do carbono emitido na combustão. Diferente da utilização de combustíveis fósseis, não ocorre a adição de CO₂ que não estava disponível na natureza. No geral, a maior parte das emissões de CO₂ nos processos provém da fabricação de fertilizantes e pesticidas utilizados na etapa de cultivo. Também é importante avaliar os impactos causados pela necessidade de utilização de energia tanto na forma de calor quanto na forma de eletricidade durante o processo de prensagem do óleo de palma. Embora a matriz energética brasileira seja bastante diversificada, a utilização de energia proveniente de fontes não renováveis acaba por influenciar negativamente o processo de produção do biocombustível.

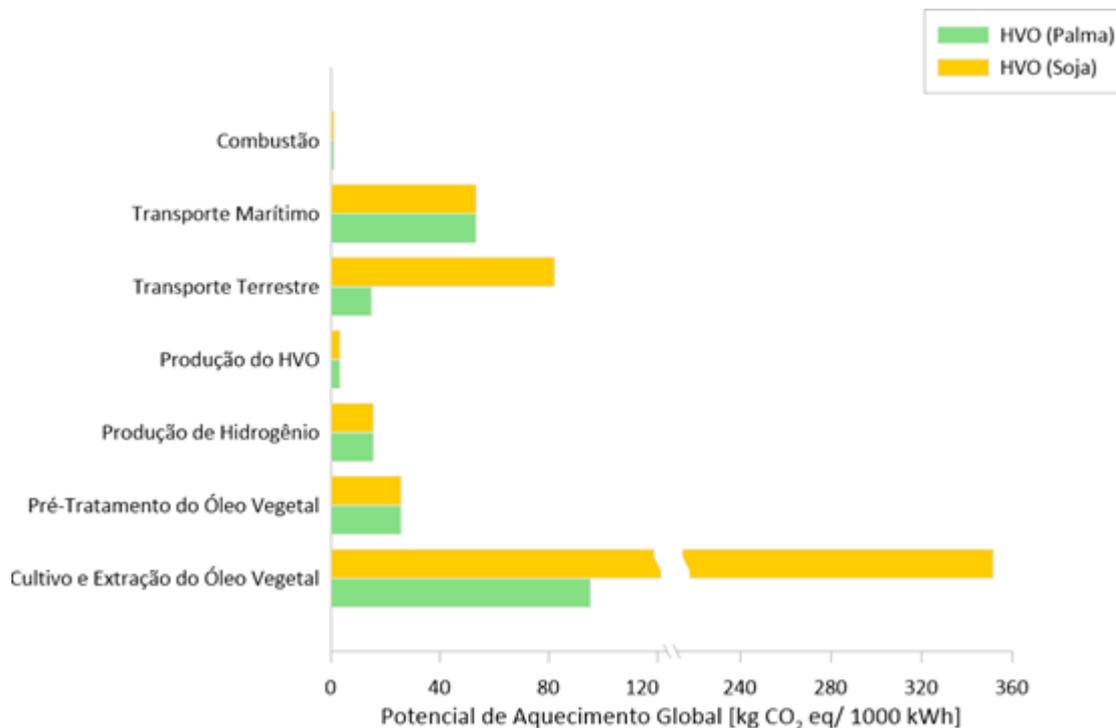


Figura 6-7 - Potencial de Aquecimento Global do HVO produzido a partir do Óleo de Palma e Óleo de Soja na geração de 1000kWh de energia elétrica.

Fonte: Próprio Autor

Na figura 6-8 mostra-se o uso de energia fóssil relacionado a produção de 1000 kWh de energia elétrica a partir da combustão do HVO. Esta categoria de impacto relaciona a quantidade de energia proveniente de fontes não renováveis utilizadas para a conclusão de cada componente de cada processo. Durante o cultivo da palma e da soja, a produção de fertilizantes é responsável por grande parte do impacto, conforme discutido por Arvidsson (2011). O maior

consumo de recursos fósseis por parte do cultivo da soja está relacionado à maior necessidade de utilização de fertilizantes e pesticidas durante o cultivo. Além disso, o uso de diesel nos equipamentos e transportes que ocorrem nesta etapa contribuem para o impacto. Tratando-se da extração do óleo de palma e da soja, a contribuição do processo vem principalmente da utilização de diesel para a operação das máquinas responsáveis pelo pensamento do óleo e também da utilização de energia térmica utilizada no processo de extração do óleo. Conforme citado, no cenário avaliado, o hidrogênio utilizado provém de fontes não renováveis, assim contribui para a maior parcela da utilização de energia fóssil. Outras contribuições do ciclo de vida provêm da utilização de diesel em etapas de transporte, sendo necessária maior utilização de diesel no transporte terrestre dos produtos da soja. O processo de combustão não é contabilizado devido à queima somente do combustível renovável.

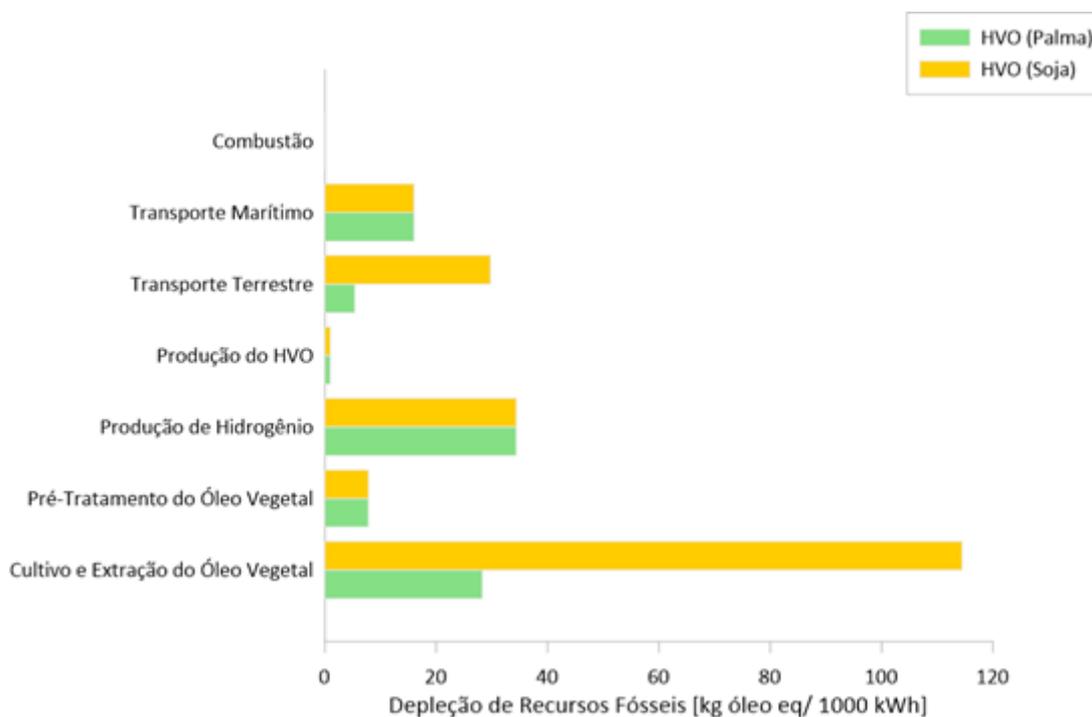


Figura 6-8 - Uso de Energia Fóssil no Ciclo de Vida do HVO produzido a partir do Óleo de Palma e Óleo de Soja na geração de 1000kWh de energia elétrica.

Fonte: Próprio Autor

Na Figura 6-9 mostra-se o potencial de acidificação do Ciclo de Vida do HVO. Esta categoria de impacto reúne e contabiliza a emissão de componentes responsáveis pela formação principalmente da chuva ácida. A priori, a emissão de óxidos de enxofre (SO_x) e óxidos de nitrogênio (NO_x) são responsáveis pela maior contribuição para a categoria analisada. Sendo assim, é possível relacionar principalmente etapas onde existe combustão com o aumento do

impacto. Nota-se que as etapas de combustão, transporte e Cultivo e extração da Palma e soja são as responsáveis pela maior contribuição. A soja apresenta um entrave tratando-se desta categoria de impacto que está relacionado com a utilização de ácido sulfídrico no processo de produção do fertilizante tipo fosfato (P_2O_5). Tratando-se do transporte Terrestre, a implementação das novas regulamentações de emissões, como a Euro VI é promissora na redução principalmente de NO_x , pois como foi mostrado na Tabela 5-12, essa nova regulamentação visa a redução de até cinco vezes na emissão de óxidos de nitrogênio.

Na Figura 6-10 mostra-se a utilização de água relacionada à produção do HVO. Embora seja necessária menor quantidade de água para o cultivo da palma do que a soja, ainda assim existe grande necessidade do recurso durante a etapa de irrigação para ambos, o que acaba gerando maior parte do consumo de água, sendo a depleção do recurso hídrico no cultivo do cereal cerca de 6 vezes maior. A utilização de água na extração do óleo vegetal para ambos está relacionada aos processos necessários para a obtenção do óleo bruto, que envolvem a lavagem para a retirada de impurezas do material. Além disso, o processo de produção do hidrogênio por reforma de vapor necessita de água para que ocorram as reações necessárias para a liberação do gás utilizado no hidrotreatamento.

