

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA – CEFET/RJ**

**Custo Ambiental do Ciclo de Vida sobre o uso de biocombustíveis no
transporte de cargas rodoviário**

Gabriel de Oliveira Avena

**Prof. Orientador: Ronney Mancebo Boloy. DSc
Profa. Co-Orientadora Kátia Ferreira de Oliveira. MSc**

**Rio de Janeiro
2021**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA – CEFET/RJ**

**Custo Ambiental do Ciclo de Vida sobre o uso de biocombustíveis no
transporte de cargas rodoviário**

Gabriel de Oliveira Avena

**Prof. Orientador: Ronney Mancebo Boloy. DSc
Profa. Co-Orientadora Kátia Ferreira de Oliveira. MSc**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia mecânica do Centro
Federal de Educação Tecnológica Celso
Suckow da Fonseca.

**Rio de Janeiro
2021**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

A951 Avena, Gabriel de Oliveira

Custo ambiental do ciclo de vida sobre o uso de biocombustíveis no transporte decargas rodoviário / Gabriel de Oliveira Avena – 2021.

103f : il.color. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow daFonseca, 2021.

Bibliografia: f. 96-103

Orientador: Ronney Mancebo Boley

Co-orientadora Kátia Ferreira de Oliveira

1. Engenharia Mecânica. 2. Biocombustíveis. 3. Motores de combustão interna.

I. Boley, Ronney Mancebo (Orient.). II. Oliveira, Kátia Ferreira de (Co-orient.). III. Título.

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho a toda a minha família, que sempre esteve ao meu lado e me deu todo o suporte necessário para chegar aonde cheguei, em especial minha mãe, que além do suporte, sempre me apoiou em todas as minhas decisões e nunca me permitiu desistir, independente das dificuldades encontradas.

Agradeço a minha companheira Carolina, grande mulher e grande pessoa, sempre me ajudou a pensar com clareza e tomar as decisões certas, além de todo apoio e ajuda na conclusão do curso.

Aos professores, mestres e doutores e todos os colegas e colaboradores da instituição, agradeço por compartilharem seus conhecimentos e experiências e contribuir tanto para a formação dos alunos, tanto profissional quanto pessoalmente.

Gabriel de Oliveira Avena

RESUMO

Avena, Gabriel. Custo Ambiental do Ciclo de Vida sobre o uso de biocombustíveis no transporte de cargas rodoviário. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso—Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. RJ,2021.

O presente projeto apresentou, através de uma revisão da literatura, uma análise energética, um estudo de emissões Tank To Wheel (*TTW*) e uma análise do Custo Ambiental do Ciclo de Vida (*eLCC*) sobre a substituição do diesel mineral pelos biocombustíveis biogás e biodiesel em um motor de combustão interna com ignição por compressão operando em modo *Dual Fuel*, utilizado em um veículo de cargas de uso rodoviário. É apresentada uma breve análise do panorama nacional e mundial com relação à emissão de gases de efeito estufa e das formas de geração de energia, além de alguns conceitos básicos sobre o funcionamento dos motores a combustão interna e sobre a conversão *Dual Fuel*. A primeira lei da termodinâmica é aplicada a partir do conhecimento das propriedades físicas e químicas dos combustíveis em questão, devolvendo como resultado a eficiência energética do processo. O método *TTW* é utilizado para determinar as emissões oriundas do processo de combustão, enquanto o método *eLCC* apresenta os custos monetizados durante vida útil do caminhão, possibilitando realizar uma comparação entre a operação com diesel mineral e a *Dual Fuel*. A eficiência dos motores operados em modo *Dual* foi de 28,19%, 31,35% e 29,69% com 20%, 30% e 50% de substituição de biodiesel por biogás, respectivamente. Todas maiores que os 27,23% da operação a diesel e aos 27,32% da operação a biodiesel. As emissões *TTW* em modo *Dual* foram sempre menores quando comparadas as emissões produzidas no motor alimentado com diesel mineral ou biodiesel. Finalmente, a análise do C_{eLC} sinalizou um custo, ao longo dos anos, em média 3% maior para a operação em modo *Dual*, se comparada a operação a diesel (1,218 ante 1,182 R\$/km). Sugere-se, com fundamento na análise energética em termos de eficiência do motor, no estudo das emissões *TTW* e no Custo Ambiental do Ciclo de Vida, a substituição do diesel mineral pelos biocombustíveis, biogás e biodiesel, a partir da conversão à operação *Dual Fuel*, visando alcançar uma maior sustentabilidade no setor do transporte, neste caso no modal associado ao transporte rodoviário de carga.

Palavras-chave: Eficiência, Emissões *TTW*, Custo Ambiental do Ciclo de Vida, Motor de Combustão Interna de Ignição a Compressão. *Dual Fuel*.

ABSTRACT

Avena, Gabriel. Environmental Life Cycle Cost on the use of biofuels in road cargo transportation. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso—Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. RJ, 2021.

This project presented, through a literature review, an energy analysis, a study of Tank To Wheel (TTW) emissions and an analysis of the Life Cycle Environmental Cost (eLCC) on the replacement of mineral diesel with biogas and biodiesel biofuels in an internal combustion engine with compression ignition operating in Dual Fuel mode, used in a cargo vehicle for road use. A brief analysis of the national and global panorama is presented in relation to the emission of greenhouse gases and the forms of energy generation, in addition to some basic concepts about the operation of internal combustion engines and the Dual Fuel conversion. The first law of thermodynamics is applied from the knowledge of the physical and chemical properties of the fuels in question, returning as a result the energy efficiency of the process. The TTW method is used to determine the emissions from the combustion process, while the eLCC method presents the monetized costs during the truck's useful life, making it possible to make a comparison between the operation with mineral diesel and Dual Fuel. The efficiency of engines operated in Dual mode was 28.19%, 31.35% and 29.69% with 20%, 30% and 50% replacement of biodiesel with biogas, respectively. All higher than the 27.23% of the diesel operation and the 27.32% of the biodiesel operation. TTW emissions in Dual mode were always lower when compared to the emissions produced in the engine powered by mineral diesel or biodiesel. Finally, the analysis of CeLC showed a cost, over the years, on average 3% higher for the operation in Dual mode, when compared to the diesel operation (1,218 compared to 1,182 R \$ / km). It is suggested, based on energy analysis in terms of engine efficiency, in the study of TTW emissions and in the Environmental Cost of the Life Cycle, the replacement of mineral diesel by biofuels, biogas and biodiesel, from the conversion to Dual Fuel operation, aiming at achieving greater sustainability in the transport sector, in this case in the modal associated with road cargo transportation.

Keywords: Efficiency, TTW Emissions, Life Cycle Environmental Cost, Internal Combustion Engine from Ignition to Compression. Dual Fuel.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Matriz energética e Matriz elétrica brasileira em comparação com a média mundial	5
Figura 2 - Matriz energética brasileira em 2019	5
Figura 3 - Oferta Interna de Energia no ano de 2019	7
Figura 4 - Emissões de CO ₂ por fonte e por setor	8
Figura 5 - Processo de decomposição anaeróbica.....	13
Figura 6 - Esquema técnico do biodigestor de alimentação contínuo	16
Figura 7 – Esquema técnico do biodigestor com tanque armazenamento para o biofertilizante	17
Figura 8 - Usina termoeletrica de Nova Iguaçu movida a biogás	18
Figura 9 - Esquema de produção de biogás com sistema de cogeração de energia	19
Figura 10 - Produção de biogás por substrato no Brasil em 2015 (Nm ³ /dia)	22
Figura 11 - Principais possibilidades de utilização do biogás	26
Figura 12 - Fluxograma do processo de produção do biodiesel por transesterificação	33
Figura 13 - Principais matérias primas para a produção do biodiesel brasileiro em 2018	36
Figura 14 - Processo simplificado do refino de petróleo	45
Figura 15 - Motor a combustão interna e alguns componentes	49
Figura 16 - Conjunto pistão, biela e virabrequim	50
Figura 17 - Ciclos de um motor dois tempos	51
Figura 18 - Ciclos de um motor quatro tempos	51
Figura 19 - Diagrama P-v do ciclo Otto real (a) e ciclo Otto ideal (b)	53
Figura 20 - Gráfico eficiência x razão de compressão.....	54
Figura 21 - Diagrama P-v do ciclo diesel ideal	56
Figura 22 - Eficiência x razão de compressão.....	57
Figura 23 - Motor a combustão interna sob o ponto de vista termodinâmico	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Oferta Interna de Energia (OIE)	6
Tabela 2 - Gases presentes no biogás e suas concentrações	15
Tabela 3 - Peso específico e PCI do biogás para diferentes concentrações de metano e dióxido	23
Tabela 4 - Poder calorífico do biogás e de outros gases comumente usados	24
Tabela 5 -- Densidade do biogás e alguns outros gases	24
Tabela 6 - Comparação entre a rota metílica e etílica na produção de biodiesel por transesterificação	34
Tabela 7 - Grupos, origens e métodos de obtenção para a produção de biodiesel	35
Tabela 8 - Principais propriedades do Biodiesel	37
Tabela 9 - Poder calorífico do diesel e biodiesel de diversas origens vegetais	40
Tabela 10 - Poder calorífico do diesel e biodiesel de diversas origens	40
Tabela 11 - consumo energético por fonte	45
Tabela 12 - Principais propriedades do biodiesel e diesel como combustíveis	47
Tabela 13 - Propriedades do biodiesel de óleo residual de frituras, diesel comercial e mistura B20	47
Tabela 14- Especificações de óleo diesel e do biodiesel de óleo residual de frituras	48
Tabela 15 - PCI e densidade dos combustíveis	65
Tabela 16 - Porcentagem de massa e volume dos principais elementos presentes no ar atmosférico	67
Tabela 17 - Entalpias de cada substância em cada etapa do processo	69
Tabela 18 - Cálculo de E_{CO_2}	83
Tabela 19 - Cálculo do C_{CO_2}	83
Tabela 20 - Valores de C_n em R\$/km	84
Tabela 21 - Cálculo de C_{OP}	84
Tabela 22 - Cálculo de C_{eLC} em R\$/km	85
Tabela 23 - Compilação dos resultados para diferentes combustíveis e taxas de substituição de biodiesel por biogás	86

NOMENCLATURA

Abiogás	Associação Brasileira de Biogás e Biometano
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	American Society for Testing and Materials
BEN	Balanco Energético Nacional
Conab	Companhia Nacional de Abastecimento
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETE	Estações de tratamento de efluentes
GEE	Gases de efeito estufa
GLP	Gás liquefeito de petróleo
GNV	Gás natural veicular
HC	Hidrocarbonetos
HPA	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás
MCI	Motores a combustão interna
MME	Ministério de Minas e Energia
NC	Índice de cetano
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OIE	Oferta Interna de Energia
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
PIB	Produto interno bruto
PLANGÁS	Plano Nacional de Gás Natural para uso no Transporte
PMI	Ponto morto inferior do pistão
PMS	Ponto morto superior do pistão
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel
RBTB	Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel
RSU	Resíduos sólidos urbanos
TTW	Tank to Wheel

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO	4
1.3 PROBLEMÁTICA	9
1.4 OBJETIVO	10
2 BIOGÁS	11
2.1 INTRODUÇÃO	11
2.2 ETAPAS DA DIGESTÃO ANAERÓBICA	12
2.3 TÉCNICAS E TECNOLOGIAS DOS BIODIGESTORES	15
2.4 SUBSTRATOS	20
2.5 PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS	23
2.6 BIOCOMBUSTÍVEL	25
3 BIODIESEL	30
3.1 INTRODUÇÃO	30
3.2 PRODUÇÃO	32
3.3 PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS	36
3.4 BIOCOMBUSTÍVEL	41
4 DIESEL	44
5 MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA	49
5.1 CICLO OTTO	52
5.2 CICLO DIESEL	55
6 CONVERSÃO PARA MOTORES DIESEL DUAL FUEL	57
7 ANÁLISE ENERGÉTICA E DE EMISSÕES TTW	63
7.1 COMBUSTÍVEIS, REAÇÃO DE COMBUSTÃO E A PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA	63
7.2 COMPARAÇÃO ENTRE AS EMISSÕES DOS COMBUSTÍVEIS E APLICAÇÃO DA PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA	71
8 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	86
9 CONCLUSÃO	94
REFERÊNCIAS	96

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados dados de órgãos como o Ministério de Minas e Energia, do Balanço Energético Nacional e da Empresa de Pesquisa Energética referentes ao consumo de energia no Brasil e suas principais fontes, além de apresentar brevemente algumas fontes de energia renováveis, com foco nas energias provenientes de biomassa como o biodiesel e o biogás.

1.1 MOTIVAÇÃO

Atualmente há uma transição com relação às fontes e consumo de energia no mundo. Se por um lado, o desenvolvimento da sociedade demanda um maior consumo energético, por outro, o planeta já demonstra sinais de desgaste e saturação. A atual demanda e uso de combustíveis fósseis e não renováveis é insustentável, pois além desses recursos serem finitos, a combustão desses combustíveis é responsável por grande parte da emissão de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, o que tem gerado instabilidade e mudanças climáticas que tem afetado toda a população mundial, além da emissão de outros gases que afetam diretamente o meio ambiente e a saúde das pessoas. Segundo estudo do Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, entre os anos de 2000 e 2015, houve um aumento de aproximadamente 50% no consumo de óleo diesel no país. No Brasil, devido ao seu modal de transporte de cargas majoritariamente rodoviário, pode-se considerar o crescimento no consumo de diesel como um excelente termômetro para a atividade econômica no país (IBP, 2019).

O aumento na demanda por energia e combustíveis, associado ao desenvolvimento do país de maneira sustentável, vem motivando a busca por fontes alternativas de geração de energia. Pode-se citar a eólica e a solar como excelentes opções, mas sua implementação ainda é relativamente cara e a porção de energia gerada ainda é insuficiente para abastecer as grandes cidades. Segundo o relatório do Balanço Energético Nacional, (BEN, 2018), a energia eólica correspondeu a apenas 6,8% da energia gerada no ano de 2017, enquanto a solar correspondeu a uma parcela menor ainda, de apenas 0,13%, da energia gerada e consumida no país. Além dos problemas de insuficiência da energia produzida e do elevado custo de implementação, há ainda questões a serem consideradas em relação à fabricação e descarte dos painéis solares usados, que utilizam alguns metais nobres e escassos e tem vida útil de

aproximadamente 25 anos, e não há um descarte ou processo de reciclagem eficiente para eles, o que causaria outro problema ecológico. No caso dos geradores eólicos, há a poluição visual, além de interferirem no ecossistema local e necessitarem de grandes ventos para operarem com eficiência, o que não é possível em todos os lugares do país.

Mesmo assim, a produção de energia eólica cresceu 26% do ano 2016 para o ano 2017, alcançando 42.373 GWh. A potência instalada de produção, que representa a capacidade bruta de produção, aumentou em 21%. A energia solar também apresentou crescimento na casa de 20% entre os mesmos anos, mas ainda representando muito pouco da energia utilizada no país (BEN, 2018).