Na figura 6-11 são mostrados os impactos de eutrofização do ciclo de vida do HVO. Como mencionado anteriormente, a eutrofização está relacionada à inserção de nutrientes na água, a partir de emissões principalmente para o solo. Estes nutrientes serão responsáveis pela elevação da quantidade de matéria orgânica no meio aquático, o que resulta na dificuldade ou impedimento da manutenção da vida aquática local. Observa-se então que nas etapas de cultivo e extração do óleo vegetal para ambas as biomassas acontecem as maiores quantidades de emissões. Na etapa de cultivo, principalmente por conta da utilização de fertilizantes, faz-se necessária a utilização de componentes que possuem nitrogênio e fósforo. Nota-se que a soja possui potencial eutrofizante consideravelmente maior se comparado ao óleo de palma, pois, como indicado anteriormente, faz-se necessária a utilização de uma quantidade maior de insumos na fase agrícola quando comparado ao cultivo da palma. Embora as emissões para o ar também contribuam para a eutrofização, seu impacto é relativamente menor e situações onde ocorrem combustão acabam, no caso estudado, por terem contribuição mínima ou nula, conforme discutido por Arvidson (2011).

De maneira geral, o impacto elevado causado pela soja em praticamente todas as categorias avaliadas, quando comparado à palma, correlaciona-se também com a rotatividade de produção da soja. Segundo EPE (2005), a safra da soja pode alcançar períodos de até 18 meses e em seguida, o processo de cultivo deve ser realizado novamente, implicando na

inserção novamente de nutrientes, pesticidas, herbicidas na etapa de plantio. A palma, por sua vez, possui ciclo de produção de aproximadamente 20 anos. Logo, a necessidade de utilização de recursos durante todo o ciclo produtivo da palma é menor, garantindo assim menor impacto Ambiental ao longo de sua vida.

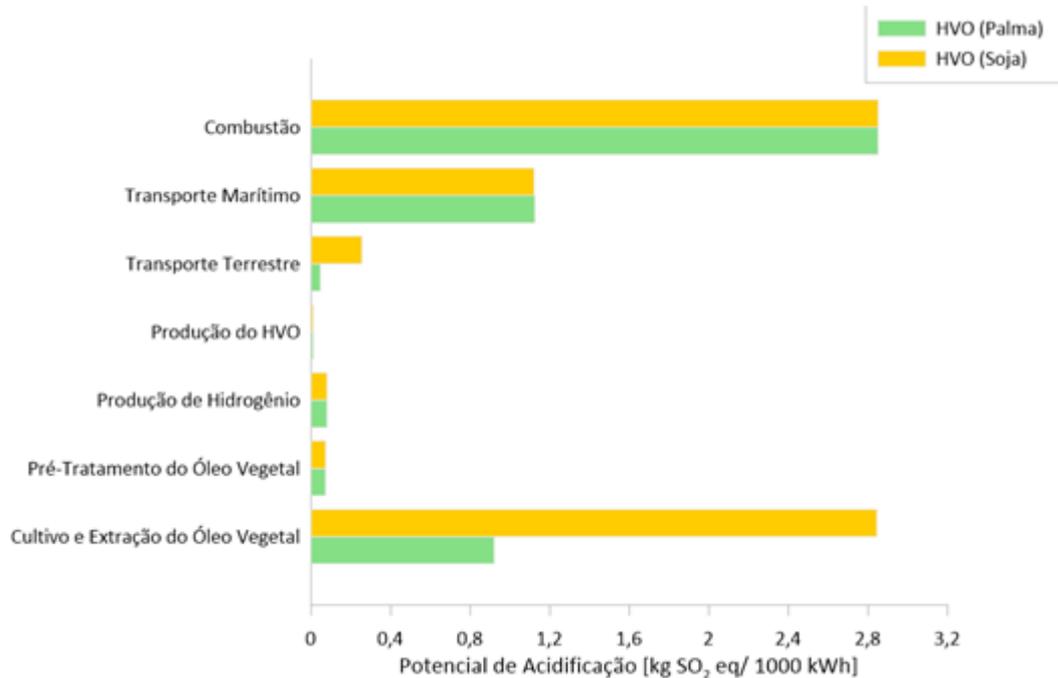


Figura 6-9 - Potencial de Acidificação Ciclo de Vida do HVO produzido a partir do Óleo de Palma e Óleo de Soja na geração de 1000kWh de energia elétrica. I

Fonte: Próprio Autor

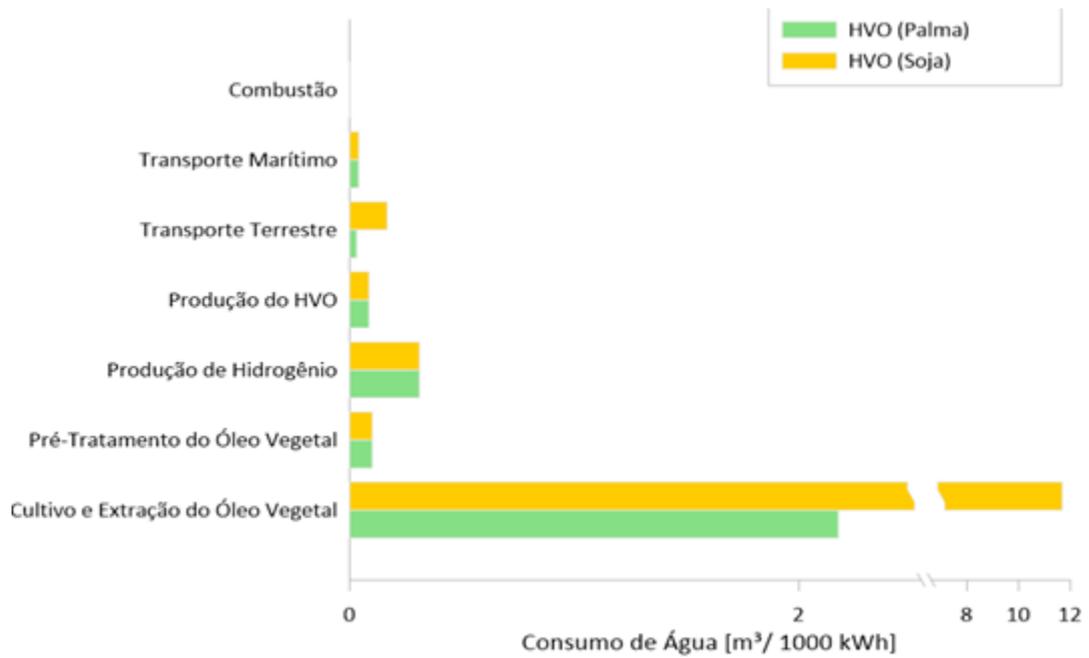


Figura 6-10 - Uso de Água no Ciclo de Vida do HVO produzido a partir do Óleo de Palma e Óleo de Soja na geração de 1000kWh de energia elétrica.

Fonte: Próprio Autor

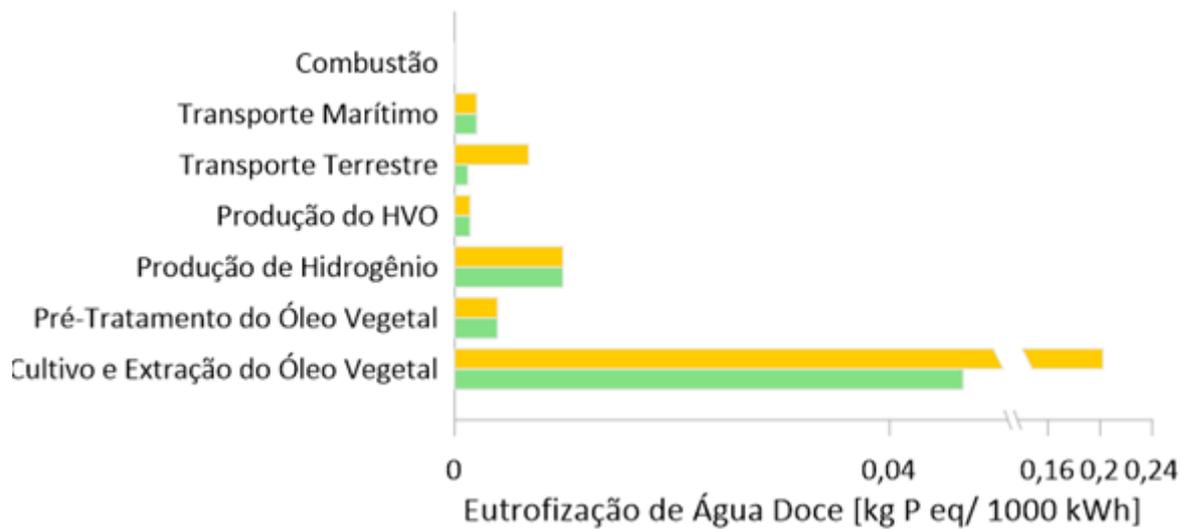
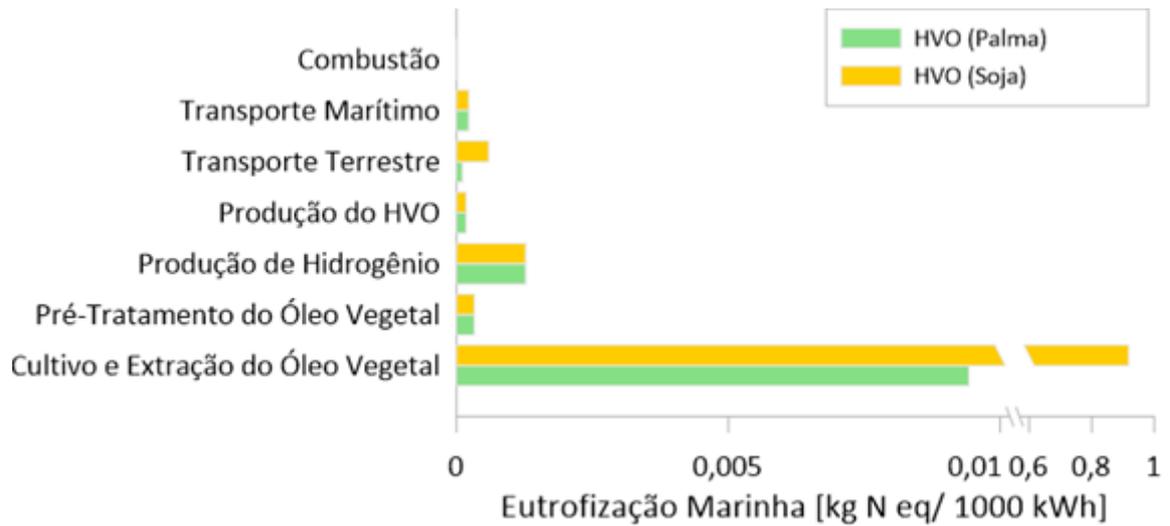