Outras fontes consideradas renováveis que podem ser mais bem exploradas são a lenha e o carvão vegetal, e os produtos derivados da cana de açúcar, como o etanol e o bagaço da cana. Porém, embora esses combustíveis sejam considerados de natureza renovável, pois podem ser plantados e explorados de maneira contínua, sua produção e seu aproveitamento energético através de sua queima poluem diretamente o meio ambiente. A produção de cana de açúcar para fins energéticos conflita com a produção para consumo humano. Já o carvão vegetal carrega ainda, além da poluição gerada por sua queima, o problema ligado ao desmatamento necessário para produzir a madeira que dá origem ao carvão vegetal.

Como alternativa a essas fontes renováveis temos o uso de outros biocombustíveis provenientes de biomassa, sendo o biodiesel e o biogás ótimas opções. O biodiesel, por exemplo, pode ser extraído de vegetais oleosos que são moídos e recebem tratamentos específicos para se tornar um combustível ou ser produzido a partir do sebo e gordura de animais, e o biogás, composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), pode ser obtido através da decomposição de resíduos orgânicos de vegetais ou da parte orgânica do lixo urbano, fezes de animais e até dos resíduos orgânicos gerados pela indústria.

As propriedades físicas e químicas do biodiesel se aproximam as propriedades do diesel convencional, sendo assim possível a utilização do biocombustível em substituição parcial, em diferentes proporções de misturas, ou completa do diesel de petróleo sem a necessidade de grandes alterações nos motores originalmente projetados para o funcionamento a diesel.

Segundo o Ministério de Minas e Energia, apenas no ano de 2019, foram consumidos 5,9 bilhões de litros de biodiesel, valor que representa um aumento de 11,3% no consumo em relação ao ano anterior. A produção e consumo do biodiesel só tendem a aumentar, visto que no ano de 2005 foi implementado o Plano Nacional de Produção e Uso do Biodiesel, com a missão de estimular sua produção de maneira sustentável e econômica (EPE, 2019). Desde o

início do projeto já foram produzidos mais de 29 bilhões de litros do biocombustível, o que coloca o Brasil como o segundo maior produtor de biodiesel do mundo, atrás apenas dos Estados Unidos. Outro fator que estimulou a produção e o consumo foi a lei nº13.263, publicada em março de 2016, que definiu um aumento no percentual de biodiesel presente no diesel comum em 1% ao ano, atingindo-se o teor de 13% até o ano de 2021 e com a pretensão de se atingir os 15% até o ano de 2023 (EPE, 2017).

O biogás, como o nome sugere, tem origem de um processo biológico, e é formado pela decomposição anaeróbica de qualquer matéria orgânica. É um processo que ocorre espontaneamente na natureza, como por exemplo, no fundo de pântanos, lagos, e no estômago e fezes dos animais. Como citado anteriormente, os principais gases presentes no biogás são o metano, com proporções que variam entre 50 a 75% do volume e o dióxido de carbono, com proporções entre 25 e 50% do volume, pode-se encontrar pequenas quantidades de hidrogênio, sulfeto de hidrogênio, amônia, entre outros gases (GUIA Prático do Biogás, 2010).

Segundo estudos da Empresa de Pesquisa Energética, anualmente são produzidos e liberados na atmosfera um volume entre 590 e 800 milhões de toneladas de biogás, o que é extremamente preocupante pois o dióxido de carbono e o metano, embora façam parte do ciclo natural do carbono, são extremamente poluentes se liberado diretamente na atmosfera e considerados os principais gases de efeito estufa (EPE, 2017).

As principais fontes de biogás são os lixões e aterros sanitários, a indústria de bebidas e alimentícia, a suinocultura e o gado em geral, os resíduos sólidos urbanos, (RSU), e o lodo dos esgotos.

Conforme Milanez et al., (2018) o biometano pode ser produzido a partir do biogás através de processos de purificação e filtragem e assim atingir elevadas porcentagens de metano em seu volume. O biometano produzido pode ser usado como biocombustível e substituir perfeitamente o gás natural fóssil. A principal vantagem do biogás em relação ao gás natural se dá pelo fato de este não ser um combustível fóssil e esgotável, podendo ser produzido contínua e constantemente, visto que sua matéria prima principal é encontrada em abundância na natureza. Além disso, o aproveitamento energético do biogás ou biometano através da queima é menos poluente ao meio ambiente que sua liberação direta na atmosfera.

O biogás tem começado a receber sua devida importância recentemente, quando se percebeu o potencial energético que é desperdiçado. Ainda segundo Milanez et al., (2018) o Brasil tem grande vantagem competitiva relacionada a matéria prima para a produção do biogás, com grande quantidade de resíduos agroindustriais disponíveis, principalmente no

interior e nas áreas rurais, onde o biogás produzido localmente poderia ter custo inferior ao gás natural e outros combustíveis. O biometano poderia ser usado em motores estacionários geradores de eletricidade, em motores de maquinário agrícola e até mesmo em veículos urbanos e rodoviários, substituindo parcialmente ou completamente o diesel, se o motor for devidamente adaptado para tal.

1.2CONTEXTUALIZAÇÃO

Considera-se por matriz energética o conjunto de fontes disponíveis para geração de energia. A matriz energética mundial é composta principalmente por fontes não renováveis, como o carvão mineral, petróleo e gás natural, que juntos correspondem a mais de 80% das fontes de energia utilizadas. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética, empresa pública federal responsável por prestar serviços de pesquisas e dados estatísticos ao Ministério de Minas e Energia, a matriz energética brasileira no ano de 2019 era composta por 45% de fontes renováveis, enquanto a média mundial era de apenas 14%, conforme pode ser observado na figura 1, que apresenta lado a lado o gráfico da matriz energética e matriz elétrica brasileiras em comparação com a média mundial (BEN, 2020).

Deve-se atentar a diferença do significado entre matriz energética e matriz elétrica, pois embora estejam ligadas uma à outra apresentam dados completamente diferentes. A matriz energética representa o conjunto de todas as fontes de energia disponíveis para mover todos os setores da economia e do país, como os veículos, a indústria, a agricultura e agropecuária, eletricidade, comércio, entre outros, enquanto a matriz elétrica significa apenas o conjunto de fontes disponíveis para a geração de energia elétrica. A matriz elétrica brasileira é composta principalmente por fontes renováveis, sendo a maior parte da eletricidade do país produzida por usinas hidroelétricas (64,9%). A geração de energia através do aproveitamento da biomassa, da energia solar e da energia eólica também vem crescendo no cenário nacional, correspondendo a 8,4%, 1,0% e 8,6% respectivamente (BEN, 2020).

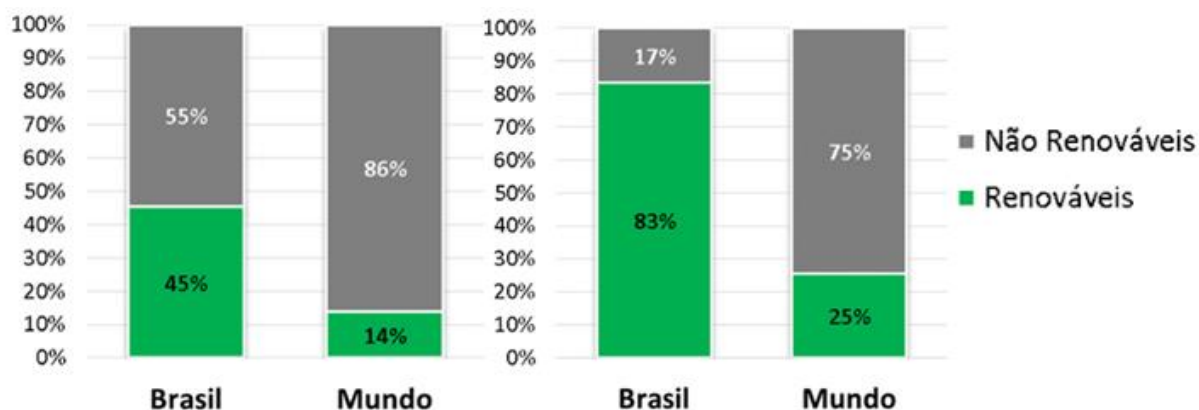


Figura 1 - Matriz energética e Matriz elétrica brasileira em comparação com a média mundial
Fonte: Empresa de pesquisa energética, 2020.

Embora no Brasil o consumo de energias não renováveis ainda seja superior ao uso das energias renováveis, estamos bem acima da média mundial na utilização da mesma. Ainda assim, nossa matriz energética é muito dependente do petróleo e seus derivados, principalmente o óleo combustível pesado e o óleo diesel, como pode ser observado na figura 2 (BEN, 2020).

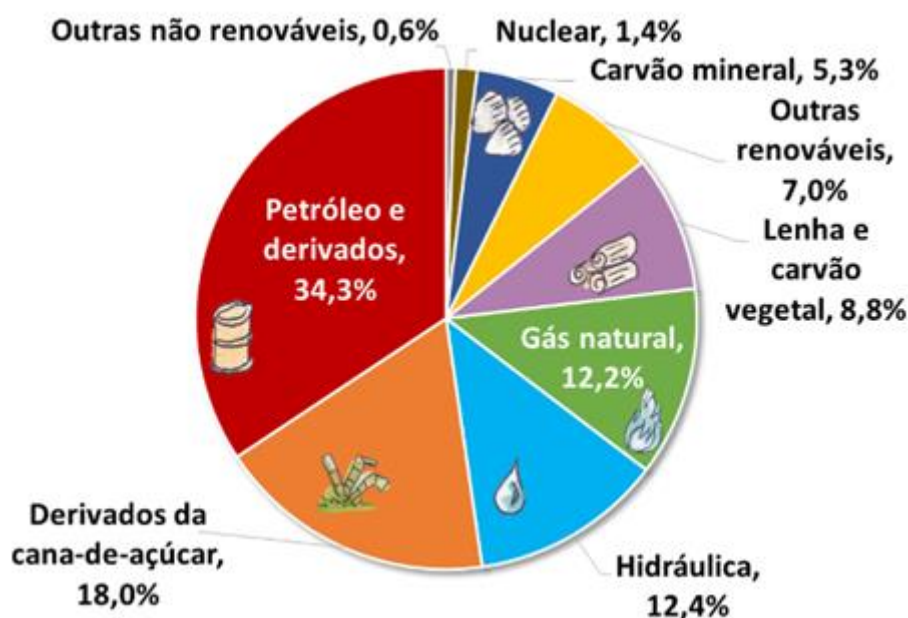


Figura 2 - Matriz energética brasileira em 2019
Fonte: Empresa de pesquisa energética, 2020.

A Oferta Interna de Energia (OIE) em 2018 apresentou leve retração de 1,7% em relação ao ano de 2017, muito devido a retração no consumo de energia pelo setor industrial, que baixou 4,8% em 2018. Todos os combustíveis fósseis recuaram em 2018, com uma queda absoluta de 5,5%, sendo o de maior baixa o petróleo e seus derivados, com queda de 6,5%, enquanto os renováveis cresceram 3,4% puxados principalmente pelo aumento na produção de energia através de fontes eólicas e do biodiesel e outras fontes, com alta de 13,6%. A tabela 1 apresenta uma análise comparativa da OIE entre os anos de 2017 e 2018, acompanhada das taxas de variação por fonte (MME, 2019).

Tabela 1 - Oferta Interna de Energia (OIE)

Especificação	Mil tep 2017	Mil tep 2018	Varição 18/17 (%)	Estrutura 2017 (%)	Estrutura 2018 (%)
Não renovável	167.028	157.859	-5,5	57,0	54,7
Petróleo e derivados	106.276	99.320	-6,5	36,2	34,4
Gás natural	37.938	35.905	-5,4	12,9	12,5
Carvão mineral e derivados	16.790	16.632	-0,9	5,7	5,8
Urânio (U308) e derivados	4.193	4.174	-0,5	1,4	1,4
Outros não renováveis	1.831	1.828	-0,1	0,6	0,6
Renovável	126.240	130.533	3,4	43,0	45,3
Hidráulica e eletricidade	35.023	36.460	4,1	11,9	12,6
Lenha e carvão vegetal	23.992	24.146	0,6	8,2	8,4
Derivados da cana de açúcar	49.758	50.090	0,7	17,0	17,4
Outros renováveis	17.467	19.837	13,6	6,0	6,9
Total	293.268	288.392	-1,7	100,0	100,0
Dos quais fósseis	162.835	153.685	-5,6	55,5	53,3

Fonte: Resenha Energética Brasileira, 2019.

Para o ano de 2019, segundo a Resenha Energética Brasileira de 2020, a OIE sofreu um aumento de 1,4% em relação ao ano anterior, valor levemente superior ao crescimento do PIB, de 1,1% de um ano para o outro. O resultado foi impulsionado pelo crescimento de 2,8%

na geração de energia proveniente de fontes renováveis, com destaque para a cana de açúcar e seus derivados, o biodiesel e a eólica.

A matriz energética brasileira e a OIE no ano de 2019 mantiveram-se compostas principalmente por fontes não renováveis (53,9% de não renováveis contra 46,1% das renováveis), mas novamente as fontes renováveis destacaram-se e apresentaram valores muito superiores ao restante do mundo (média de 10,8% nos países da OCDE e de 14,2% para o restante do mundo). A figura 3 apresenta os valores da OIE no ano de 2019 e a separa por combustíveis e fontes de energia.

Embora no Brasil o uso de combustíveis fósseis para a produção de energia elétrica, considerando-o assim como parte da matriz elétrica, seja reduzido, o uso destes na matriz energética ainda é bem elevado, com destaque para o diesel, que é o derivado de petróleo mais consumido, principalmente no setor de transportes de pessoas e ainda mais no setor de transporte de cargas.

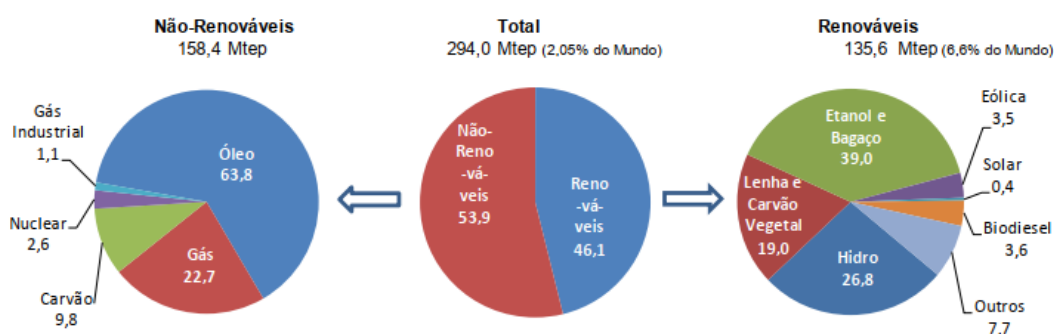


Figura 3 - Oferta Interna de Energia no ano de 2019
Fonte: Resenha Energética Brasileira, 2020.

Outro fato relevante sobre a matriz energética brasileira foi o superávit de energia pelo segundo ano consecutivo, com uma produção primária superando a demanda em 4,9% (ante 1,4% do balanço anterior, que foi o primeiro ano a apresentar um superávit na produção de energia). Tal fato ocorreu principalmente pelo crescimento na produção de petróleo e gás natural, além das citadas fontes renováveis, o que demonstra uma tendência de redução da dependência e da importação energia e combustíveis.

Os setores que mais consomem energia elétrica no Brasil são o setor industrial, com quase 40% do consumo do país, seguido pelo setor residencial, com 25,4% e o comercial com 17%, segundo relatório do Balanço Energético Nacional 2019 (BEN, 2019).

O setor de transportes é o maior consumidor de petróleo e seus derivados, sendo o óleo diesel o mais produzido e consumido. O Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis de 2019, feito pela ANP, apontou uma produção de 41,2 milhões de m³ de diesel apenas no ano de 2018, representando 44,4% da produção de derivados de petróleo no país, com alta de 3,2% em relação ao ano de 2017 e uma comercialização de 55,6 milhões de m³, com alta de 1,6% e correspondendo a 47,6% do total de derivados de petróleo consumidos (ANP, 2019).

As fontes de energia não renováveis, principalmente as ligadas a combustão de combustíveis não renováveis como os derivados de petróleo, são umas das principais responsáveis pela emissão de gases do efeito estufa, sendo o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄) os mais emitidos e mais poluentes. No ano de 2019 o Brasil emitiu 406,1 milhões de toneladas de dióxido de carbono na atmosfera, valor levemente superior ao do ano anterior, sendo quase metade das emissões (45,1%) decorrentes do setor de transporte e 31,4% referentes a atividade industrial do país (MME, 2020). A figura 4 apresenta as emissões de CO₂ por fonte e por setor.

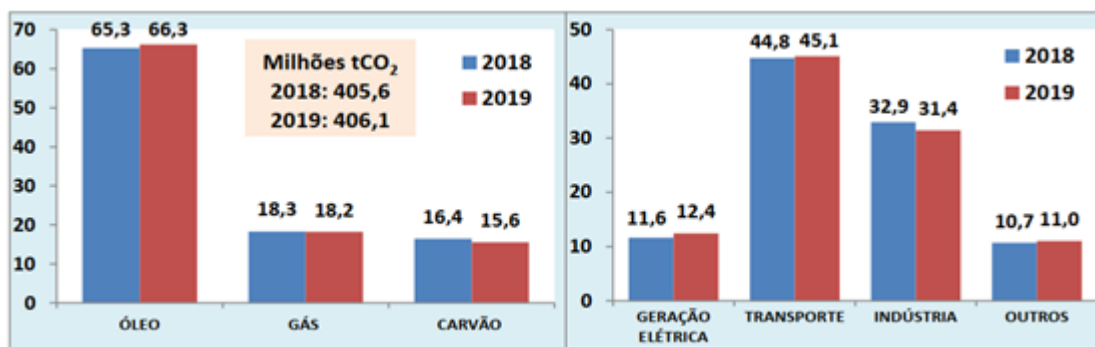


Figura 4 - Emissões de CO₂ por fonte e por setor
Fonte: Resenha Energética Brasileira, 2020.

O biogás e o biodiesel são apresentados como excelentes opções para substituir os combustíveis fósseis nos motores a combustão interna. O biogás pode substituir completamente o Gás Natural Veicular (GNV) nos veículos de pequeno ou grande porte e que funcionam no ciclo Otto, e pode substituir parcialmente o diesel nos veículos de carga, de transporte e de grande porte que funcionam no ciclo diesel, como caminhões, ônibus, trens, e até mesmo navios. Se associado ao biodiesel, a queima seria ainda mais limpa e eficiente pois

estariam sendo usados dois biocombustíveis, ambos com menores emissões que seus similares fósseis, além de serem combustíveis renováveis.

1.3 PROBLEMÁTICA

O crescimento e o desenvolvimento do país estão diretamente ligados ao aumento no consumo de energia e desses combustíveis não renováveis, o que é uma preocupação do ponto de vista ambiental, pois a necessidade de mais combustível não renovável significa mais poluição e degradação do meio ambiente.

Como forma de amenizar esse problema o governo brasileiro tem ampliado seus programas de desenvolvimento de bicombustíveis e tem criado leis cada vez mais rígidas de controle de poluição e emissões de gases, como por exemplo, leis que exigem que o diesel passe por processos mais complexos de refino e produção, com a utilização de aditivos para que sua queima aconteça de forma mais limpa e a determinação de limites cada vez menores para o teor de enxofre dos combustíveis.

A norma EURO 6, com implementação no Brasil prevista para 2023, também é uma medida para o controle e a redução na emissão de poluentes, principalmente de hidrocarbonetos não queimados e NO_x, onde os limites para a emissão desses gases são respectivamente 72% e 80% menores que os impostos pela norma anterior, EURO 5 (Chiptronic, 2018).

Além disso, o governo vem aumentando gradativamente o teor obrigatório de biodiesel ao diesel comum. Hoje o teor de biodiesel adicionado ao diesel corresponde a 13% do volume total, sendo chamado de diesel B13, e há projetos e propostas de elevar essa porcentagem a 15% até o ano de 2023 (EPE, 2017).

São medidas que trazem resultado positivo, gerando menores emissões de gases poluentes e material particulado proveniente da queima dos combustíveis, mas não solucionam o problema. São necessárias medidas mais eficientes, que tornem a queima do combustível e a geração de energia ainda mais limpas.

A adição de biodiesel em maiores proporções e associado ao biogás, caracterizando assim o motor como operante em modo *Dual Fuel*, podem e vão ajudar na solução desses problemas pois além de reduzirem a dependência por combustíveis fósseis e não renováveis, a queima desses bicombustíveis gera menores quantidades de gases de efeito estufa, tóxicos e poluentes, de fumaça branca e preta, fuligem e material particulado.

O estímulo à produção de novos combustíveis ajuda também na questão socioeconômica, atraindo investimentos em pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias, gerando novos empregos e oportunidades, desde o setor produtivo até a distribuição e comercialização do produto final, além de gerar uma melhora geral na qualidade de vida das pessoas.

Falando especificamente do biogás, ajudaria também em um grave problema urbano: o descarte de resíduos sólidos urbanos, pois seria um destino final e uma forma de gerar energia através do aproveitamento da biomassa encontrada em abundância no lixo e esgoto. A produção do biogás pode ser descentralizada, com estações menores espalhadas pelas cidades, nas áreas rurais de agricultura e pecuária e até em residências e condomínios para utilização doméstica, ou ser produzido de maneira concentrada e em escala, com produção de grandes volumes de biogás, proveniente da decomposição do lixo dos aterros sanitários e tratamento dos esgotos. O aproveitamento energético do biogás poderia ser feito no próprio local do aterro ou estação, sendo usado como biocombustível para alimentar conjuntos de geradores estacionários, produzindo energia para suprir as necessidades do aterro e a produção sobressalente ser lançada na rede elétrica, ou canalizado, transportado e armazenado para ser usado como combustível para motores a Diesel convertidos ao sistema Diesel Dual Fuel em veículos de carga e transporte como caminhões e ônibus, e até para veículos maiores como trens e navios.

1.4 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é apresentar através de uma revisão da literatura os conceitos relacionados aos biocombustíveis e sua produção, principalmente o biogás proveniente dos resíduos sólidos urbanos e o biodiesel produzido a partir do óleo residual e outras fontes, bem como discutir a viabilidade energética da utilização desses biocombustíveis em motores a combustão interna por compressão que operam no ciclo Diesel convertidos à operação em modo *Dual Fuel*, onde o biogás, ou biometano, substitui grande parte do diesel ou biodiesel.

2 BIOGÁS

O biogás é um biocombustível gasoso que se situa como excelente candidato a substituir diversos combustíveis não renováveis, como a gasolina, o gás natural e até mesmo o diesel, podendo fazê-lo sem grandes perdas de desempenho ou onerosas adaptações nas máquinas que os utilizam. Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos e informações sobre o biogás, seu processo de fabricação, sua matéria prima, suas propriedades físicas e químicas e as possibilidades de utilização como fonte de energia.

2.1 INTRODUÇÃO

O biogás é uma mistura de diversos gases que se formam pela decomposição e biodegradação de materiais orgânicos pela ação de microrganismos e bactérias anaeróbicas na ausência de oxigênio, onde compostos orgânicos complexos são quebrados em cadeias menores e formam dióxido de carbono e metano principalmente. É um processo que ocorre naturalmente em lagos, rios e pântanos pelo acúmulo de material orgânico em seu fundo.

Ocorre também a formação de biogás naturalmente pela decomposição dos resíduos sólidos urbanos concentrados nos lixões e aterros sanitários, na decomposição de alguns resíduos industriais, no lodo e no material orgânico das estações de tratamentos de esgoto, no excremento de animais e em qualquer outro acúmulo de material orgânico que esteja em decomposição em meio anaeróbico.

As propriedades químicas do biogás permitem que ele seja usado como bicombustível, já que seu principal componente é o metano, o mesmo hidrocarboneto principal do gás natural. O biogás pode ainda passar por processos de químicos e físicos para tornar suas propriedades ainda mais interessantes do ponto de vista econômico. Sua purificação a níveis superiores a 96% gera o gás conhecido como biometano, que tem características e propriedades muito próximas ao gás natural já muito usado como combustível, podendo substituí-lo completamente sem necessidade de nenhuma alteração (MILANEZ et al., 2018)

Na busca por alternativas aos combustíveis fósseis, o biogás tem atraído atenção de muitos pesquisadores e investidores. Seu aproveitamento como bicombustível além de reduzir a necessidade de combustíveis fósseis também reduziria a quantidade de dióxido de carbono e metano que são lançados diretamente na atmosfera. O biogás produzido pode ser usado de diversas maneiras, desde aquecimento a geração de eletricidade em geradores e caldeiras e a

utilização em motores a combustão interna, sendo eles do ciclo Diesel ou Otto, substituindo parcialmente o diesel ou substituindo completamente qualquer combustível nos motores Otto e tendo como subproduto da sua reação de combustão completa apenas dióxido de carbono e vapor de água. Além disso, a geração de biogás pode ser feita utilizando subprodutos da indústria, subprodutos da produção agrícola, resíduos e dejetos de animais e os resíduos sólidos urbanos (RSU), que compreendem os resíduos de toda a atividade doméstica e comercial dos centros urbanos e é um grande problema de todas as cidades e países.

A grande oferta de matéria prima e substratos para sua produção, principalmente no Brasil que se coloca como um dos maiores produtores rurais do mundo, somado ao seu processo produtivo relativamente simples e conhecido e a sua flexibilidade de aplicação o colocam como excelente biocombustível do futuro.

2.2 ETAPAS DA DIGESTÃO ANAERÓBICA

A fermentação anaeróbica, ou biodigestão, que acontece nos biodigestores pode ser separada em quatro estágios que ocorrem simultaneamente e são realizadas por diferentes grupos de microrganismos. Os diferentes estágios e os produtos gerados em cada um deles pode ser observado na figura 5.

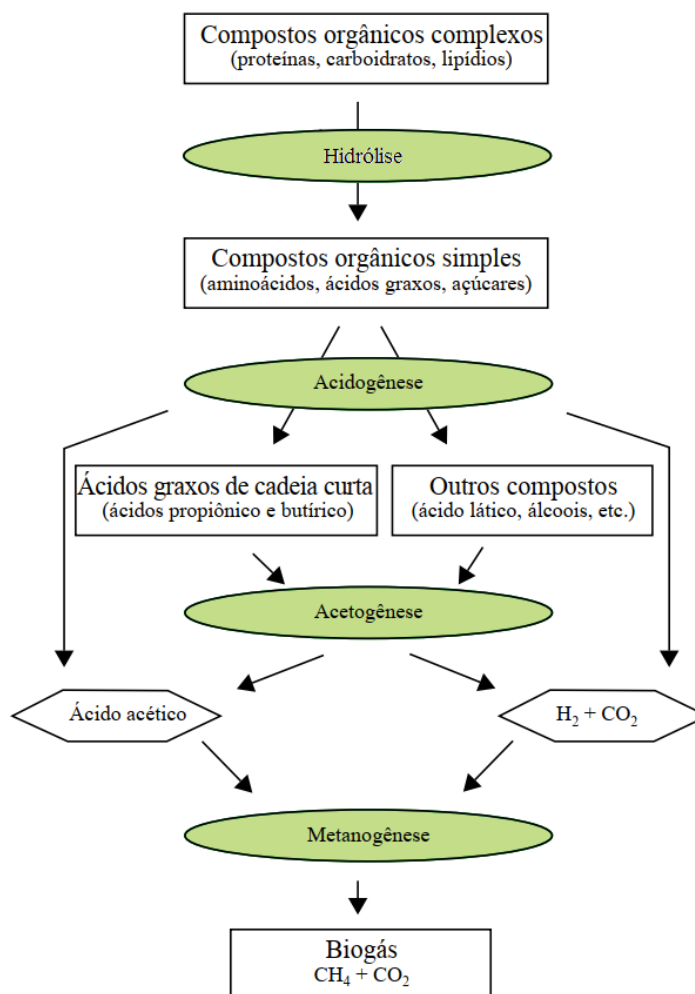


Figura 5 - Processo de decomposição anaeróbica.
 Fonte: Adaptado de GUIA PRÁTICO DO BIOGÁS, 2010.

O biogás formado contém porcentagens de metano entre 50 e 75% de seu volume, o segundo gás mais presente é o dióxido de carbono com concentrações que variam entre 25 e 45% de seu volume. São encontrados traços de outros gases também, como hidrogênio, sulfeto de hidrogênio, amônio, entre outros em pequenas frações. Os principais fatores que influenciam a composição do biogás formado são o substrato que o originou e a qualidade do processo de fermentação e digestão anaeróbica (GUIA Prático do Biogás, 2010).

O processo de formação do biogás se divide em quatro principais estágios, sendo o primeiro deles a hidrólise, onde bactérias hidrolíticas liberam enzimas e realizam reações bioquímicas que decompõem o material orgânico e os compostos orgânicos complexos, como proteínas, carboidratos e lipídios, em substâncias menos complexas, tais quais aminoácidos, ácidos graxos e açúcares (GUIA Prático do Biogás, 2010).

No segundo estágio, chamado de acidogênese, bactérias acidogênicas decompõem os compostos orgânicos formados no processo anterior em ácidos graxos de cadeia curta, como ácido acético, butírico e propiônico, além disso, são formados dióxido de carbono, hidrogênio, alguns álcoois e ácido láctico. A concentração dos compostos formados nessa etapa depende muito da concentração de hidrogênio na mistura (GUIA Prático do Biogás, 2010).

O terceiro estágio é a acetogênese, onde bactérias acetogênicas decompõem os compostos presentes e os convertem em hidrogênio, dióxido de carbono e ácido acético, que são os compostos que serão convertidos em biogás no próximo estágio. Nesse ponto da decomposição, a concentração de hidrogênio é fundamental pois grandes concentrações do mesmo podem atrapalhar ou impedir o processo de acetogênese, gerando ácidos orgânicos, como o ácido isobutírico, isovalérico, capróico e propiônico, que impedem o quarto estágio, a metanogênese (GUIA Prático do Biogás, 2010).

Na metanogênese, principalmente o hidrogênio, o dióxido de carbono e o ácido acético, são convertidos em metano por grupos diferentes de bactérias. As bactérias metanogênicas produzem o metano a partir da decomposição do ácido acético, enquanto bactérias hidrogenotróficas convertem o dióxido de carbono e o hidrogênio nas moléculas de metano (GUIA Prático do Biogás, 2010).