Figura 6-11 - Eutrofização Marinha e Eutrofização de Água Doce no Ciclo de Vida do HVO produzido a partir do Óleo de Palma e Óleo de Soja na geração de 1000 kWh de energia Elétrica

Fonte: Próprio Autor

6.3 Avaliação do Ciclo de Vida – HVO *Dual-Fuel* com Etanol Hidratado e Comparação com o Diesel Fóssil *Dual-Fuel* com Etanol Hidratado

Na figura 6-12 mostra-se a relação entre o GWP do ciclo de vida do HVO puro e como a utilização de etanol hidratado como combustível secundário afeta esta categoria de impacto. Independente da taxa de substituição do combustível, pode-se observar que a utilização do diesel como combustível piloto aumenta de forma severa o GWP da operação. De forma geral, o potencial de aquecimento global avaliado neste estudo é reduzido em 75%. Tal comportamento se dá principalmente pelos benefícios da utilização do biocombustível e a reabsorção do carbono biogênico, conforme cita Head *et al.* (2020). Além disso, a inserção do etanol como combustível secundário promove redução do GWP quando utilizado como combustível de baixa reatividade com o diesel. Essa redução pode ser justificada pela diminuição da emissão de CO₂ com a operação *Dual-Fuel* com o combustível fóssil e também a redução de emissão de NO_x, que conforme mostrado anteriormente, possui elevada colaboração no processo de efeito estufa. Tratando-se do HVO, a inserção do etanol promove redução do GWP e aumentando-se a substituição, observa-se redução da emissão de CO₂ eq na atmosfera. Tomando como base dados de rendimento térmico do motor e o potencial de aquecimento global na operação do HVO-Etanol, é interessante analisar que, para uma taxa de substituição de energia de cerca de 45%, pode-se obter uma redução significativa da quantidade de CO₂ eq emitido à custos de uma redução de aproximadamente 2% da eficiência térmica no motor.

Na figura 6-13 representa-se o uso total de energia fóssil para HVO-Etanol e Diesel-Etanol. Como é de se esperar, devido ao uso do diesel como combustível e devido ao próprio processo de extração do combustível fóssil, o consumo de recursos não-renováveis quando se utiliza o diesel como combustível é maior para todas as taxas de substituição estudadas. Pode-se observar também que quando ocorre a inserção de etanol como combustível secundário, ocorre uma acentuada queda no consumo de recursos fósseis (EF = 27%). Essa queda é explicada principalmente pela redução do consumo de diesel no motor. Além disso, conforme aumenta-se a substituição, percebe-se o decréscimo da energia fóssil total utilizada, que pode ser justificada também pela redução da quantidade de diesel utilizada. Tratando-se do HVO, nota-se que ocorre diminuição da necessidade de recursos fósseis à medida que se aumenta a taxa de substituição. Esse comportamento está relacionado à necessidade, principalmente, da

redução da utilização de hidrogênio no processo de hidrogenação e também com a redução das distâncias percorridas tanto terrestres, quanto marítimas, nas etapas de transporte do HVO.

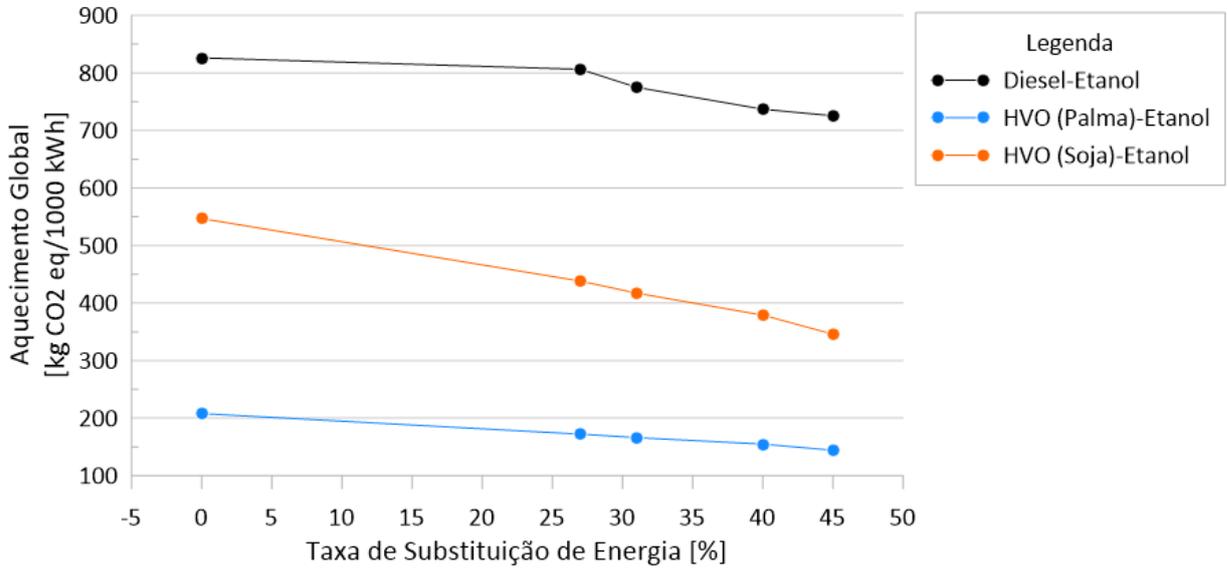


Figura 6-12 - Potencial de Aquecimento Global HVO-Etanol comparado ao Diesel-Etanol

Fonte: Próprio Autor

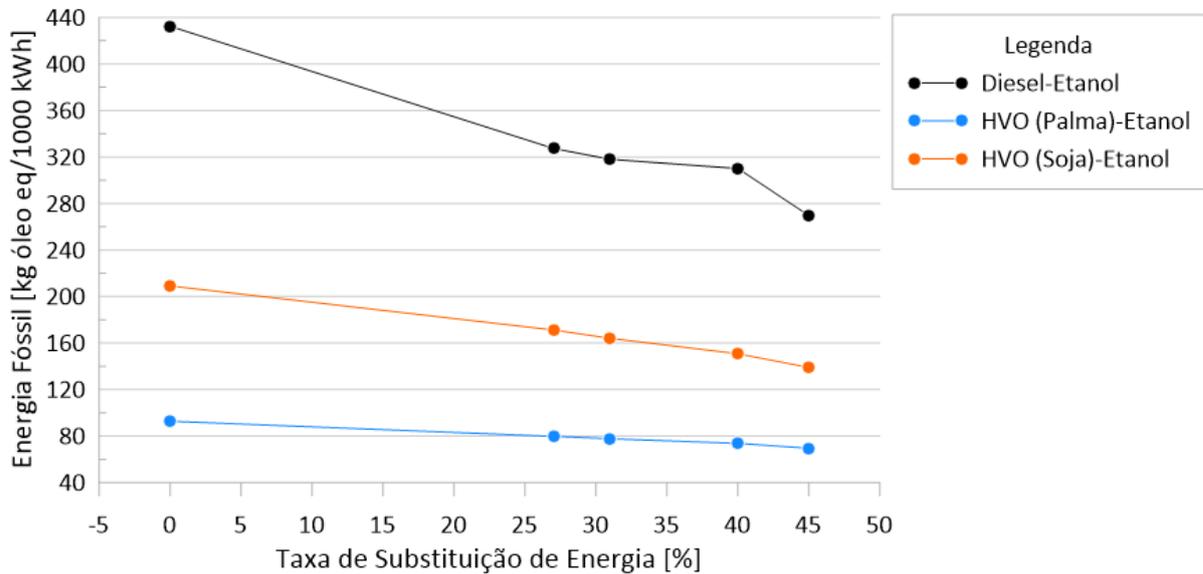


Figura 6-13 - Uso Total de Energia Fóssil - HVO-Etanol comparado ao Diesel-Etanol

Fonte: Próprio Autor

Na figura 6-14 representa-se o potencial de formação de ozônio prejudicial à saúde humana. Este impacto relaciona-se principalmente à emissão de NO_x na atmosfera. Como se obteve na análise experimental, ocorre redução da emissão de NO_x na combustão do HVO e

Diesel para as substituições estudadas, assim, obtém-se o comportamento decrescente à medida em que se aumenta a substituição. Nota-se também que, o biocombustível produzido a partir do óleo de palma possui menor potencial de formação de ozônio se comparado ao HVO produzido a partir da soja, principalmente devido à menor utilização de recursos fósseis e menores distâncias no transporte do óleo de palma. A combustão do HVO emite menos NO_x se comparada à do diesel, justificando o menor potencial de formação de ozônio prejudicial à saúde humana para todas as substituições estudadas, com excesso do HVO produzido a partir da soja, que possui processo de produção com maior emissão de NO_x , conforme já discutido.