Embora pareçam estágios diferentes e distintos, ambos ocorrem simultaneamente na digestão anaeróbica. Os diversos grupos de bactérias e microrganismos presentes e que realizam a digestão anaeróbica possuem diferentes exigências e necessidades, sendo facilmente afetados por variações bruscas de temperatura e pelo PH do meio, sendo necessário assim, buscar um equilíbrio entre as condições do meio que favoreçam a sobrevivência de todas as bactérias. O grupo de bactérias da metanogênese é o mais sensível e por isso é comum que em biodigestores as condições sejam controladas de maneira a favorecer seu crescimento (GUIA Prático do Biogás, 2010).

A produção de biogás se faz naturalmente no meio ambiente e faz parte do ciclo natural do carbono, porém a ação humana e o crescimento populacional vêm gerando um aumento na produção desse gás. Segundo Milanez et al., (2018), a decomposição da matéria orgânica em meios anaeróbicos gera anualmente entre 590 e 800 milhões de toneladas de metano, que são liberados diretamente na atmosfera.

Como dito anteriormente, as propriedades do biogás e o mais importante, sua concentração de metano, estão ligados diretamente aos insumos e substratos usados para sua produção, além disso, a temperatura e o processo de fermentação, o nível de carga e o tempo

de permanência no biodigestor também têm grande influência na sua produção e rendimento. Os teores de gordura, carboidratos e proteínas do substrato são determinantes para a quantidade de metano que será produzido.

O rendimento de substratos com altos teores de gordura é o mais alto, sendo o de proteínas mediano e o de carboidratos o menor rendimento na conversão em metano. Segundo o GUIA Prático do Biogás (2010), a relação de conversão de massa em metano que apresenta o maior rendimento é a de substratos com altos teores de gorduras. Além disso, deve-se atentar a concentração de sulfeto de hidrogênio, pois mesmo em pequenas quantidades pode interromper o processo de digestão anaeróbica, além disso, é um gás corrosivo, que pode diminuir a vida útil dos biodigestores e suas tubulações.

A tabela 2 apresenta os principais gases encontrados no biogás, bem como suas concentrações aproximadas, que variam de acordo com o substrato utilizado e a eficiência do processo de digestão anaeróbica (GUIA Prático do Biogás, 2010).

Tabela 2 -Gases presentes no biogás e suas concentrações

Componente	Concentração
Metano (CH ₄)	50% - 75% do volume
Dióxido de carbono (CO ₂)	25% - 45% do volume
Água (H ₂ O)	2% - 7% do volume
Sulfeto de hidrogênio (H ₂ S)	20 – 20.000 ppm
Nitrogênio (N ₂)	<2% do volume
Oxigênio (O ₂)	<2% do volume
Hidrogênio (H ₂)	<1% do volume
Outros gases	<1% do volume

Fonte: GUIA PRÁTICO DO BIOGÁS, 2010

2.3 TÉCNICAS E TECNOLOGIAS DOS BIODIGESTORES

A digestão anaeróbica, e conseqüentemente a produção de biogás, acontece apenas em ambientes fechados e privados de oxigênio, do contrário, ao invés de biogás rico em metano seria produzido basicamente CO₂ e água.

Os biodigestores, ou reatores, são equipamentos planejados especificamente para a digestão anaeróbica. No geral são tanques fechados, construídos de concreto ou aço, ou tanques cobertos com uma lona emborrachada apropriada, podendo ser dotados de sistemas de

aquecimento e isolamento térmico e agitadores para o substrato. Normalmente o biogás formado no biodigestor é captado na parte superior do mesmo, ficando na parte inferior o dreno para remoção do substrato processado, ou biofertilizante (KARLSSON et al., 2014).

O armazenamento do substrato, bem como a forma de alimentação dos biodigestores, varia de acordo com o tipo de substrato escolhido para o processo de biodigestão, podendo ser classificado como seco, semi seco ou úmido. A alimentação do substrato pode ser classificada essencialmente como contínua, semi-contínua e descontínua ou em batelada.

A alimentação contínua é assim chamada pois o substrato é bombeado várias vezes por dia para o biodigestor, ao mesmo tempo em que o resíduo da biodigestão é bombeado para fora na mesma proporção. Nesse tipo de alimentação o biodigestor permanece todo o tempo cheio e se apresenta como vantagem a produção constante e uniforme de biogás, outra vantagem dessa alimentação é o bom aproveitamento de todo o volume do biodigestor, no entanto, segundo o GUIA Prático do Biogás (2010), deve-se atentar a possibilidade de haver um curto circuito no momento de alimentação, que é a situação em que não apenas os resíduos já processados são bombeados para fora, mas também o substrato ainda não digerido.

Outro problema é em relação ao reservatório do biofertilizante gerado no processo da biodigestão. O reservatório deve ser fechado ou também será uma fonte de biogás lançado na atmosfera. A figura 6 apresenta um esquema técnico simplificado do biodigestor com alimentação contínua e com reservatório de biofertilizantes, porém com este aberto a atmosfera.

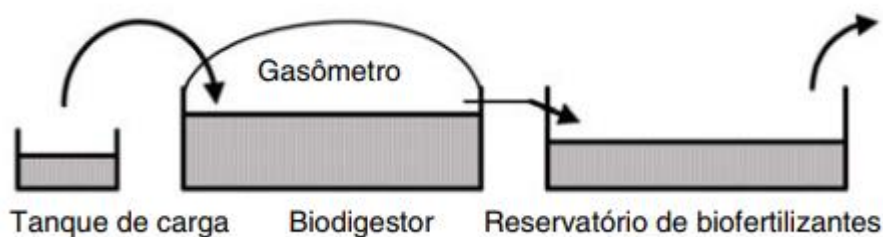


Figura 6 - Esquema técnico do biodigestor de alimentação contínuo
Fonte: GUIA PRÁTICO DO BIOGÁS, 2010

Para solucionar esse problema há o modelo de alimentação contínua acompanhado de tanque de armazenamento para o biofertilizante com sistema de captação do biogás, nesse sistema o reservatório é vedado e há um conjunto de tubulações e válvulas que capta e

direciona o biogás liberado pelo biofertilizante e o armazena separadamente (GUIA Prático do Biogás, 2010). Seu esquema simplificado é apresentado na figura 7.

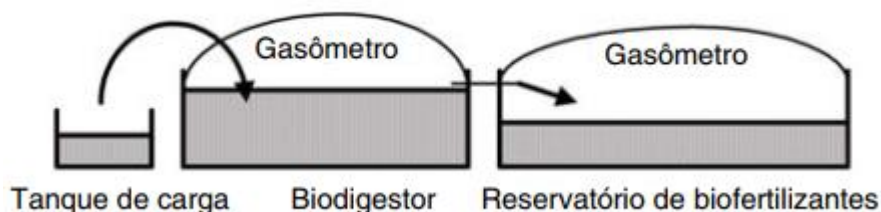


Figura 7 – Esquema técnico do biodigestor com tanque armazenamento para o biofertilizante
Fonte: GUIA PRÁTICO DO BIOGÁS, 2010

Os biodigestores de alimentação semi-contínua funcionam de maneira similar ao de alimentação contínua, porém o substrato é bombeado apenas algumas vezes ou pelo menos uma vez ao dia para o biodigestor.

Biodigestores de alimentação contínua ou semi-contínua podem ser usados nas mais diversas situações, instalados em grandes ou pequenas propriedades rurais de agropecuária e indústrias para tratar os resíduos ali mesmo produzidos, reduzindo o impacto ambiental das atividades humanas e gerando energia que pode ser utilizada para uso próprio ou vendida para a concessionária de energia da região e produzindo o biofertilizante, que também pode ser utilizado ou revendido, além disso, podem ser construídos para tratar os resíduos sólidos urbanos das cidades.

Nos biodigestores alimentados pelo modelo de batelada o substrato é adicionado ao reator, que é selado e permanece assim por todo o período de retenção, sem nenhuma adição ou retirada de substrato, enquanto produz o biogás. Após o final do tempo previsto o reator é aberto, recolhe-se o biofertilizante e os resíduos, sendo então alimentado e fechado novamente, dando início a outro processo de biodigestão. Esse tipo de alimentação tem como característica a produção inconstante de biogás, que se inicia lentamente, após alguns dias atinge seu pico e decai gradativamente ao longo do tempo de retenção. Muitas vezes, graças a essa característica de produção inconstante, a projeto da planta de geração de biogás inclui vários biodigestores, que são alimentados de maneira alternada, para garantir uma produção mais uniforme do biogás.

Um bom exemplo de biodigestor que trabalha alimentado de maneira descontínua são os aterros sanitários, onde são depositadas grandes quantidades de lixos e resíduos sólidos

urbanos durante um determinado período. Os aterros são projetados de maneira a não permitir a contaminação do solo pelo chorume proveniente do lixo, por isso é vedado onde há contato com o solo e são instalados drenos para a remoção do chorume e do biofertilizante. Quando o aterro atinge sua capacidade máxima de estocagem de lixo este é coberto, vedado e aterrado e são instalados dutos que captam o biogás formado no interior do aterro. O biogás formado é queimado no local ou endereçado para seu pós tratamento e usado para geração de energia elétrica.

Ha diversos aterros sanitários instalados no país e alguns já produzem energia elétrica através da queima do biogás ali gerado. A maior termoelétrica desse tipo no estado do Rio de Janeiro encontra-se em Nova Iguaçu, na baixada fluminense. Inaugurada no final de 2019, a usina tem 12 motogeradores instalados com capacidade combinada de geração de até 16,5 MW de energia, suficientes para alimentar aproximadamente 65 mil residências de padrão médio de consumo. A figura 8 apresenta uma visão parcial da usina e do aterro sanitário citado.



Figura 8 - Usina termoelétrica de Nova Iguaçu movida a biogás
Fonte: Canaonline, 2019

Segundo o GUIA prático do biogás (2010), independente do modelo de biodigestor ou o tipo de alimentação, o funcionamento das usinas de biogás pode ser dividido em quatro operações básicas: O gerenciamento do substrato, a biodigestão e geração do biogás, o

processamento e armazenamento dos biofertilizantes e o armazenamento, purificação e utilização do biogás. O projeto da usina é todo feito com base no tipo, quantidade, qualidade e características do substrato, seja ele de origem animal, vegetal, resíduos industriais ou resíduos sólidos urbanos, são suas características que vão modelar todo o processo produtivo do biogás.

Um modelo de geração de energia simplificado é apresentado na figura 9, que apresenta um modelo de ciclo fechado desde a captação do esterco até a utilização do biofertilizante nas áreas de plantio.

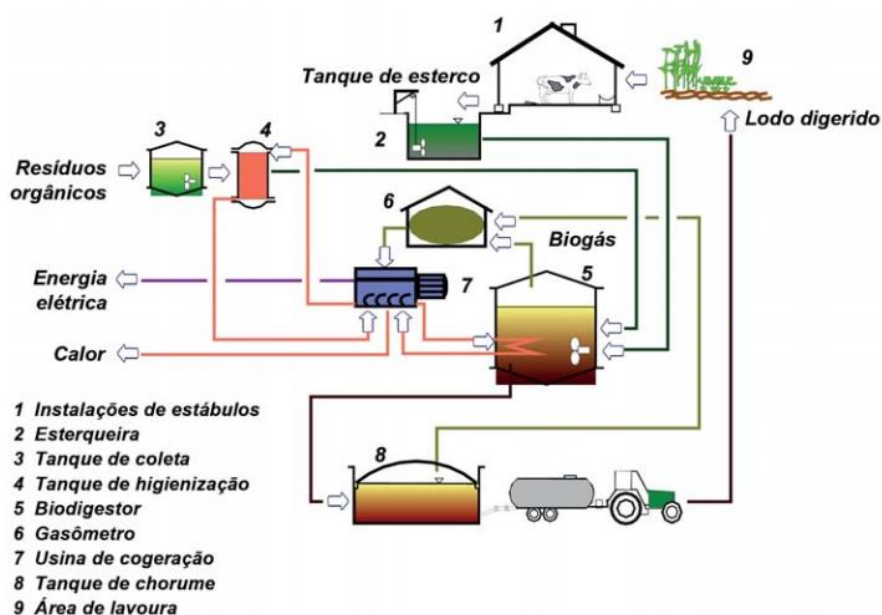


Figura 9 - Esquema de produção de biogás com sistema de cogeração de energia
 Fonte: GUIA PRÁTICO DO BIOGAS, 2010

Como subproduto da geração de biogás, o biofertilizante, consiste nos resíduos e materiais não orgânicos resultantes da biodigestão. Suas propriedades e suas substâncias dependem também dos substratos utilizados e do processo de fermentação na produção do biogás. O biofertilizante pode ser usado diretamente nos campos e na agricultura, diluído em água, no processo de fertirrigação e a venda do excedente pode ainda gerar uma renda extra aos produtores (MILANEZ et al., 2018). Os biofertilizantes podem substituir com vantagem os fertilizantes já conhecidos e utilizados de origem mineral, pois além de ricos em diversos nutrientes e substâncias necessárias ao solo apresentarem um custo cada vez mais competitivo.

2.4 SUBSTRATOS

O biogás é formado a partir da decomposição da matéria orgânica, por isso, a princípio, qualquer material orgânico pode ser utilizado para a produção do biogás. Na prática, a escolha e as características do substrato são de fundamental importância para se obter um bom rendimento e boa qualidade de biogás. A composição do substrato utilizado influenciará diretamente na concentração dos gases ao final do processo de biodigestão pois alguns substratos têm maior rendimento que outros na produção de metano.

Os substratos devem conter nutrientes e vitaminas, como fósforo e oligoelementos (microminerais necessários que desempenham diversas funções metabólicas) essenciais para o crescimento e multiplicação dos microrganismos dentro do biodigestor. Um fator de grande importância na produção de biogás é a relação carbono/nitrogênio, devendo sempre haver mais carbono que nitrogênio, com a razão ideal variando de acordo com o substrato e com as condições de processamento. O substrato também não pode ser muito diluído pois o excesso de umidade pode atrapalhar o crescimento e desenvolvimento dos microrganismos. (KARLSSON et al., 2014).

Misturas de diferentes substratos de diferentes origens também podem ser feitas para aumentar o rendimento do processo, gerando mais biogás e mais metano. Isso ocorre, pois, um substrato mais diversificado tem mais chances de conter todos os nutrientes necessários para os microrganismos, além de favorecer a proliferação de diferentes tipos de microrganismos (KARLSSON et al., 2014).

O substrato pode passar por diferentes pré processamentos para facilitar a biodigestão, como por exemplo, a desintegração mecânica ou moagem do material, ou processamentos térmicos ou químicos, entre outros, que aumentam a solubilidade e conseqüentemente a disponibilidade de material orgânico para ser digerido (KARLSSON et al., 2014).

A agropecuária é grande fonte de material orgânico em forma de dejetos para a produção do biogás, sendo o Brasil um dos maiores produtores de gado bovino, suíno e de frango do mundo. É difícil porém o aproveitamento da matéria orgânica gerada por essa atividade. Os bovinos são criados em sua maioria em pasto aberto, tornando quase impossível o aproveitamento de seus dejetos, enquanto os frangos são criados sobre as chamadas "cama de frango", que são muito secas para a utilização direta como subproduto para o biogás, além

disso, geralmente são utilizadas para a fabricação de fertilizantes. A suinocultura é, nesse setor, a maior produtora de biogás pois é a de mais simples coleta e aproveitamento dos dejetos e resíduos como substrato (MILANEZ et al., 2018).

A matéria orgânica proveniente do processamento de plantas e alimentos de origem vegetal e os resíduos de alguns processamentos industriais também pode ser utilizada. Nesse grupo podemos incluir, por exemplo, os subprodutos da produção de cerveja, como o bagaço do malte, que corresponde a aproximadamente 75% do subproduto gerado. A produção do biodiesel em escala, que produz grandes quantidades de subprodutos, como a torta e glicerina, também pode ser utilizada para a produção de biogás, figurando principalmente como co-substratos, ou seja, usados em pequenas porções adicionados a outros substratos (GUIA Prático do Biogás, 2010).

Entre os resíduos agroindustriais disponíveis no Brasil merece destaque o setor produtor de açúcar e álcool, onde a cana de açúcar é a principal matéria prima utilizada e o Brasil é o maior produtor do mundo. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), apenas entre os anos de 2016 e 2017 foram produzidos 657 milhões de toneladas de cana, utilizados para a produção de 28 bilhões de litros de etanol e 39 milhões de toneladas de açúcar. Cada litro de etanol produzido gera de 10 a 12 litros de vinhaça e cada tonelada de cana moída gera entre 30 e 40 kg de torta de filtro. Ambos podem ser utilizados como matéria prima para a produção do biogás, onde cada tonelada de torta produz entre 90 e 120 Nm³ de biogás e cada litro de vinhaça produz de 15 a 25 Nm³ de biogás (MILANEZ et al., 2018).

Os resíduos sólidos urbanos, gerados pelas atividades domésticas e comerciais da população e conhecidos popularmente como lixo urbano, são outra fonte potencial de matéria orgânica para o biogás. Estima-se que no Brasil sejam produzidos aproximadamente 80 milhões de toneladas de RSU ao ano, dos quais 17,2% são descartados inadequadamente em lixões, 24,1% em aterros controlados e 58,7% para aterros sanitários (MILANEZ et al., 2018). A maior dificuldade em se produzir biogás através da decomposição dos RSU se dá pela sua grande diversidade de constituintes, sendo composto por uma fração orgânica e outra inorgânica, com difícil separação entre elas. Mesmo assim os aterros sanitários foram a principal fonte de biogás para o Brasil no ano de 2015.

A figura 10 apresenta as principais fontes de matéria prima para a produção de biogás no Brasil no ano de 2015, em Nm³/dia, onde em primeiro lugar encontra-se o biogás produzido em aterros sanitários pela decomposição dos RSU (51%), enquanto as indústrias de alimentos e de bebidas e a suinocultura foram, respectivamente a segunda (25%) e a terceira (14%) fontes de matéria prima para a produção do biogás.

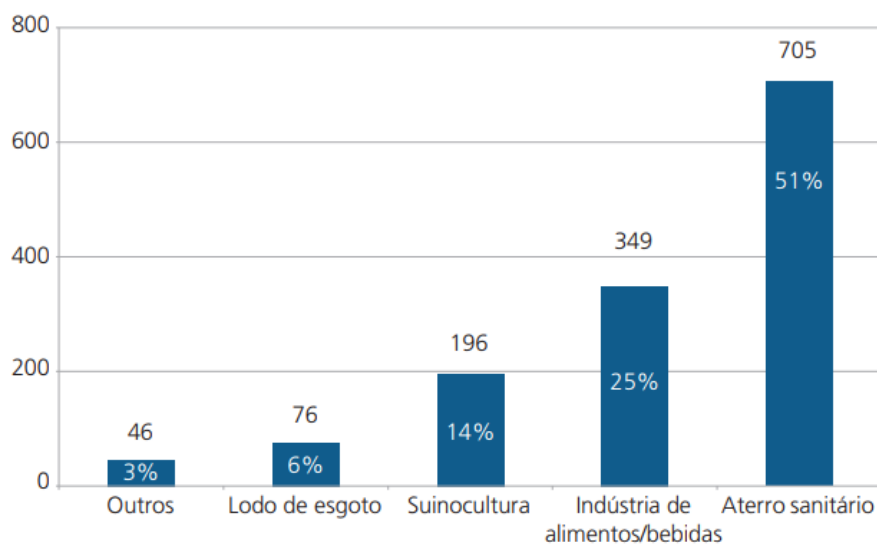


Figura 10 - Produção de biogás por substrato no Brasil em 2015 (Nm³/dia)
Fonte: MILANEZ et al., 2018

As estações de tratamento de efluentes (ETE) também são produtoras de biogás e utilizam o lodo dos esgotos e os RSU presentes nele como fonte de matéria orgânica, mas este correspondeu a apenas 6% do biogás produzido. O biogás gerado pelos RSU de aterros sanitários contém entre 50 e 55% de metano (MILANEZ et al., 2018).

Conforme Milanez et al., (2018) aponta, o tratamento das grandes quantidades de efluentes geradas nos centros urbanos é necessário e extremamente importante, porém esse tratamento ainda é pouco feito no Brasil, conferindo grande capacidade de crescimento para o setor.

O Brasil apresenta um setor primário da economia muito forte, com forte atividade nos setores de agricultura, pecuária e pesca, por exemplo. Para o setor de biocombustíveis provenientes de biomassa isso significa que há grande disponibilidade de matéria prima e ainda há grande potencial de expansão do setor. Segundo Milanez et al. (2018), os resíduos agroindustriais são responsáveis por três quartos do potencial de matéria prima disponível para a produção de biogás no Brasil, porém atualmente, representam apenas 25% do substrato utilizado, deixando claro assim o quanto ainda é possível se explorar e crescer no aproveitamento desse biocombustível.

2.5 PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS

O biogás, como citado anteriormente, apresenta como principal constituinte o gás metano e o dióxido de carbono. Há ainda a presença de outros gases como o vapor de água, siloxinas, gás sulfídrico, entre outros em pequenas proporções (IANNICELLI, 2008).

As propriedades combustíveis do biogás se devem a presença do metano e por isso quanto maior a concentração desse gás, maior o poder calorífico do biogás. Segundo Iannicelli (2008), o poder calorífico inferior (PCI) aproximado para o biogás com uma contração de 60% de metano é de 5500 kcal/m³. A tabela 3 apresenta o peso específico do biogás e seu PCI para diferentes concentrações de metano e dióxido de carbono.

Tabela 3 -Peso específico e PCI do biogás para diferentes concentrações de metano e dióxido

Composição Química do Biogás	Peso Específico (Kg/Nm³)	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	Poder Calorífico Inferior (kcal/Nm³)
10% CH ₄ , 90% CO ₂	1,8393	465,43	856,066
40% CH ₄ , 60% CO ₂	1,4643	2338,52	3424,29
60% CH ₄ , 40% CO ₂	1,2143	4229,98	5136,46
65% CH ₄ , 35% CO ₂	1,1518	4831,14	5564,50
75% CH ₄ , 25% CO ₂	1,0268	6253,01	6420,59
95% CH ₄ , 5% CO ₂	0,7768	10469,60	8132,78
99% CH ₄ , 1% CO ₂	0,7268	11661,02	8475,23

Fonte: LIMA e PASSAMANI, 2012

O PCI do biogás se aproximado PCI de outros gases já bastante utilizados atualmente como o gás natural por exemplo, que também é constituído principalmente por gás metano e pequenas frações de outros gases. Conforme Iannicelli (2008), o biogás é um gás incolor e de baixa densidade, por isso apresenta baixo risco de explosão em caso de vazamentos se comparado a gases como o butano e o propano, porém exatamente por essa característica de baixa densidade, é um gás que ocupa grande volume e é de difícil compressão e liquefação, dificultando assim seu armazenamento, transporte e utilização. A tabela 4 apresenta o PCI do biogás com 65% de metano e o PCI de outros gases para comparação.

Tabela 4 - Poder calorífico do biogás e de outros gases comumente usados

Gás	P.C.I. (kcal/Nm ³)
Metano	8500
Propano	22000
Butano	28000
Gás de Coqueria	4400
Gás de Cidade	4000
Gás Natural	8554
Biogás	5500

Fonte: IANNICELLI, 2008

Como podemos notar, o PCI do metano é bem próximo ao do gás natural. Dessa forma, no processo de produção do biogás, quanto maior a proporção de metano em sua composição, melhor será seu desempenho como biocombustível, fazendo-se necessário o processo de purificação para eliminar os gases que não são úteis.

A densidade do biogás é apresentada na tabela 5, conjunta a densidade do gás natural e do gás liquefeito de petróleo.

Tabela 5 -- Densidade do biogás e alguns outros gases

Gás	Densidade (kg/m ³)	Condições de Temperatura e Pressão
Biogás	1,20	T = 20 °C e P = atm
Gás Natural	0,60	T = 20 °C e P = atm
Gás Liquefeito de Petróleo	2,10	T = 15 °C e P = atm

Fonte: IANNICELLI, 2008

Nota-se que a densidade do biogás é inferior a do gás liquefeito de petróleo, mas é superior a do gás natural. Assim, mesmo apresentando um PCI inferior ao do gás natural, sua maior densidade permite que o biogás substitua o gás natural sem grandes alterações de desempenho, além disso, maiores proporções de metano no biogás elevam o valor de seu PCI e tornam o biogás ainda mais parecido ao gás natural de origem fóssil.

Ainda segundo Iannicelli (2008), o biogás não é um gás tóxico pois apresenta baixos teores de monóxido de carbono, (CO), porém é um gás corrosivo devido principalmente a presença de gases como o sulfeto de hidrogênio (H₂S), que mesmo em pequenas

concentrações pode corroer entre outros materiais, o cobre, o latão e o aço. Concentrações elevadas desse gás, da ordem de 1%, podem conferir ainda características tóxicas e mortais ao biogás, sendo incomum que isso aconteça, além disso, processos de filtragem e purificação podem ser feitos para reduzir a concentração do sulfeto de hidrogênio do biogás. Outro motivo para a realização de tais processos de purificação do biogás para remoção desse gás é que sua combustão gera o dióxido de enxofre (SO_2), gás altamente tóxico e poluente.

O vapor de água e o amoníaco também podem gerar problemas de corrosividade, além de este último também gerar gases tóxicos, como óxidos de azoto, quando submetido ao processo de combustão. Os outros gases presentes no biogás não representam ameaças no sentido de toxicidade ou nocividade, sendo apenas o dióxido de carbono um problema por reduzir seu poder calorífico a medida que sua concentração aumenta, além disso, aumenta o volume necessário para seu armazenamento (IANNICELLI, 2008).

2.6 BIOCOMBUSTÍVEL

O aproveitamento energético do biogás pode ser feito através de diversas maneiras sendo a conversão em energia térmica e energia mecânica suas principais formas de uso atualmente. Seus principais usos são apresentados na figura 11.

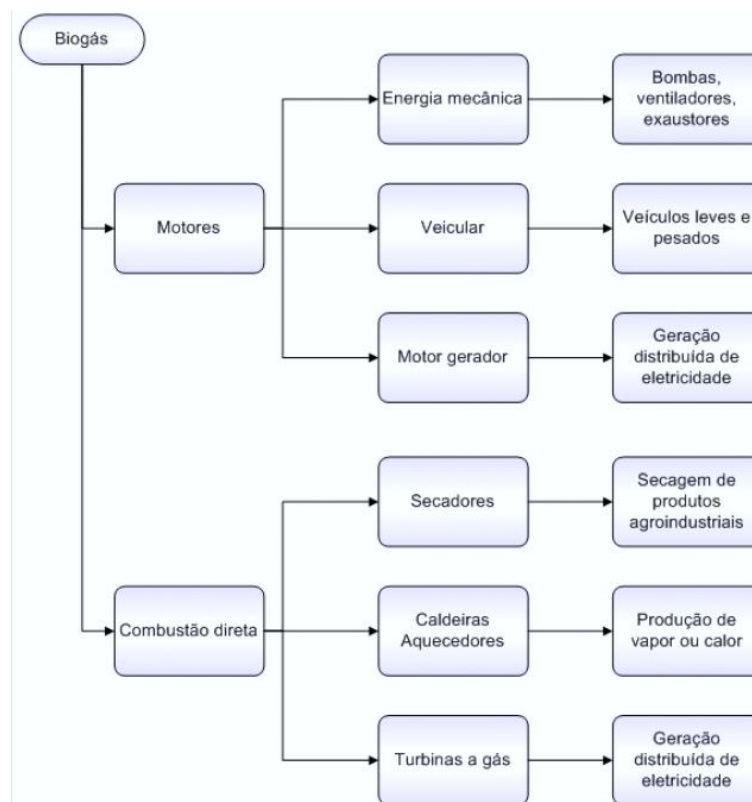


Figura 11 - Principais possibilidades de utilização do biogás
Fonte: SOUZA, 2016

Segundo Lima e Passamani (2012) o biogás pode ser utilizado em praticamente qualquer aplicação onde o gás natural já é ou pode vir a ser aplicado. Entretanto, para algumas aplicações, podem ser necessários tratamentos de purificação para a remoção da umidade e alguns componentes potencialmente tóxicos.

Suzuki et al., (2011) acrescenta ainda que, para a utilização do biogás como combustível de motores, turbinas ou microturbinas, são necessários conhecer parâmetros como sua vazão, composição química e poder calorífico. Tais parâmetros permitem determinar o real aproveitamento do biogás para a geração de eletricidade, além de determinar quais processos de pré tratamentos serão necessários para melhorar as características do biogás.

Milanez et al., (2018) aponta como a principal aplicação comercial para o biogás a produção de energia elétrica através de sua queima em motogeradores, além da produção de biometano para a substituição do gás natural e sua queima para produzir energia térmica.

O aproveitamento do biogás para a produção de energia térmica pode ser feito através de sua queima direta para aquecimento de caldeiras e em aquecedores, além de poder

ser utilizado como substituto ao gás de cozinha e em outros sistemas de aquecimento doméstico (MILANEZ et al., 2018).

Segundo Suzuki et al., (2011) os motogeradores movidos a biogás podem operar no ciclo Otto ou diesel. No primeiro caso as modificações necessárias no motor são poucas e relativamente simples pois o motor é originalmente projetado para operar com uma mistura ar/combustível e ignição por centelha. A maior modificação necessária é, caso o motor seja originalmente movido a um combustível líquido, a substituição do sistema de injeção por um misturador de biogás ao ar de admissão. Ajustes no ponto de ignição são necessários devido ao processo de combustão do biogás ser mais lento que o dos combustíveis líquidos, além disso, um aumento na taxa de compressão pode melhorar o desempenho do motor com relação ao consumo de combustível e potência gerada, sendo essa modificação permanente e que impede o uso do combustível original no motor.

Os motores que operam no ciclo diesel podem ser convertidos diferentes maneiras, sendo a primeira delas para a utilização apenas do biogás como combustível, realizando uma "ottolização" do motor, ou seja, o ciclo diesel é alterado e seu funcionamento passa a ser no princípio do ciclo Otto. Nessa conversão é necessário um grande número de modificações no motor, como a remoção da bomba injetora e do bico injetor e a substituição desses componentes por um sistema elétrico completo composto por bobina de ignição, velas de ignição, distribuidor, entre outros, que tornam a adaptação complexa e onerosa (PEREIRA et al., 2005).