Na Figura 6-15 é mostrado o consumo total de água. Nota-se que a medida em que se aumenta a substituição por etanol, aumenta-se o consumo de água. O etanol de cana de açúcar necessita de elevada quantidade de água em seu processo de produção, se comparado tanto ao diesel quanto o HVO, assim aumentando o consumo de água no ciclo de vida. Vale ressaltar que para todos os casos estudados, o HVO necessitará de mais água em seus processos de produção do que o diesel fóssil. Além disso, conforme mostrado anteriormente, a soja necessita de quantidades cerca de 6 vezes maiores de água durante sua produção, relacionadas principalmente ao processo de irrigação, o que justifica o maior consumo de água nas situações estudadas.

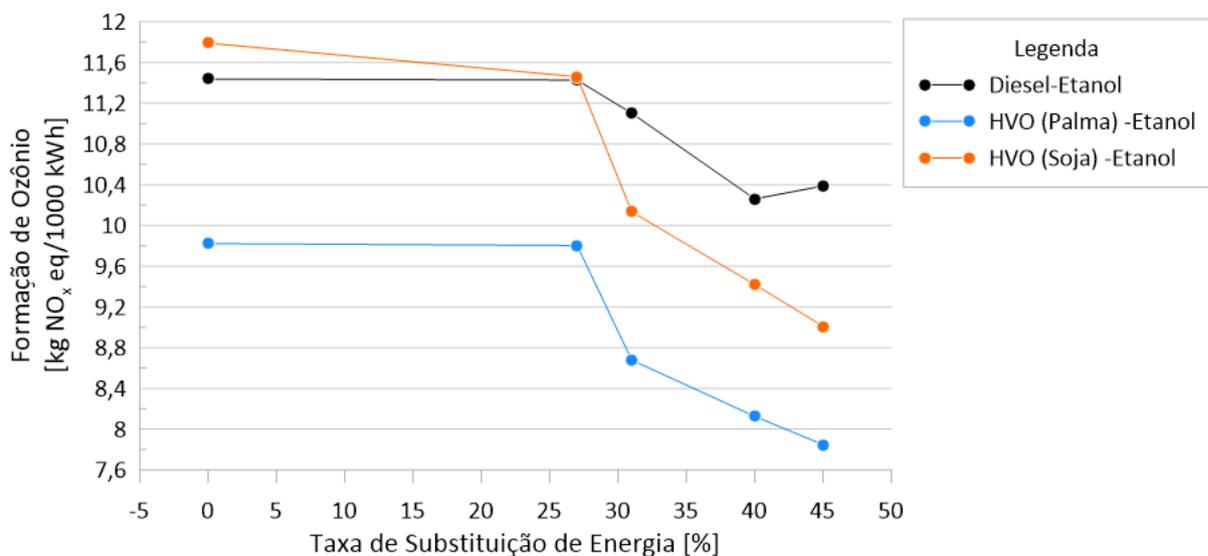


Figura 6-14 - Formação de Ozônio - HVO-Etanol comparado ao Diesel-Etanol

Fonte: Próprio Autor

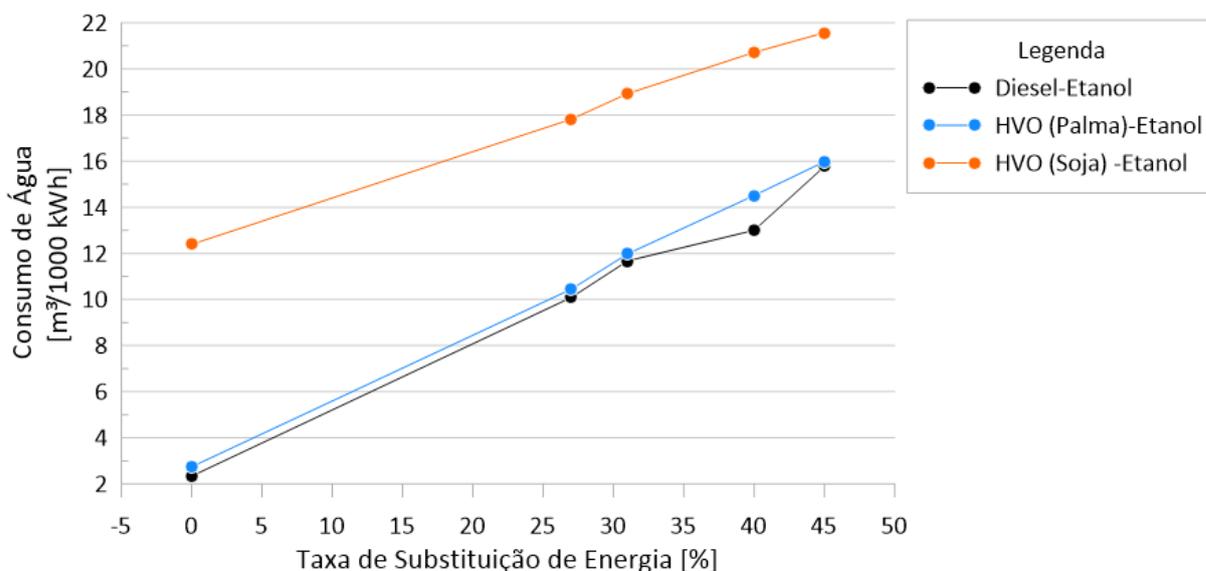


Figura 6-15 - Consumo Total de Água - HVO-Etanol comparado ao Diesel-Etanol

Fonte: Próprio Autor

Na figura 6-16 pode-se observar o potencial de acidificação total dos combustíveis estudados. Esta categoria de impacto relaciona-se com a emissão para o solo, água e ar de componentes que possuem a capacidade de reagir quimicamente e formar ácidos que são prejudiciais ao meio ambiente. Conforme mencionado anteriormente, este processo está relacionado principalmente à emissão de SO_x e NO_x . Segundo Ometto (2005), tratando-se do etanol produzido da cana de açúcar, a queima da cana que ocorre durante sua colheita é a atividade que contribui para a maior parcela da acidificação, sendo a etapa onde ocorre maior emissão de NO_x . No caso da combustão do HVO e diesel percebe-se um aumento da acidificação com a inserção do etanol ($\text{EF} = 27\%$). Conforme resultados de emissões de gases do escapamento mostraram, existe uma acentuada queda na emissão de NO_x quando $\text{EF} = 31\%$, o que explica a redução na acidificação para esta taxa de substituição. Para Substituições maiores que 31%, a acidificação tende a continuar a crescer por conta da emissão de NO_x no processo de colheita da cana de açúcar. De forma similar, o potencial de acidificação do Diesel é maior conforme aumenta-se a taxa de substituição de etanol e as flutuações no comportamento de crescimento da acidificação se dão em função da variação de emissões de NO_x no motor estudado. O HVO produzido a partir da soja possui potencial de acidificação maior que o HVO produzido a partir da palma e também do diesel convencional, conforme mostrado anteriormente, devido principalmente ao maior consumo de recursos fósseis e também pela necessidade de maiores deslocamentos no transporte do óleo bruto de soja.

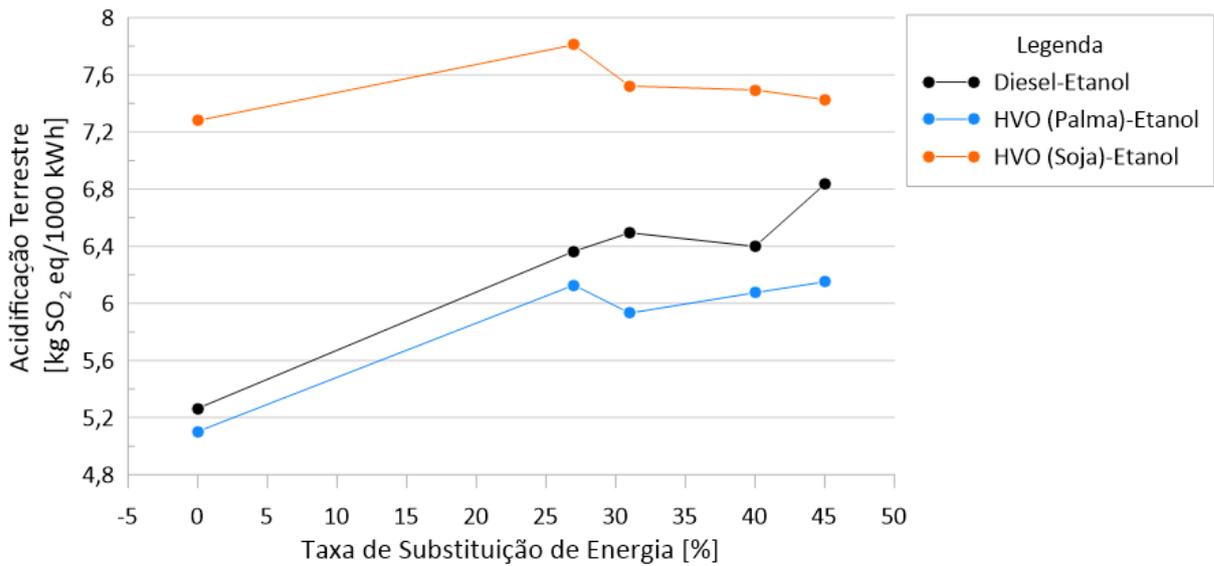


Figura 6-16- Potencial Total de Acidificação - HVO-Etanol comparado ao Diesel-Etanol

Fonte: Próprio Autor

Por fim, na figura 6-17 é mostrado o potencial de Eutrofização Marinha e de Água doce. Esta categoria de impacto corresponde à adição de nutrientes ao meio aquático, sendo os principais o nitrogênio e o fósforo. Via de regra, a disponibilidade de um destes componentes será fator limitante para o crescimento no ecossistema e a adição de um desses componentes acarretará no crescimento de algas e plantas. Conforme observado anteriormente, a utilização de fertilizantes é um dos principais contribuintes para este impacto, tendo em vista que a composição básica é feita por nitrogênio e fósforo. Além disso, a emissão de NO_x em processos de combustão também contribui para esta categoria de impacto. Assim, pode-se observar que a eutrofização marinha possui grande sensibilidade ao processo de produção do etanol, que ocasiona grande crescimento da eutrofização marinha à medida em que se utiliza o etanol no processo de combustão. Também, devido à utilização de fertilizantes no processo de produção do HVO, nota-se que o biocombustível possui potencial de eutrofização marinha maior que o diesel. De maneira semelhante, o HVO possui potencial de eutrofização de água doce maior que o diesel e esse impacto aumenta à medida em que se utiliza o etanol como substituto do diesel verde e do diesel fóssil.

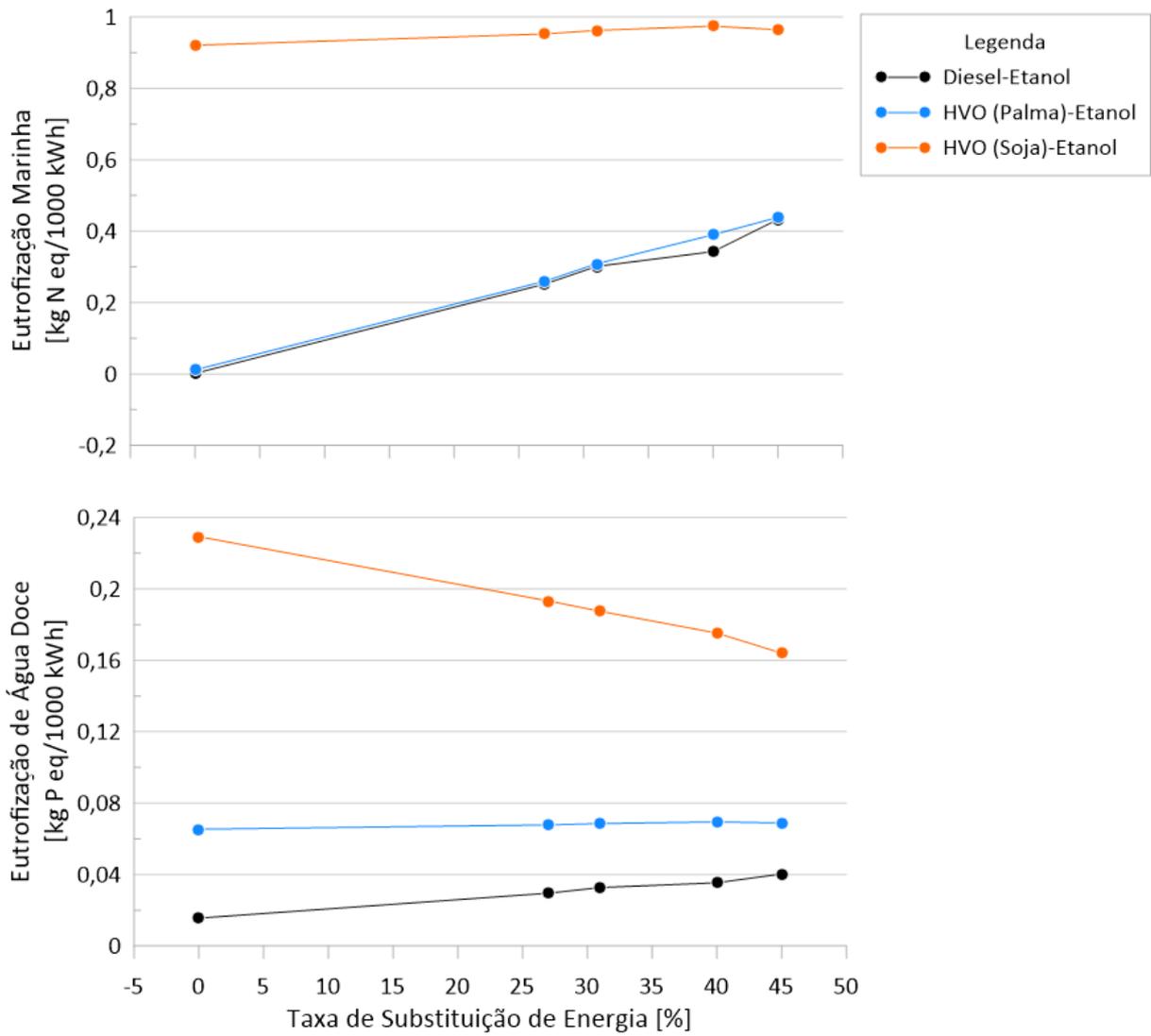


Figura 6-17 - Eutrofização Marinha e de Água Doce Total - HVO-Etanol comparado ao Diesel-Etanol

Fonte: Próprio Autor

7 CONCLUSÕES

As conclusões deste trabalho referem-se à metodologia utilizada na análise de parâmetros de desempenho do motor e da análise de emissões de poluentes do motor monocilíndrico de ignição por compressão utilizando Diesel Verde (HVO) em operação *Dual-Fuel* com o Etanol Hidratado. Também, são concluídos os resultados de desempenho ambiental do HVO operando em modo *Dual-Fuel* por meio de resultados obtidos com a Avaliação do Ciclo de Vida do biocombustível.

7.1 Conclusões – Análise de Desempenho e Emissões de Poluentes

Dos resultados obtidos para as condições de operação com o HVO na operação *Dual-Fuel* com o etanol hidratado, pode-se concluir que:

- A utilização do HVO como combustível proporcionou redução da emissão de todos os gases poluentes avaliados, CO₂, CO, NO_x, MP e HC.
- A utilização do HVO puro proporciona redução de cerca de 25% nas emissões específicas de NO_x, 4% de redução de emissões de CO₂ e redução de 50% nas emissões de material particulado, quando comparado ao diesel convencional.
- A operação *Dual-Fuel* do HVO com etanol hidratado possui potencial de redução de NO_x em todas as taxas de substituição de energia estudadas. Tal comportamento pode ser justificado principalmente pela redução da temperatura na câmara de combustão, que ocorre pela injeção do etanol como combustível de baixa reatividade.
- A operação *Dual-Fuel* do HVO com etanol hidratado reduz a emissão de CO₂ ao passo em que as emissões de CO aumentam. Tal fato pode indicar a redução da eficiência da combustão com a inserção do etanol como combustível de baixa reatividade. Também, ocorre aumento da emissão de HC, o que é indicativo da redução da eficiência da combustão com a injeção de etanol.
- O rendimento térmico do motor reduz com a inserção do etanol como combustível de baixa reatividade. O HVO apresenta eficiência térmica maior para todos pontos estudados.

7.2 Conclusões – Avaliação do Ciclo de vida do HVO produzido a partir do Óleo de Palma e Óleo de Soja

Dos resultados obtidos da Avaliação do Ciclo de vida do HVO, produzido a partir do óleo de palma e de soja, pode-se concluir que:

- O HVO possui potencial de aquecimento global inferior ao diesel convencional para ambas fontes de biomassa estudadas. Tal fato decorre principalmente da reabsorção, nas etapas de cultivo, do CO₂ emitido na combustão do biocombustível. Entretanto, o cultivo da soja representa maior risco de aquecimento global devido à maior quantidade necessária de fertilizantes e agrotóxicos – que acabam por emitir maior quantidade de CO₂ não biogênico na atmosfera.
- A utilização de recursos fósseis no processo de produção do HVO é consideravelmente menor se comparado ao diesel. O HVO produzido a partir da soja necessita de maiores quantidade de recursos fósseis, que estão relacionados principalmente à produção de fertilizantes e agrotóxicos e devido à maiores distâncias no transporte do óleo vegetal, o que ocasiona maior necessidade de diesel nos caminhões cargueiros. Também, no processo de hidrogenação do HVO faz-se necessária a utilização de hidrogênio, que é obtido por meio do processo de reforma de vapor, sendo assim necessária a utilização de gás natural no processo de produção, causando grande dependência de fontes não renováveis.
- O HVO produzido do óleo de palma possui menor potencial de acidificação que o diesel, devido principalmente à redução da emissão de NO_x na combustão. Entretanto, o diesel verde produzido a partir da soja possui maior potencial de acidificação que o diesel.
- A quantidade de água necessária para a produção do HVO do óleo de palma é menor que para a produção do diesel. Entretanto, devido principalmente ao processo de irrigação, são necessárias quantidades de água cerca de 6 vezes maiores para a produção da soja.
- O potencial de eutrofização dos meios aquáticos do HVO é maior que o diesel em ambos os cenários estudados, sendo a utilização da soja como biomassa com

impactos mais negativos que a palma, devido a maior necessidade de fertilizantes e pesticidas durante a etapa de cultivo.