O outro processo de conversão é com a utilização do biogás como combustível principal, injetado e comprimido junto ao ar da admissão, e em maior quantidade que o combustível líquido, no caso o diesel, que é usado apenas para dar início ao processo de combustão (SANTOS et al., 2016). Segundo Suzuki et al. (2011) a velocidade de combustão mais lenta do metano como combustível é mais bem aproveitada em motores diesel, tornando estes mais propícios a conversão para biogás. Esse tipo de motor, chamado também de *Diesel Dual Fuel* será abordado em mais detalhes em capítulos posteriores.

O biogás pode ainda ser usado como combustível em outros tipos de motores ou geradores, como turbinas a gás e microturbinas, que quando operadas em processos com cogeração de eletricidade e calor apresentam maior eficiência global se comparados a motores a combustão interna (SUZUKI et al., 2011).

Uma vantagem do biogás em relação a outras fontes de energia renovável, como o a eólica ou solar, é a possibilidade de ser produzido continuamente. Enquanto houver substrato e um meio anaeróbico, o biogás será produzido, podendo ser estocado tanto em forma de

matéria prima como em biogás ou biometano comprimido e mantendo um custo relativamente baixo (MILANEZ et al., 2018). Além disso, graças a sua estabilidade, o biogás pode ser usado como reserva de energia para momentos de pico ou nos intervalos onde as outras fontes de energia não produzem energia suficiente para abastecer o mercado, como momentos de poucos ventos, a noite ou dias de pouca incidência solar e também em períodos de seca prolongados, quando o nível de água dos reservatórios baixa e a energia das hidroelétricas se torna mais cara.

Outra grande vantagem do biogás se deve pela abundante oferta de substrato com as mais diversas origens, onde tanto as pequenas fazendas e propriedades rurais, quanto as fazendas de grande porte e altas produções, as indústrias de diversas áreas, os centros urbanos e cidades, entre outros, poderiam ter centrais geradoras de biogás e geradoras de energia, aproveitando os resíduos orgânicos da produção agrícola ou os resíduos sólidos urbanos para geração de eletricidade (SOUZA, 2016). A descentralização da produção de energia pode reduzir os custos de geração, transmissão e distribuição da mesma, além de estimular o crescimento e desenvolvimento da população.

Apesar de ainda pouco utilizado, o biogás, ou biometano, figura como um dos mais promissores biocombustíveis, principalmente no Brasil. Segundo dados da Associação Brasileira de Biogás e Biometano (Abiogás) o potencial teórico de produção de biogás é de 80 milhões de m³ ao dia, equivalentes a 24% da demanda elétrica do país ou 44% do óleo diesel consumido (MILANEZ et al., 2018).

A EPE realizou pesquisas e estimou que no ano de 2026 haveria uma produção de 8,4 bilhões de Nm³ de biogás. Considerando-se que esse biogás seja constituído por 55% de metano e que 1 m³ de metano tem equivalência energética a 1 litro de óleo diesel, no ano de 2026 haveria uma produção de 4,6 bilhões de Nm³ de metano, que correspondem a 4,6 milhões de litros de diesel sendo isso quase metade da demanda estimada para tal ano (MILANEZ et al., 2018).

Diversos autores já testaram e comprovaram a viabilidade do uso do biogás como forma de geração de energia das mais variadas maneiras e com os mais diversos substratos.

OLIVEIRA e MARTINS (2011), FACCO e SANTOS (2012) e SOUZA et al. (2004) utilizaram biogás proveniente da suinocultura em motores a combustão interna acoplados a geradores para produzir eletricidade a um custo inferior a disponível na rede convencional.

ESPERANCINI et al., (2007) utilizou o biogás produzido através de dejetos de animais para substituir o gás liquefeito de petróleo (GLP) utilizado para cocção de alimentos e

para aquecer água em substituição a energia elétrica, comprovando sua viabilidade econômica para tal fim.

SOUZA et al., (2010) também conseguiu operar um motogerador com substituição total do combustível original por biogás encontrando valores maiores de potência gerada, mas com uma menor tensão e rendimento (8,22% para o biogás contra 12,14% da gasolina).

DALPAZ (2019) utilizou o biogás produzido em uma planta piloto com diferentes proporções de metano para alimentar um motogerador com sistema adicional de cogeração e produzir energia elétrica e térmica simultaneamente, conseguindo uma eficiência total superior a 50% em todos os ensaios.

COELHO et al., (2006) comparou a viabilidade da geração de energia elétrica com a utilização de biogás proveniente do tratamento de esgoto aplicado em motogeradores e microturbinas, e embora tenha encontrado um menor impacto ambiental para a produção da energia pela microturbina, esta apresentou custo de aquisição e manutenção superior ao do motogerador, além disso, o biogás usado como combustível para a microturbina precisa de uma série de pré tratamentos que encarecem o valor final da energia produzida.

IANNICELLI (2008) apresenta em seu estudo a viabilidade do uso do biogás produzido através dos resíduos de uma indústria cervejeira como combustível em quatro diferentes projetos: O aproveitamento e a utilização de biogás purificado como combustível de empilhadeiras, utilização do biogás em turbinas e motores a combustão interna com sistemas de cogeração para geração de energia térmica e elétrica, queima do biogás para geração de energia térmica em caldeiras de vapor e a utilização do biogás com sua queima direta no local em motogeradores ali instalados, apresentando para este projeto o menor custo de instalação, manutenção e o menor período de *payback* do projeto.

Todas essas obras, entre diversas tantas outras já publicadas, evidenciam o potencial de aproveitamento do biogás como combustível, realizando com sucesso no ponto de vista econômico e ecológico, a substituição de combustíveis fósseis e poluentes por esse biocombustível.

3 BIODIESEL

O biodiesel é um biocombustível líquido que pode ser obtido através de fontes de origem animal ou vegetal, e que como o nome sugere, apresenta características físicas e químicas próximas ao diesel combustível convencional. Tais proximidades permitem que o biodiesel seja misturado ao diesel ou até mesmo substituí-lo completamente nos processos de combustão dos motores de combustão interna por compressão, conhecidos simplesmente como motores a diesel. Neste capítulo serão apresentadas as principais características do biodiesel e comparadas as características do diesel convencional, além disso, serão apresentadas as etapas de fabricação, matérias primas e algumas outras informações relevantes sobre o mesmo.

3.1 INTRODUÇÃO

As fontes de energia derivadas de biomassa vêm ganhando cada vez mais importância no cenário nacional e internacional, e figuram entre as mais interessantes e viáveis economicamente o biogás, o biodiesel e o álcool. (RAMOS et al., 2017).

Entre as fontes de biomassa disponíveis, óleos e gorduras de origem animal e principalmente vegetal são os mais utilizados como matéria prima para a produção do biodiesel. O desenvolvimento e a utilização do biodiesel como combustível favorece o desenvolvimento socioeconômico para a região produtora pois cria toda uma cadeia produtiva ligada ao cultivo de oleaginosas e favorece a balança comercial nacional, reduzindo a necessidade de importação de combustíveis não renováveis (RAMOS et al., 2017).

De acordo com a lei N°11.097, de 13 de janeiro de 2005, considera-se por Biodiesel um “biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna com ignição por compressão ou, conforme regulamento, para geração de outro tipo de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil.”

Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP), o biodiesel é um combustível de monoalquilésteres de ácidos graxos de cadeia longa derivados de óleos vegetais ou de gorduras animais e pode ser obtido através de diversas maneiras, como o craqueamento, a esterificação direta ou a transesterificação.

Embora pareça recente, estudos sobre o uso de óleos vegetais em motores a combustão interna já são feitos a muito tempo. No Brasil os primeiros testes com óleos de

origem vegetal em substituição a combustíveis fósseis foram feitos pouco após a primeira guerra mundial por motivos de segurança nacional. Esses estudos resultaram na criação do programa Pro-óleo na década de 70, onde foram testados diversos óleos de diversas fontes vegetais, além disso, a partir desses testes chegou-se aos ésteres metílicos de óleos vegetais obtidos pelo processo de transesterificação, atualmente conhecidos como biodiesel, e suas vantagens em relação aos óleos vegetais propriamente ditos, como menor viscosidade, maior fluidez e melhores propriedades combustíveis (RAMOS et al., 2017).

O lançamento do biocombustível encontrado por esses testes aconteceu no Centro de Convenções de Fortaleza, em 1980 e foi chamado na época de PRODIESEL, que continuou sendo testado ao longo do ano de 1981 e 1982 por diversos fabricantes de motores a diesel nacionais. Porém, ao final do ano de 82, por diversas razões, entre elas a redução do preço no barril de petróleo e o desinteresse de outras empresas em investirem no projeto, o PRODIESEL foi abandonado e os testes no Brasil se encerraram (PARENTE, 2003).

Ao final dos anos 90, o biodiesel foi trazido de volta ao cenário nacional com a utilização de cerca de 80 mil litros de biodiesel de soja na frota de ônibus urbanos de Curitiba, com a adição de 20% de biodiesel ao diesel de origem fóssil. Os testes foram realizados ao longo de três meses consecutivos e ao final do período foi analisada uma redução superior a 35% na emissão de fumaça pelos veículos submetidos ao diesel B20 em comparação aos veículos abastecidos apenas com diesel (RAMOS et al., 2017).

Desde então, diversos programas do governo foram criados para estimular a produção e utilização do biodiesel, como o Programa Nacional de Biocombustíveis, em 2002, que tinha como objetivo inicial facultar o uso de até 5% de biodiesel no diesel comum comercializado (RAMOS et al., 2017). Logo em seguida, em 2003 foi criado o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), visando também a criação de novos empregos e a melhora na renda de famílias humildes e em sequência a criação da Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel, (RBTB), em 2004. (PORTAL DO BIODIESEL, 2007).

O Brasil apresenta um cenário extremamente favorável para a produção de biodiesel por diversas razões, entre elas a grande extensão de terra de seu território e o clima favorável ao cultivo de diversas sementes oleaginosas, matéria prima principal para o biodiesel, além disso, o sebo animal também é fonte abundante devido a grande produção agropecuária e também pode ser usado como matéria prima para o biodiesel.

Segundo Ramos, apenas entre os anos de 2005 e 2014, graças ao PNPB, o biodiesel representou 2,7% do diesel consumido, sendo misturado diretamente a este, e 20% do diesel

que viria a ser importado, gerando uma economia de R\$ 11 bilhões de dólares em importações. Outra consequência positiva do uso do biodiesel é a redução da emissão de gases de efeito estufa e a redução na emissão de material particulado e fuligem. Esses benefícios ambientais e econômicos só tendem a aumentar com a adição de porcentagens cada vez maiores de biodiesel ao diesel de origem fóssil.

O Greenpeace realizou projeções e afirma que o Brasil pode ter sua matriz energética composta com mais de 90% de fontes de energia renováveis de diversas naturezas até 2050, entre essas, a energia proveniente do uso do biodiesel, além das já existentes hidroelétricas, e de programas de utilização de combustíveis derivados da cana, também o biogás e outras. A diversificação da matriz energética brasileira, associada a pesquisas de novos combustíveis e novas fontes de energia renováveis contribuirão para um país cada vez mais desenvolvido e independente de recursos naturais finitos, além de melhorar a saúde das pessoas pela melhora da qualidade do ar e conservação do meio ambiente

3.2 PRODUÇÃO

Ha diversos processos químicos possíveis para a fabricação do biodiesel, como a esterificação, interesterificação, a transesterificação, além de processos chamados híbridos, utilizados quando se usam matérias primas complexas e específicas, como o processo de esterificação e transesterificação simultâneos, ou a esterificação seguida pela transesterificação e o processo de hidroesterificação. Cada processo apresenta suas vantagens e desvantagens e são escolhidos principalmente em virtude das características e qualidade da matéria prima usada (RAMOS et al., 2017).

A transesterificação é atualmente a mais comum forma de obtenção do biodiesel, onde acontece a reação química envolvendo lipídios, gorduras ou óleos, de origem animal ou vegetal, com um álcool, geralmente os de cadeia curta como etanol ou metanol, na presença de um catalisador básico ou ácido (FERRARI et al., 2005). Um fluxograma simplificado da produção de biodiesel pelo processo de transesterificação é apresentado na figura 12.

Fluxograma do Processo de Produção de Biodiesel

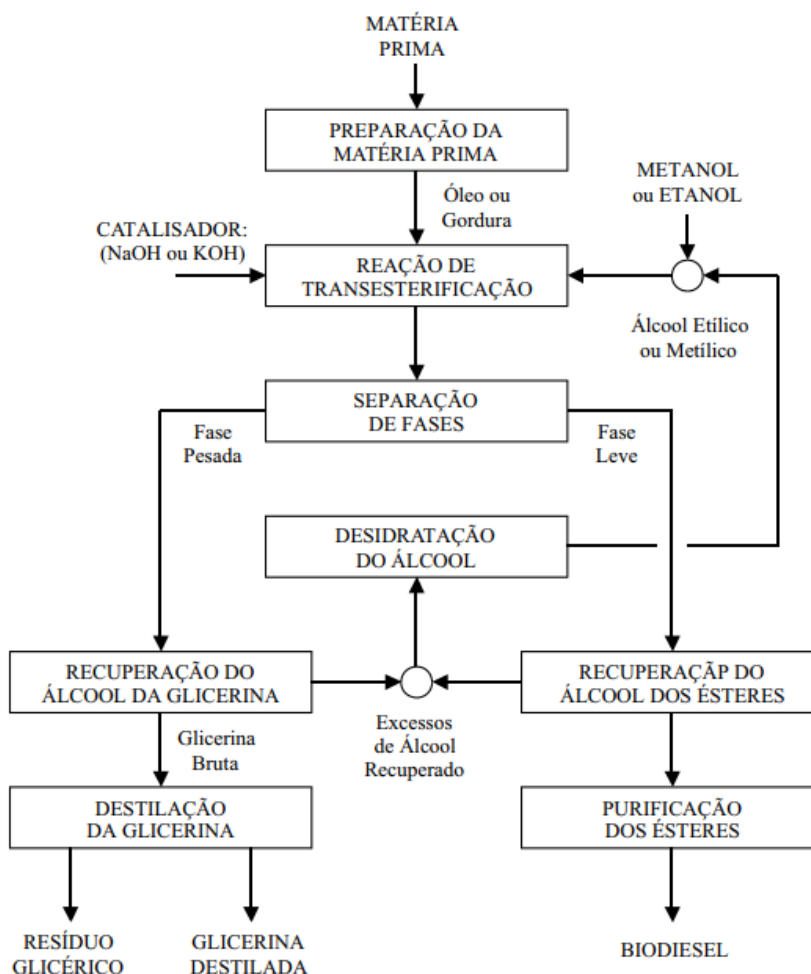


Figura 12 - Fluxograma do processo de produção do biodiesel por transesterificação
 Fonte: Parente, 2003

Durante o processo, um mol de triacilglicerídeo reage com três mols de álcool e produz três mols de monoésteres graxos e um mol de glicerina. O álcool mais usado no processo é o metanol, que embora seja comumente obtido através do petróleo, ainda apresenta um custo inferior ao etanol de cana, além disso, há outras vantagens do uso de metanol no processo, como a menor temperatura necessária para a reação e para a recuperação do álcool remanescente do processo (RAMOS et al., 2017).