7.3 Conclusões – Desempenho Ambiental da Operação Dual-Fuel do HVO com Etanol Hidratado

Dos resultados obtidos da Avaliação do Ciclo de vida do HVO, produzido a partir do óleo de palma e de soja, operando no modo *Dual-Fuel* com o etanol hidratado, pode-se concluir que:

- O potencial de aquecimento Global do HVO é menor que o do diesel em todos cenários estudados. A utilização do etanol na operação *Dual-Fuel* promove redução do GWP conforme aumenta-se a substituição de energia. O diesel verde produzido a partir da soja apresenta GWP maior que o da palma.
- A utilização de recursos fósseis é menor para o HVO produzido a partir de ambas as biomassas. Conforme aumenta-se a substituição de etanol, reduz-se a utilização de recursos fósseis.
- O HVO produzido do óleo de palma apresenta menor potencial de formação de ozônio que o diesel em todas as substituições estudadas. A utilização do etanol promove a redução do impacto, que é justificado pela diminuição da emissão de NO_x no processo de combustão. O ciclo de vida do HVO do óleo de soja possui potencial de formação de ozônio maior que o do diesel até substituições de 30%.
- O consumo de água no processo de produção do HVO é maior para ambos os cenários e substituições estudadas, sendo o consumo de água para a biomassa da soja em média de 5 m³ maior quando comparado tanto ao diesel convencional quanto ao HVO produzido do óleo de palma.
- O HVO produzido da palma possui potencial de acidificação terrestre menor que o do diesel em todas as substituições estudadas, porém aumenta conforme aumenta-se a substituição de etanol. O HVO produzido a partir da soja possui maior potencial de acidificação que o diesel em todas as substituições estudadas e também ocorre o aumento da acidificação conforme aumenta-se a substituição. O aumento deste impacto relaciona-se à alta taxa de emissão de NO_x que ocorre durante o processo de queima da cana de açúcar que ocorre na etapa de colheita.

- Por fim, o HVO possui maior potencial de eutrofização dos meios aquáticos para ambos os cenários estudados. Com o aumento da substituição de energia, ocorre redução da eutrofização de meios marinhos, pois necessita-se de menos compostos ricos em nitrogênio na produção da cana de açúcar. Em contrapartida, ocorre elevação da eutrofização de reservas de água doce.

7.4 Conclusões Finais

Os resultados de emissões de gases poluentes indicaram que a utilização do HVO puro como combustível promove redução e todos os gases analisados. A operação em modo dual ainda é capaz de promover reduções nas emissões de CO₂, NO_x e material particulado. Somando-se isso à possibilidade da utilização do HVO como combustível sem necessidade da conversão ou adaptação dos motores, observa-se que este biocombustível pode ser uma importante ferramenta na descarbonização de processos dependentes de motores de combustão interna, como o setor de transportes e o setor de geração de energia elétrica.

Além disso, o HVO de forma geral, possui um ciclo de vida menos agressivo ao meio ambiente quando comparado com o diesel fóssil, principalmente tratando-se do potencial de aquecimento global. A utilização do óleo de palma como biomassa para a produção do diesel verde se mostra bastante promissora, pois é mais benéfica ao meio ambiente se comparada a utilização do óleo de soja. Além disso, a palma não gera competição com o setor alimentício, contabilizando mais um ponto positivo em sua aplicação.

7.5 Sugestões Para Trabalhos Futuros

A partir do presente estudo, conclui-se que existe campo para melhorias adicionais no desempenho de emissões dos MCI, bem como melhorias a serem implementadas no ciclo de vida do diesel verde, sendo algumas delas:

- Análise de emissões em diferentes cargas e rotações para o HVO, para avaliação de seu potencial de aplicação no sistema de transporte.
- Realizar estudos experimentais do HVO em motores modernos (monocilíndrico ou multicilindro) para avaliar o comportamento com tecnologias mais avançadas (controle eletrônico da injeção, common-rail, etc.), turboalimentação, sistemas de pós tratamento de gases de escape, etc.);

- Desenvolver sistema de injeção eletrônica, do tipo direta, para o combustível de alta reatividade (diesel ou diesel renovável) na bancada dinamométrica desenvolvida. Além disso, desenvolver sistema para sobre alimentação e controle da pressão na admissão da bancada;
- Análise da combustão do HVO, avaliando parâmetros de pressão, temperatura, atraso de ignição, entre outros.
- O HVO ainda é um biocombustível novo e relativamente desconhecido no Brasil, que ainda carece de uma rede de distribuição comercial totalmente desenvolvida. Por esse motivo, é complicado realizar estimativas precisas sobre o custo do combustível e seus impactos de longo prazo nos motores de combustão interna como desgaste, depósitos e entupimento. Estes são assuntos a serem explorados em um futuro próximo;
- Avaliar o impacto da utilização de resíduos do processo de produção do HVO no ciclo de vida.
- Estudo da influência da utilização do próprio HVO em substituição do diesel utilizado em etapas de cultivo, extração, transporte no ciclo de produção do diesel verde.
- Avaliação de impactos ambientais com a utilização de resíduos, como o óleo de cozinha, na produção do HVO.
- Como o HVO é um produto relativamente novo, não existem disponíveis muitos dados de inventário relativos ao processo industrial de hidrogenação. A utilização de *softwares* de simulação como o Aspen Plus pode ser uma importante ferramenta para a maior divulgação do processo de produção deste biocombustível.
- Análise de sensibilidade dos dados de Inventário para o ACV do HVO.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Definição de objetivo e escopo e análise de inventario. NBR ISO 14041. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. NBR ISO 8178-1 : Motores alternativos de combustão interna - Medição da emissão de gases de exaustão. Parte 1: Medição das emissões de gases e material particulado em banco de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, , 2012.

AMYRYS. Manual do Diesel de Cana, 2012.

ANP. Resolução ANP N°50, de 23.12.2013 - DOU 24.12.2013 Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, , 2013. Disponível em: <<http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2013/dezembro&item=ranp-50-->

2013>

ANFAVEA. PROCONVE As fases presentes e futuras. In: Seminário sobre Emissões de Veículos Diesel 2009. São Paulo. Associação Brasileira de Engenharia Automotiva AEA. Disponível em: . Acesso em: 27/07/2014.

ANP. Resolução ANP No 45, de 25.8.2014 - DOU 26.8.2014 Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, , 2014. Disponível em: <<http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2014/agosto&item=ranp-45->

2014>

ANP - Agência nacional do petróleo gás natural e biocombustíveis. RESOLUÇÃO ANP N° 19, DE 15.04.2015 - DOU 16.4.2015 - Regulamenta a composição, comercialização e coloração do etanol 2015. <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2015/abril&item=ranp-19-2015&export=pdf>.

ANP. Resolução ANP N°778, de 05.04.2019. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2019. Disponível em: <https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/70491356/do1-2019-04-08-resolucao-n-778-de-5-de-abril-de-2019-70491250>. Acesso em 18 fev. 2021

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Agência Nacional do

- Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, , 2020. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/>
- Arvidsson, R., Persson, S., Fröling, M., & Svanström, M. (2011). Life cycle assessment of hydrotreated vegetable oil from rape, oil palm and Jatropha. *Journal of Cleaner Production*, 19(2–3), 129–137. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.02.008>
- Asad, U., Kumar, R., Zheng, M. & Tjong, J. Ethanol-Fueled Low Temperature Combustion: A Pathway to Clean and Efficient Diesel Engine Cycles. *Applied Energy*, 2015.
- Barik, D., Satapathy, A. K., & Murugan, S. (2017). Combustion analysis of the diesel–biogas dual fuel direct injection diesel engine–the gas diesel engine. *International Journal of Ambient Energy*, 38(3), 259–266. <https://doi.org/10.1080/01430750.2015.1086681>
- Bessonette P. W., Schleyer C. H., Duffy K. P., Hardy W. L. & Liechty M. P. Effects of Fuel Property Changes on Heavy-Duty HCCI Combustion. SAE Technical Paper 2007-01-0191, 2007.
- Bohl, T., Smallbone, A., Tian, G., & Roskilly, A. P. (2018). Particulate number and NO_x trade-off comparisons between HVO and mineral diesel in HD applications. *Fuel*, 215(March 2016), 90–101. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.023>
- Boretti, A. (2012). Advantages of converting Diesel engines to run as dual fuel ethanol-Diesel. *Applied Thermal Engineering*, 47, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.04.037>
- Boretti, A. (2019). Advantages and Disadvantages of Diesel Single and Dual-Fuel Engines. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 5(December), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fmech.2019.00064>
- Bortel, I., Vávra, J., & Takáts, M. (2019). Effect of HVO fuel mixtures on emissions and performance of a passenger car size diesel engine. *Renewable Energy*, 140, 680–691. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.067>
- Britto, R. F., & Martins, C. A. (2015). Emission analysis of a Diesel Engine Operating in Diesel-Ethanol Dual-Fuel mode. *Fuel*, 148, 191–201. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.01.008>
- Carvalho, C. M. de. (2015). A EXPANSÃO SUSTENTÁVEL DO CULTIVO DA PALMA PARA A PRODUÇÃO DE BIODIESEL NO BRASIL: O CASO DO ESTADO DO PARÁ. In *Universidade Federal do Rio de Janeiro*. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

- Costa, R. E.. *Inventário do Ciclo de Vida do Biodiesel obtido a partir do óleo de palma para as condições do Brasil e da Colômbia*. 0–267. 2007. Disponível em: <http://juno.unifei.edu.br/bim/0032497.pdf>
- Costa, R. B. R . Estudo Experimental De Um Motor De Ignição por Compressão Utilizando Diesel Renovável Da Cana-De-Açúcar (Farnesano) E Biodiesel De Óleo Residual De Cozinha (Wco). Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI. Itajubá, 2021
- da Costa, R.B.R., Valle, R. M., Hernández, J. J., Malaquias, A. C. T., Coronado, C. J. R., & Pujatti, F. J. P.. Experimental investigation on the potential of biogas/ethanol dual-fuel spark-ignition engine for power generation: Combustion, performance and pollutant emission analysis.2020. *Applied Energy*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114438>
- da Costa, Roberto Berlini Rodrigues, Gomes, C. A., Franco, R. L., Guzzo, M. E., & Pujatti, F. J. P. (2015). E100 Stratified Lean Combustion Analysis in a Wall-Air Guided Type GDI Optical Engine. *SAE Technical Paper*, 4(1), 1–9. <https://doi.org/10.4271/2015-36-0269>
- da Costa, Roberto Berlini Rodrigues, Teixeira, A. F., Rodrigues Filho, F. A., Pujatti, F. J. P., Coronado, C. J. R., Hernández, J. J., & Lora, E. E. S. (2019). Development of a homogeneous charge pre-chamber torch ignition system for an SI engine fuelled with hydrous ethanol. *Applied Thermal Engineering*, 152, 261–274. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.090>
- Curran, S., Hanson, R. & Wagner, R. Effect of E85 on RCCI Performance and Emissions on a Multi-Cylinder Light-Duty Diesel Engine. SAE Technical Paper 2012-01-0376, 2012
- Dimitriadis, A., Natsios, I., Dimaratos, A., Katsaounis, D., Samaras, Z., Bezergianni, S., & Lehto, K. (2018). Evaluation of a Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) and Effects on Emissions of a Passenger Car Diesel Engine. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 4(July 2018), 1–19. <https://doi.org/10.3389/fmech.2018.00007>
- Dimitriadis, A., Seljak, T., Vihar, R., Žvar Baškovič, U., Dimaratos, A., Bezergianni, S., Samaras, Z., & Katrašnik, T. (2020). Improving PM-NOx trade-off with paraffinic fuels: A study towards diesel engine optimization with HVO. *Fuel*, 265(December 2019). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116921>
- EPE, E. de P. E. (2005). *Potencial De Redução De Emissões De CO2 Em Projetos De Produção*

E Uso De Biocombustíveis.

- Egúsqüiza, J. C. C. Avaliação Experimental de um Motor Ciclo Diesel Operando no Modo Biocombustível: Diesel/Etanol e Diesel/Gás. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
- Garraín, D., Lechón, Y., & Santamaría, M. (2016). Environmental externalities assessment of a palm hydrotreated vegetable oil. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(4), 1239–1244. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1100-8>
- Gómez, A., García-Contreras, R., Soriano, J. A., & Mata, C. (2020). Comparative study of the opacity tendency of alternative diesel fuels blended with gasoline. *Fuel*, 264(December 2019), 116860. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116860>
- Guedes, A. D. M.; Estudo Experimental sobre o Impacto do Etanol em Misturas Diesel-Biodiesel-Etanol nos Motores de Ignição por Compressão. Dissertação de Mestrado. PUC-RJ. Rio de Janeiro, 2017.
- Gürbüz, H., & Sandalçı, T. (2019). Investigation of Effects of Fumigation on Performance and Emission in Dual Fuel Engines Injection-Controlled With Electronic Card. *International Journal of Engineering Research and Advanced Technology*, 5(3), 24–31. <https://doi.org/10.31695/ijerat.2019.3400>
- Hernández, J. J., Salvador, J. B., & Cova-Bonillo, A. (2019). Autoignition of diesel-like fuels under dual operation with H₂. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(6). <https://doi.org/10.1177/1687814019856781>
- Heywood, J. b. (2018). Internal Combustion Engine Fundamentals. In M.-H. Education (Ed.), *European University Institute* (Second Ed., Issue 2). McGraw-Hill Education. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R0679&from=PT%0Ahttp://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:52012PC0011:pt:NOT>
- Inagaki, K., Fuyuto, T., Nishikawa, K., Nakakita, K. & Sakata I., Dual Fuel PCI Combustion Controlled by In-Cylinder Stratification of Ignitability. SAE Technical Paper 2006-01-0028, 2006.
- Karim, G. A. (2015). *Dual-Fuel Diesel Engines* (First Ed.). Taylor & Francis Group.
- Kokjohn, S. L., Hanson, R. M., Splitter, D. A. & Reitz, R. D. Fuel Reactivity Controlled

- Compression Ignition (RCCI): A Pathway to Controlled High-efficiency Clean Combustion. *International Journal of Engine Research*, Vol.12, pp. 209–226, 2011.
- Liu, J., Sun, P., & Zhang, B. (2017). Effects of diesel/ethanol dual fuel on emission characteristics in a heavy-duty diesel engine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 231(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/231/1/012190>
- Martos, F. J., Soriano, J. A., Dorado, M. P., Soto, F., & Armas, O. (2020). Modelling of particle size distributions produced by a Diesel engine fueled with different fossil and renewable fuels under like urban and extra-urban operating conditions. *Fuel*, 263(December 2019), 116730. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116730>
- Mekhilef, S., Siga, S., & Saidur, R. (2011). A review on palm oil biodiesel as a source of renewable fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 1937–1949. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.12.012>
- Merker, G. P., Schwarz, C., & Teichmann, R. (2012). Combustion engines development: Mixture formation, combustion, emissions and simulation. In *Combustion Engines Development: Mixture Formation, Combustion, Emissions and Simulation* (First ed., Vol. 9783642140). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-14094>
- Michailos, S. (2018). *Process Design , Economic Evaluation and Life Cycle Assessment of Jet Fuel Production from Sugar Cane Residue*. July. <https://doi.org/10.1002/ep.12840>
- Moreira, M., Gurgel, A. C., & Seabra, J. E. A. (2014). Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Sugar Cane Renewable Jet Fuel. *Environmental Science & Technology*. <https://doi.org/10.1021/es503217g>
- Neste Corporation. (2015). Neste Renewable Diesel Handbook. *Neste*, 1–33.
- No, S. Y. (2014). Application of hydrotreated vegetable oil from triglyceride based biomass to CI engines - A review. *Fuel*, 115, 88–96. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.001>
- Owczuk, M., Matuszewska, A., Kruczyński, S., & Kamela, W. (2019). Evaluation of using biogas to supply the dual fuel diesel engine of an agricultural tractor. *Energies*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/en12061071>
- Parravicini, M., Barro, C., & Boulouchos, K. (2021). Experimental characterization of GTL, HVO, and OME based alternative fuels for diesel engines. *Fuel*, 292(November 2020), 120177. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120177>

- Peñarrubia Fernandez, I. A., Liu, D. H., & Zhao, J. (2017). LCA studies comparing alkaline and immobilized enzyme catalyst processes for biodiesel production under Brazilian conditions. *Resources, Conservation and Recycling*, *119*, 117–127. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.05.009>
- Rimkus, A., Stravinskas, S., & Matijošius, J. (2020). Comparative study on the energetic and ecologic parameters of dual fuels (diesel-NG and HVO-biogas) and conventional diesel fuel in a CI engine. *Applied Sciences (Switzerland)*, *10*(1). <https://doi.org/10.3390/app10010359>
- Rimkus, A., Žaglinskis, J., Stravinskas, S., Rapalis, P., Matijošius, J., & Bereczky, Á. (2019). Research on the combustion, energy and emission parameters of various concentration blends of hydrotreated vegetable oil biofuel and diesel fuel in a compression-ignition engine. *Energies*, *12*(15). <https://doi.org/10.3390/en12152978>
- Rocha, D. H. D., de Souza, T. A. Z., Coronado, C. J. R., Silveira, J. L., & Silva, R. J. (2021). Exergoenvironmental analysis of hydrogen production through glycerol steam reforming. *International Journal of Hydrogen Energy*, *46*(1), 1385–1402. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.012>
- Soam, S., & Hillman, K. (2019). Factors influencing the environmental sustainability and growth of hydrotreated vegetable oil (HVO) in Sweden. *Bioresource Technology Reports*, *7*(March), 100244. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100244>
- Sonthalia, A., & Kumar, N. (2019). Hydroprocessed vegetable oil as a fuel for transportation sector: A review. *Journal of the Energy Institute*, *92*(1), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.10.008>
- Soriano, J. A., Agudelo, J. R., López, A. F., & Armas, O. (2017). Oxidation reactivity and nanostructural characterization of the soot coming from farnesane - A novel diesel fuel derived from sugar cane. *Carbon*, *125*, 516–529. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.09.090>
- Soto, F., Marques, G., Torres-Jiménez, E., Vieira, B., Lacerda, A., Armas, O., & Guerrero-Villar, F. (2019). A comparative study of performance and regulated emissions in a medium-duty diesel engine fueled with sugarcane diesel-farnesane and sugarcane biodiesel-LS9. *Energy*, *176*, 392–409. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.011>
- Suarez-Bertoa, R., Kousoulidou, M., Clairotte, M., Giechaskiel, B., Nuottimäki, J., Sarjoavaara,