Algumas das diferenças entre a rota metílica e etílica para a produção de biodiesel são apresentadas na tabela 6. (PARENTE, 2003)

Tabela 6 -Comparação entre a rota metflica e etflica na produção de biodiesel por transesterificação

Quantidades e condições usuais médias aproximadas	Rota metflica	Rota etflica
Quantidade consumida de álcool por 1000 litros de biodiesel	90 kg	130 kg
Preço médio do álcool, US\$/kg	190	360
Excesso recomendado de álcool, recuperável, por destilação, após a reação	100%	650%
Temperatura recomendada de reação	60 °C	85 °C
Tempo de reação	45 minutos	90 minutos

Fonte: Parente, 2003

O biodiesel produzido com álcool metflico é constituído por ésteres metflicos, enquanto o produzido com álcool etflico é constituído por ésteres etflicos. Embora apresentem composições químicas diferentes as propriedades químicas e físicas são consideradas equivalentes e ambos podem ser chamados de biodiesel.

Um subproduto da reação química é a glicerina, correspondendo a aproximadamente 10% da massa obtida de biodiesel. Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética, apenas no ano de 2018 foram produzidos 0,5 milhão de toneladas de glicerina bruta, das quais 292 mil toneladas foram exportadas, principalmente para a China, gerando uma receita de 97,8 milhões de dólares. O glicerol, que se caracteriza por uma glicerina refinada, também tem grande valor no mercado internacional, por isso, usinas produtoras de biodiesel estão instalando equipamentos para refino em suas instalações visando maiores receitas. Há outros subprodutos da produção do biodiesel, como por exemplo, a torta e o farelo, produtos da moagem das sementes, também podem receber tratamentos posteriores e se tornar outra forma de renda aos produtores, servindo de ração para animais ou para a adubação (EPE, 2018).

A matéria prima é responsável por até 85% do custo de produção do biodiesel, enquanto os custos com energia, catalisadores e álcool, em plantas de grande porte, não costumam superar os 10%. As propriedades físicas e químicas das matérias primas também são de extrema importância, pois, afetam diretamente a qualidade e as propriedades combustíveis do produto final, além de serem decisivas na escolha do processo de fabricação e no rendimento do mesmo, influenciando assim diretamente o custo de produção do biodiesel (RAMOS et al., 2017).

Entre as várias matérias primas para a produção do biodiesel, no Brasil as mais comuns são a soja, a mamona, o milho, o girassol, o pinhão manso, a canola, o babaçu, o caroço de algodão, o dendê, o muriti, a macaúba, além das de origem animal como o já bastante utilizado sebo bovino, gorduras de aves e suínos. Podem-se usar também óleos de descarte, óleos de peixe, óleos residuais da cozinha e de fritura, que apresentam custos inferiores à produção dedicada de vegetais, além de outras menos comuns como as microalgas e outros microrganismos oleíferos, onde estes que tem ganhado a atenção especial dos pesquisadores por trazer diversas vantagens na produção, rendimento e na captura de carbono da atmosfera. (RAMOS et al., 2017).

Segundo Parente (2003), as matérias primas podem ser separadas por sistema de grupos e suas origens. A tabela 7 faz essa separação em grupos e adiciona a forma de obtenção do óleo de tais matérias primas.

Tabela 7 - Grupos, origens e métodos de obtenção para a produção de biodiesel

Grupo: Óleos e gorduras animais	Grupo: Óleos e gorduras vegetais	Grupo: Óleos residuais de frituras	Grupo: Matérias graxas de esgotos
Origens: matadouros, frigoríficos e curtumes	Origens: Agriculturas temporárias e permanentes	Origens: Cocção, comercial e industrial	Origens: Águas residuais das cidades e de certas indústrias
Obtenção: Extração com água e vapor	Obtenção: Extração mecânica, com solventes ou mista	Obtenção: Acúmulo e coleta	Obtenção: Processos em fase de pesquisa e desenvolvimento

Fonte: Adaptado de Parente, 2003.

Apenas entre os anos de 2005 e 2018 foram produzidos 34,7 bilhões de litros de biodiesel no Brasil, fazendo do nosso país o segundo maior produtor do mundo, atrás apenas dos Estados Unidos, e a frente de diversos países europeus onde o uso do biodiesel já é difundido a anos, como Alemanha, Itália e França. O consumo do biodiesel também vem subindo constantemente, com um salto de 26,7% do ano 2017 para o ano 2018, chegando a 5,4 bilhões de litros.

Segundo o Ministério de Minas e Energia em parceria com a Empresa de Pesquisa Energética, no ano de 2018, as principais matérias primas usadas na produção do biodiesel no

Brasil foram a soja e a gordura animal, principalmente o sebo bovino, correspondendo a 69,8% e 13,4% respectivamente, outros 16,8% correspondendo a outras fontes variadas, como pode ser observado na figura 13.

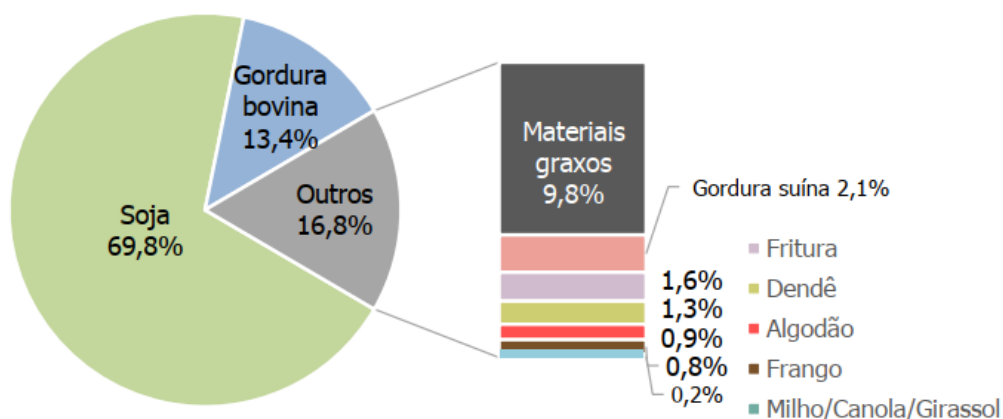


Figura 13 - Principais matérias primas para a produção do biodiesel brasileiro em 2018
Fonte: Empresa de Pesquisa Energética, 2019

As misturas de biodiesel ao diesel recebem o nome de acordo com a sua proporção de biodiesel, seguindo um modelo BX, onde o X representa a porcentagem de biodiesel presente na mistura, como por exemplo, B2 para diesel com inclusão de 2% de biodiesel chegando até o B100, que seria o próprio biodiesel 100% puro aplicado.

3.3 PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS

A ANP é o órgão responsável pela regulamentação da produção e distribuição do biodiesel no Brasil, bem como de suas características e padrões de qualidade e propriedades físicas e químicas, seguindo as normas nacionais da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e os padrões internacionais do *Comité Européen de Normalisation* (CEN) e *American Society for Testing and Materials* (ASTM) (RAMOS, et al., 2012).

A resolução ANP N°45, de 25/08/2014, alterada pela resolução ANP N° 798, de 01/08/2019, estabelece as principais características e valores limite para algumas das propriedades físicas e químicas do biodiesel comercializado no Brasil, assim como o método utilizado para medição. Tais valores e características são exibidos na tabela 8.

Tabela 8 - Principais propriedades do Biodiesel

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE	MÉTODO		
			ABNT NBR	ASTM D	EN/ISO
Aspecto	-	Límpido e isento de impurezas	-	-	-
Massa específica a 20° C	kg/m ³	850 a 900	7148	1298	EN ISO 3675
			14065	4052	EN ISO 12185
Viscosidade Cinemática a 40°C	mm ² /s	3,0 a 6,0	10441	445	EN ISO 3104
Teor de água, máx.	mg/kg	200	-	6304	EN ISO 12937
Contaminação Total, máx.	mg/kg	24	15995	-	EN12662
Ponto de fulgor, mín.	°C	100	14598	93	EN ISO 3679
Teor de éster, mín	% massa	96,5	15764	-	EN 14103
Cinzas sulfatadas, máx.	% massa	0,02	6294	874	EN ISO 3987
Enxofre total, máx.	mg/kg	10	15867	5453	EN ISO 20846
					EN ISO 20884
Corrosividade ao cobre, 3h a 50 °C, máx.	-	1	14359	130	EN ISO 2160
Número Cetano	-	Anotar	-	613	EN ISO 5165
				6890	
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	-9	14747	6371	EN 116
Índice de acidez, máx.	mg KOH/g	0,5	14448	664	EN 14104
Glicerol livre, máx.	% massa	0,02	15771	6584	EN 14105
			15908	-	EN 14106
Glicerol total, máx.	% massa	0,25	15344	6584	EN 14105
			15908	-	
Metanol e/ou Etanol, máx.	% massa	0,2	15343	-	EN 14110
Estabilidade à oxidação a 110°C, mín.	hora	6	-	-	EN 14112
		12	-	-	EN 15751

Fonte: ANP, 2014

Como pode ser observado na tabela 8, as propriedades físicas e químicas do biodiesel são muito semelhantes ao óleo diesel de petróleo, embora possam sofrer algumas variações, principalmente em função da composição de porcentagem dos ácidos graxos da matéria prima, daí se faz a importância da escolha correta da mesma bem como do processo de fabricação do biodiesel. O biodiesel é completamente miscível no diesel convencional, o que

facilita muito sua mistura e utilização em motores a diesel convencionais sem a necessidade de grandes e onerosas adaptações. Recentemente, em março de 2021, foi autorizado pela ANP, conforme estabelecido pela Resolução CNPE nº 16, de 29 de outubro de 2018 e o Despacho ANP nº 621, de 06 de agosto de 2019, o acréscimo de mais um ponto percentual de biodiesel ao diesel convencional, passando dos 12% para 13%, caracterizando uma mistura conhecida como B13 segundo a nomenclatura convencional. Segundo o cronograma o percentual deverá continuar aumentando 1% ao ano até o percentual máximo de 15% no ano de 2023.

Pode-se destacar a importância de algumas propriedades e compará-las as propriedades do diesel de origem fóssil. Segundo Ramos et al., (2012), destacam-se a massa específica, a viscosidade, o teor de enxofre, o ponto de fulgor, o número de cetano, o teor de glicerina livre e total, o teor de acilgliceróis, entre outras.

Flumignam et al., (2012) destaca além dessas propriedades também o teor de sódio e potássio, teor de ésteres, teor de álcool, índice de iodo, ponto de névoa, ponto de entupimento de filtro a frio, ponto de fluidez, estabilidades a oxidação, teor de água, índice de acidez, entre outras, todas com limites definidos pela ANP.

Abaixo serão citadas as principais propriedades físicas e químicas do biodiesel e comparadas as propriedades do diesel de petróleo, destacando aspectos vantajosos ou desvantajosos de cada combustível.

A massa específica do biodiesel é superior a do diesel de petróleo e pode variar de acordo com a matéria prima utilizada em sua fabricação. Quanto maior a massa específica maior a energia fornecida ao motor, porém se não respeitados determinados limites, podem haver problemas de entupimento no sistema de injeção e depósitos na câmara de combustão. (FLUMIGNAM et al., 2012).

A viscosidade do biodiesel é muito importante quando se fala do processo de combustão, sendo influenciada pelo comprimento da cadeia de carbono e seu grau de saturação. A viscosidade também está ligada a lubricidade do combustível, característica de alta importância nos motores que operam no ciclo diesel para seu correto funcionamento. Quanto maior a viscosidade, melhor a lubricidade do combustível, porém viscosidades muito altas acabam por atrapalhar seu funcionamento gerando heterogeneidade na combustão do biodiesel, perda de potência, e perda de rendimento devido a não correta atomização do combustível na câmara de combustão (FLUMIGNAM et al., 2012). Comparando o diesel convencional com o biodiesel regulamentado pela ANP encontramos valores parecidos de

viscosidade, sendo possível por esse aspecto a utilização do biodiesel sem alterações e adaptações no sistema de injeção do motor (RAMOS et al., 2012).

O ponto de névoa, ponto de fluidez e ponto de entupimento de filtro a frio são respectivamente a temperatura em que se pode observar a formação dos primeiros cristais, a temperatura em que o combustível perde sua fluidez e a temperatura que o combustível perde sua filtrabilidade. Essas propriedades estão ligadas diretamente a matéria prima utilizada como base para o biodiesel, bem como ao álcool utilizado no processo de transesterificação. (FLUMIGNAM et al., 2012). As temperaturas citadas são mais altas para o biodiesel que para o diesel de petróleo, o que confere um problema para o biocombustível. Correções podem ser feitas através do uso de aditivos adicionados ao biodiesel, que reduzem as temperaturas a níveis mais aceitáveis, além disso, a maior parte do biodiesel consumido é utilizado misturado ao diesel de petróleo, reduzindo essas características e esse problema (RAMOS et al., 2017).

O índice de cetano, ou NC, é comparável a escala de octanagem da gasolina e serve para descrever a qualidade e velocidade da ignição do diesel ou biodiesel. Uma combustão de boa qualidade significa uma ignição rápida do combustível e uma queima suave e completa do mesmo. O biodiesel leva vantagem nesse aspecto, com o índice de cetano variando de acordo com a matéria prima, mas tendo como valor médio 60 no Brasil (valor aproximado do índice de cetano do biodiesel de soja), enquanto o diesel de origem fóssil apresenta índice que varia entre 42 e 50 (ZUNIGA et al., 2011). O principal motivo para esse índice maior a favor do biodiesel é a presença de uma maior porcentagem de oxigênio em sua composição. (FLUMIGNAM et al., 2012).

Ponto de fulgor, também chamado de flash point, é a temperatura que um combustível líquido libera vapores em quantidade suficiente para se inflamar se houver uma chama ou faísca próxima, mas esta temperatura ainda é abaixo da necessária para que o combustível líquido entre em combustão completamente. Essa propriedade não afeta a combustão do combustível na câmara de combustão, mas serve como fator de segurança, principalmente para transporte, manuseio e armazenamento do combustível. O biodiesel apresenta ponto de fulgor mais alto que a temperatura ambiente e também mais alto que o do diesel de petróleo, significando grande vantagem no quesito de segurança para o biocombustível (ZUNIGA et al., 2011).

O poder calorífico de um combustível é a quantidade de energia disponível por unidade de massa e liberada pelo processo de combustão do mesmo. Para reação de combustão de um combustível líquido em um motor a combustão interna considera-se o poder calorífico inferior, ou PCI, do combustível, pois este considera a combustão completa do

combustível liberando apenas os gases de combustão e vapor de água. O poder calorífico inferior (PCI) diferencia-se do poder calorífico superior (PCS) pela diferença de este último liberar água na forma líquida ao final do processo (ZUNIGA et al., 2011). O poder calorífico do biodiesel é um pouco inferior ao poder calorífico do diesel de petróleo, diferença na ordem de 5% (RAMOS et al., 2012).

O valor do poder calorífico do biodiesel pode variar de acordo com a matéria prima utilizada e com o álcool utilizado. Diferentes literaturas apontam valores diferentes para o poder calorífico do biodiesel, algumas encontrando variações de quase 15% em seu valor se comparado ao do diesel de petróleo. As tabelas 9 e 10 apresentam alguns valores encontrados para o poder calorífico do biodiesel e diesel segundo diferentes autores.