- T., & Lonza, L. (2019). Impact of HVO blends on modern diesel passenger cars emissions during real world operation. *Fuel*, 235(March 2018), 1427–1435. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.031>
- Sunde, K., Brekke, A., & Solberg, B. (2011). Environmental impacts and costs of hydrotreated vegetable oils, transesterified lipids and woody BTL-A review. *Energies*, 4(6), 845–877. <https://doi.org/10.3390/en4060845>
- Tomadon Júnior, J., Ugaia, C. M. L., & Gimenes, M. L. (2017). Inventário e potencial impacto ambiental da produção de soja com agricultura de precisão na perspectiva da Avaliação do Ciclo de Vida. *Periódico Eletrônico Fórum Ambiental Da Alta Paulista*, 13(3), 73–86. <https://doi.org/10.17271/1980082713320171687>
- Torres-Ortega, C. E., Gong, J., You, F., & Rong, B. G. (2017). Optimal synthesis of integrated process for coproduction of biodiesel and hydrotreated vegetable oil (HVO) diesel from hybrid oil feedstocks. In *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 40). Elsevier Masson SAS. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63965-3.50114-8>
- Vavra, J., Bortel, I., & Takats, M. (2019). A dual fuel hydrogen - diesel compression ignition engine and its potential application in road transport. *SAE Technical Papers*, 2019-April(April), 1–14. <https://doi.org/10.4271/2019-01-0564>
- Verhelst, S., Turner, J. W., Sileghem, L., & Vancoillie, J. (2019). Methanol as a fuel for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 70, 43–88. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.10.001>

ANEXO A – Entradas e Saídas para a Produção do Grão de Soja no Brasil

Entradas	Unidade	Quantidade
Sementes	kg	19,243
Ocupação	ha.a	0,2614
Dióxido de carbono	kg	1980,336
Energia	MJ	598,416
Calcário	kg	176,396
Fósforo	kg	35,459
Potássio	kg	28,741
Fungicida	kg	0,129
Inseticida	kg	0,2349
Herbicida	kg	1,327
Emissões Para o Ar	Unidade	Quantidade
Monóxido de Carbono	g	136,377
Dióxido de Carbono	g	39,396
Metano	g	0,6857
Óxidos de Nitrogênio	g	436,881
Monóxido de Nitrogênio	g	1,696
Amônia	g	0,0997
NMVOG	g	41,9639
PM10	g	21,668
PM2,5	g	21,668
TSP	g	21,668
Emissões para o Solo	Unidade	Quantidade
Fungicida	kg	0,0784
Inseticida	kg	0,1339
Herbicida	kg	1,3309
Cádmio	mg	1747,25
Cromo	mg	70731,82
Níquel	mg	-1297,122
Cobre	mg	-13996,407
Chumbo	mg	519,335
Zinco	mg	-29460,07
Emissões para a Água	Unidade	Quantidade
Nitrato	kg	5,321
Compostos de Fósforo	kg	0,061
Fungicida	kg	0,0481
Inseticida	kg	0,0822
Herbicida	kg	0,8172
Cádmio	mg	36,897
Cromo	mg	7583,586
Níquel	mg	1907,231
Cobre	mg	3670,318
Chumbo	mg	2014,613
Zinco	mg	11831,099

Fonte: Adaptado De Tomadon Júnior, Ugaia E Gimenes (2017)

ANEXO B - Quantificação de Entradas e Saídas na fase agrícola da soja

Produção: 5.600 kg de soja		
Área necessária: 1,75 ha		
Entradas	Quantidade	Quantidade (J)
Adubo (fertilizante N,P e K)	525 kg	48,50E +08
Fungicidas (Opera, Standak e Talstar)	3,80 kg	3,69E +08
Herbicida Glifosato	5,25 L	2,70E +09
Inseticidas (Dimilin e Permitrina)	0,75 kg	2,29E +08
Calcário Dolomítico	2.625 kg	1,60E +09
Água	2.625 L	1,30E +07
Óleo combustível (Diesel)	87,50 L	3,27E +09
Sementes	87,50 kg	2,93E +09
Operações manuais	12,54 h	2,85E +07
Energia solar	24.840 kWh	8,94E +10
Equipamentos (aço e ferro)	437,50 kg	3,50E + 10
Componentes do ar: combustão e fotossíntese (ar, O ₂ , CO ₂ , N ₂)	1,16E +04 kg	-
Energia elétrica	59,50 kWh	2,14E +08
Saídas	Quantidade	Quantidade (J)
Grãos de soja	5.600 kg	1,11E +11
Perda de solo	2.975 kg	8,06E +09
Efluentes líquidos para o solo	1.627,50 L	8,03E +06
Resíduos sólidos	1.620,00 kg	-
Emissões (CO, CO ₂ , N ₂ , NOx, VOC)	1.016,24 kg	-

* Fator de conversão para base energética baseado em CAVALETT (2008).

Fonte: (CAVALETT, 2008)

ANEXO C - Inventário de Produção de 1000 kg de frutos de palma

Etapa	Entrada	Kg	GJ
Preparo do solo	Diesel	1,84E-01	1,05E-02
Plantio Definitivo	Trabalho manual	Não quantificado	
Tratos Culturais e Pré-Plantio: Adubação	N	9,82E-01	6,04E-02
	P	1,52	1,47E-02
	K	23,89	1,60E-01
	Mg	2,09	N.D.
	Mn	2,59E-02	N.D.
	Zn	7,04E-02	N.D.
	B	1,66E-02	N.D.
	Glifosato	4,71E-01	2,13E-01
	Carbaryl	1,89E-01	2,88E-02
	Acefato ¹¹	9,65E-05	4,37E-05
Colheita	Manual	Não quantificado	
Transporte na lavoura	Animal	Não quantificado	
Transporte para usina	Diesel	9,94E-01	5,66E-02
Energia Total			5,44E-01
Emissões	kg	Kg CO₂ eq¹²	
CO ₂	3,93E+00	3,93E+00	
CH ₄	2,58E-03	5,42E-02	
N ₂ O	9,17E-02	2,84E+01	
CO	2,35E-02		
SO ₂	3,15E-03		
Nox	7,77E-02		
Material Particulado	1,49E-03		
COVM	1,44E-02		
Total		3,24E+01	

Obs.: N.D. – Não Disponível.

Fonte: EPE (2005)

ANEXO D – Inventário Consolidado para a produção de 1000 kg de óleo de palma.

Entrada	kg
Diesel	7,96
N	4,42
P	6,84
K	107,51
Mg	9,41
Mn	1,17E-01
Zn	3,17E-01
B	7,47E-02
Glifosato	2,12
Carbaryl	8,51E-01
Acefato	4,34E-04
Instalações e Equipamentos*	
<i>Energia Total</i>	
Produto	kg
Óleo de Palma	1.000
Produto/Entradas	
Emissões	kg
CO ₂	2,67E+01
CH ₄	1,16E-02
N ₂ O	4,30E-01
CO	1,07E-01
MP	1,22E-02
SOx	5,86E-02
NOx	3,50E-01
HC	6,56E-02

Fonte: Adaptado de EPE (2005)

ANEXO E - Entradas no processo de pré-tratamento na geração de 1000 kg de HVO

Entradas do processo de pré-tratamento	
Matéria prima necessária	1 214 kg
Água de resfriamento	70 kg
Eletricidade	50 MJ
Químicos do processo	3 kg
Água do processo	28 kg
Vapor	657 MJ

Fonte: Nikander (2008)

ANEXO F - Saídas no processo de pré-tratamento na geração de 1000 kg de HVO

Saídas do processo de pré-tratamento	
Óleo Pré-tratado	1 191 kg
Resíduo sólido seco	13 kg
Água residual	111 kg
CO₂e da produção de eletricidade (indireto)	3 kg
CO₂e da produção de vapor (indireto)	40 kg

ANEXO G - Entradas, Saídas e Resíduos do processo de produção de 1 m³ de etanol hidratado

Descrição	Quantidade	Unidade
Cana processada	11,32	toneladas
Água consumida	33,95	m ³
Energia elétrica consumida	1.008	Kw
Óleo diesel	950	litros
Vinhaça	10.000	litros
Bagaço gerado	2.943,2	kg
Torta de filtro	412,24	kg

ANEXO H – Entradas e Saídas da fase agrícola do processo de produção de 1 m³ de etanol hidratado

Produtos	Quantidade	Unidade
Herbicidas		
Tebuthiuron	77.356	litros
Ametrina	232.068	litros
Diuran	77.356	kg
Hexazinona	13,5373	kg
Trifluralina	96.695	litros
Sulfentrazone	46.413,60	litros
Metolaclo	77.356	litros
Clomazona	46.413,60	litros
Isoxaflutole	4.254,58	kg
Imazapic	7.735,60	Kg
Inseticida		
Imidacloprid	65,76	kg
Broca da Cana		
Certo	30,94	litros
Nematicida		
Carbofuran	193.390	litros
Formicida		
Mirex S	1.933	kg