Tabela 9 - Poder calorífico do diesel e biodiesel de diversas origens vegetais

Combustível	Poder calorífico (MJ/kg)	Referência
Diesel	45,31	Ramos et al. (2000)
Biodiesel de algodão	39,85	Ramos et al. (2000)
Biodiesel de pequi	40,15	Ramos et al. (2000)
Biodiesel de babaçu	39,52	Ramos et al. (2000)
Biodiesel de mamona	37,87	Ramos et al. (2000)
Biodiesel de dendê	39,91	Ramos et al. (2000)

Fonte: Adaptado de Ramos et al., 2000

Tabela 10 - Poder calorífico do diesel e biodiesel de diversas origens

Combustível	PCI (MJ/kg)	Referência
Diesel	40,14	Werncke, 2014
Biodiesel de Crambe	36,85	Werncke, 2014
Diesel	41,33	Silva et al. (2012)
biodiesel de gordura de frango	35,39	Silva et al. (2012)
Diesel	42,30	Costa Neto et al. (2000)
Biodiesel de óleo de soja de fritura	37,50	Costa Neto et al. (2000)
Diesel	43,30	Puquevicz et al (2008)
Biodiesel de óleo de soja etílico	37,20	Puquevicz et al (2008)

Fonte: Elaboração própria.

Segundo Ramos et al., (2012), uma grande vantagem do uso do biodiesel como combustível é a não emissão de gases de enxofre, como o monóxido de enxofre ou dióxido de enxofre, ambos tóxicos e poluentes ao meio ambiente e emitidos pela queima do diesel fóssil.

As emissões de óxidos de nitrogênio pela queima de biodiesel são maiores que a combustão do diesel convencionais, parte desse aumento se deve pela matéria prima usada (RAMOS et al., 2012), outra parte pode ser justificada pelo aumento da temperatura na câmara de combustão, efeito que favorece a reação do nitrogênio com o oxigênio e consequentemente a formação dos óxidos de nitrogênio.

A toxicidade e a biodegradabilidade do biodiesel também são melhores que a do diesel convencional, tanto para o solo quanto para o ar, embora ainda tenha efeitos negativos que precisam ser mais bem estudados (FLUMIGNAM et al., 2012).

Um fator negativo do biodiesel e que merece devida atenção é sua susceptibilidade a oxidação quando exposto ao ar, o que dificulta o seu armazenamento e transporte, porém tal característica vem sendo contornada com a utilização de aditivos (RAMOS et al., 2012).

O principal fator determinante da qualidade do biodiesel é seu teor de ésteres, que pode ser entendido como seu grau de pureza, visto que são os ésteres que constituem o biocombustível biodiesel como propriamente dito. Atualmente a ANP regulamenta o teor mínimo de ésteres no biodiesel em 96,5% da massa. Quanto maior a porcentagem de ésteres melhor o rendimento do motor e da combustão gerando menores emissões de gases poluentes (FLUMIGNAM et al., 2012). Como já comentado anteriormente, composição dos ésteres presentes no biodiesel varia de acordo com a matéria prima utilizada, assim como o álcool e o processo de fabricação.

3.4 BIOCMBUSTIVEL

Conhecidas as propriedades físicas e químicas do biodiesel pode-se dizer que o mesmo é uma alternativa viável ao diesel derivado de petróleo. Embora possua menor poder calorífico possui maior densidade, assim um volume de biodiesel equivalente ao de diesel injetado na câmara de combustão acaba por carregar mais moléculas de combustível. Um consumo específico levemente maior é esperado, mas as emissões de gases poluentes e de efeito estufa ainda são menores graças a sua queima mais completa e eficiente, além de não formar compostos SO_x por não carregar enxofre em sua composição.

Há uma farta bibliografia sobre o uso de biodiesel obtido através de diversas origens e matérias primas, diversas rotas de fabricação e em diversas proporções de misturas em motores a diesel com poucas ou as vezes nenhuma adaptação, das quais algumas obras são apresentadas a seguir:

Lopes, (2006) realizou ensaios de desempenho utilizando biodiesel de tucumã em diferentes proporções, desde B0 como referência para valores de potência e consumo, passando por B5, B25, B50, B75 até chegar ao B100. Os testes utilizaram um trator da marca Valtra, modelo BM125I, 4x2 com tração auxiliar (TDA) e potência de 91,9 KW, ou 125cv, a 2300rpm. Foram analisados parâmetros como consumo específico, consumo horário volumétrico, consumo horário ponderal, potência na barra de tração, medida com auxílio de célula de carga, opacidade da fumaça, entre outros. Os resultados obtidos não apontaram variação significativa na potência na barra de tração, o consumo específico aumentou gradativamente com o aumento da porcentagem de biodiesel misturado ao diesel, chegando a ser 16,7% superior quando utilizado B100 com combustível, fator já esperado e que comprova a teoria de que seria necessário mais combustível para realizar o mesmo trabalho, tendo em vista o menor poder calorífico do biocombustível. A opacidade da fumaça diminuiu gradativamente com o aumento da quantidade de biodiesel, chegando a uma redução de 60% quando comparado B0 e B100.

Lopes, (2006) também realizou ensaios utilizando biodiesel de amendoim etílico purificado pelo método de filtração e pelo método de destilação e comparou os resultados com os valores de consumo específico e emissão de gases, além de outras medidas, obtidos através da queima de diesel convencional. Os resultados obtidos pelo autor apontam o aumento do consumo de combustível a medida que a porcentagem de biodiesel diluída no diesel aumenta, principalmente quando a mistura ultrapassa o teor de 25% de biodiesel, havendo até tal porcentagem pouca alteração no consumo. Para substituição de 100% do diesel por biodiesel encontrou-se um aumento de 18% no consumo. O tipo de purificação, por filtração ou destilação, não alterou de forma significativa os dados de consumo, podendo ser considerado equivalente. A emissão de fuligem foi reduzida em quase 50% entre o B0 e B100, novamente havendo diferenças insignificantes em relação a forma de purificação.

Koike et al., (2008) realizaram ensaios em um motor diesel operando com diesel convencional para valores de referência, com biodiesel de soja e operando com biodiesel de soja associado a etanol. Novamente, como esperado, a potência obtida com o motor a plena

carga foi levemente menor que a com o combustível fóssil, assim como novamente o consumo específico de biodiesel foi ligeiramente maior que o consumo de diesel. A explicação do autor novamente recaiu sobre o fato de o menor poder calorífico do biodiesel exigir uma maior injeção de combustível para tentar gerar a mesma potência. A análise dos gases de escape revelou uma diminuição considerável na emissão de HC, o que significa que houve uma queima mais completa do combustível, enquanto a emissão de NO_x aumentou sensivelmente, e a opacidade dos gases melhorou consideravelmente, ambos os resultados de acordo com o esperado.

Outros autores, como Tabile et al., (2009), Silva et al., (2012), Soranso et al., (2008), Castellanelli et al., (2008), Corrêa et al., (2008), Barbosa et al., (2008) e Ferrari et al. (2005) também encontraram resultados semelhantes e satisfatórios para a utilização de biodiesel em diversas proporções e de diversas origens adicionados ao diesel de petróleo. Ressaltando que em alguns ensaios a adição de biodiesel até porcentagens de 20% ou 25%, caracterizando misturas B20 e B25, foram obtidas médias de consumo equivalentes ou melhores inclusive que com o combustível diesel puro, fator que pode ser explicado pela melhor e mais completa combustão do biodiesel, além do leve aumento na viscosidade do combustível. Quando analisadas as emissões de gases pelo escapamento, a maioria dos autores relatou a menor opacidade da fumaça, proporcional a porcentagem de biodiesel adicionada, além da redução na emissão de CO, CO₂, SO_x e HC e aumento na emissão de NO_x.

4 DIESEL

Segundo a ANP o óleo diesel, ou mais comumente chamado apenas de diesel, é um combustível líquido derivado do petróleo e composto principalmente por átomos de carbono e hidrogênio, com cadeias que vão de 8 a 16 carbonos e em menores proporções átomos de enxofre, oxigênio e nitrogênio. É um combustível inflamável, medianamente tóxico, límpido, volátil, isento de material em suspensão e de odor característico.

A ANP separa ainda o óleo diesel em três tipos distintos, separados por sua aplicação e classificação quanto ao teor de enxofre.

- Uso rodoviário, usado em veículos, maquinário agrícola, maquinário de construção e maquinários industriais, com classificação S10 e S500, ou seja, 10 mg/kg e 500 mg/kg de enxofre respectivamente.
- Uso não rodoviário, usado por veículos em mineradoras a céu aberto, transporte ferroviário e de uso estacionário para geração de energia, com classificação S1800 que significa 1800 mg/kg de enxofre no combustível.
- Uso marítimo, específico para embarcações.

As diversas resoluções da ANP sobre o diesel têm como função estabelecer níveis mínimos de qualidade, as propriedades químicas e físicas, bem como teores de substâncias, aditivos, adição de biodiesel, número de cetano, densidade, entre outras características.

O processo de fabricação mais comum para o óleo diesel é a destilação fracionada do petróleo, ou refino, que se baseia na diferença de temperatura de ebulição entre os diferentes componentes do petróleo. A figura 14 apresenta um esquema simplificado do processo de refino do petróleo, bem como a temperatura de separação aproximada dos componentes.

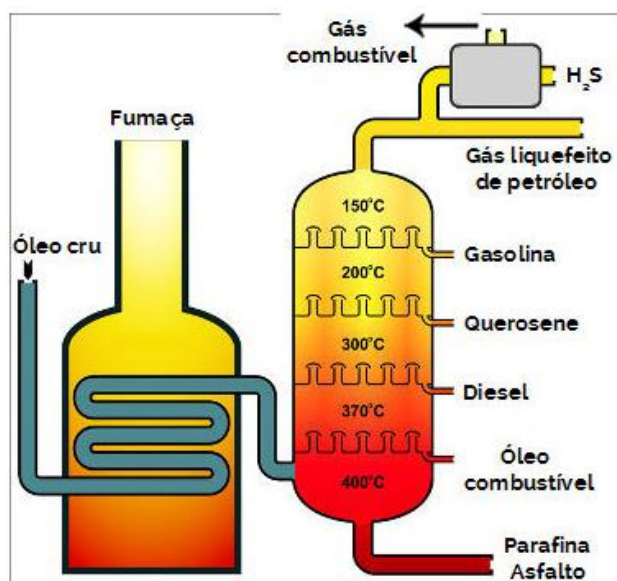


Figura 14 - Processo simplificado do refino de petróleo
Fonte: Brasil escola, 2020

Segundo o Balanço Energético Nacional de 2019, tomando como base o ano de 2018, o óleo diesel foi a segunda maior fonte de energia do país, sendo consumidos 42636 (10^3) tep de óleo diesel, o que representa 16,7% da energia consumida, ficando atrás apenas da eletricidade, com 46045 (10^3) tep e 18% do total consumido (BEN, 2019). A tabela 11 mostra o consumo total de energia por fonte em tonelada equivalente de petróleo, ou tep.

Tabela 11 - consumo energético por fonte

Fonte	Ano	Ano	Unidade: 10^3 tep
	2017	2018	Δ 18/17
Óleo diesel	43.191	42.636	-1,3%
Eletricidade	45.395	46.045	1,4%
Bagaço de cana	29.126	27.529	-5,5%
Gasolina	24.856	21.595	-13,1%
Gás Natural	17.786	19.075	7,2%
Lenha	16.867	16.758	0,4%
Etanol	13.857	15.729	13,5%
GLO	8.304	8.189	-1,4%
Lixívia	6.470	6.918	6,9%
Óleo combustível	2.820	2.156	-23,6%
Querosene	3.299	3.391	2,8%
Outrafontes	28.245	27.416	-2,9%
Total	240.034	237.433	-1,1%

Fonte: Adaptado de BEN, 2019.

O setor que mais consumiu óleo diesel no país foi o setor de transportes, principalmente o setor de transportes de carga rodoviário, que embora não seja a melhor opção, tendo custos de transporte superiores ao ferroviário e hidroviário, é o transporte mais utilizado no país. Ainda segundo (BEN, 2019), 46,3% das emissões de CO₂ do Brasil vieram do setor de transporte, que como citado utilizou como principal combustível o óleo diesel, este com 43,6% de participação.

As principais desvantagens do uso do diesel estão justamente na emissão de gases poluentes em sua combustão. Koslowski et al., (2014) cita em seu artigo alguns desses principais gases de combustão, como óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) e a possível emissão de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPA), além de material particulado, fuligem e fumaça preta. Braun et al., (2003) fala ainda da emissão de aldeídos, amônia, benzeno, cianetos, tolueno, além de compostos de enxofre (SO_x) que se formam no processo de combustão.

Os efeitos da emissão desses gases são diversos, entre eles podemos falar da destruição da camada de ozônio, o aquecimento global, a chuva ácida, além de diversos problemas causados no sistema respiratório dos seres vivos, entre outros.

As principais propriedades do óleo diesel como combustível são próximas as propriedades do biodiesel e são apresentadas de maneira comparativa na tabela 12 (GONÇALVES et al., 2012)

Rossi e Ramos (2000), também fazem uma comparação entre algumas propriedades do diesel convencional, o biodiesel puro obtido com o óleo residual de fritura e a mistura na proporção B20 entre os dois combustíveis. As propriedades encontradas pelos autores são apresentadas nas tabelas 12, 13 e 14.

Tabela 12 - Principais propriedades do biodiesel e diesel como combustíveis

Propriedades	Biodiesel	Diesel
Cetanagem	51 - 62	44 - 47
Lubricidade	Maior que o diesel	Baixo fator de lubricidade
Biodegradabilidade	Alta	Muito baixa
Toxicidade	Não tóxico	Altamente tóxico
Oxigênio	11% de oxigênio livre	Muito baixo
Aromáticos	Não possui	18 - 22%
Enxofre	Nenhum	0,05%
Ponto de névoa	Próxima ao do diesel	-
Contaminação por derramamento	Baixo	Muito alto
Ponto de ignição	148 - 204°C	52°C
Compatibilidade com outros materiais	Degradação natural de polímeros butílicos	Efeito não natural em polímeros butílicos
Transferência e estocagem	Nenhum risco em nenhuma atividade	Altamente perigoso
Valor calorífico	2% maior que o diesel	-
Suprimento	Renovável	Não renovável
Combustível alternativo	Sim	Não
Processo produtivo	Reação química	Reação química e fracionamento

Fonte: GONÇALVES et al., 2012

Tabela 13 - Propriedades do biodiesel de óleo residual de frituras, diesel comercial e mistura B20

Características	Biodiesel puro	Diesel puro	B20
Viscosidade (cSt, 40°C)	5,14	3,05	3,54
Ponto de fulgor (°C)	151	38	34
Ponto de combustão (°C)	191	45	43
Densidade (g/cm³)	0,8828	0,8359	0,8449
Sedimentos	Negativo	Negativo	Negativo
Cloretos e sulfatos	Negativo	Negativo	Negativo
Umidade (ppm)	1390	58	350

Fonte: Rossi e Ramos, 2000.

Tabela 14- Especificações de óleo diesel e do biodiesel de óleo residual de frituras

Características	Óleo diesel	Biodiesel
Densidade 15°C (kg/m³)	0,849	0,888
Ponto inicial de destilação (°C)	189	307
10%	220	319
20%	234	328
50%	263	333
70%	286	335
80%	299	337
90%	317	340
Ponto final de destilação (°C)	349	342
Aromáticos (% v/v)	31,5	-
Carbono (%)	86,0	77,4
Hidrogênio (%)	13,4	12,0
Oxigênio (%)	0,0	11,2
Enxofre (%)	0,3	0,03
Índice de cetano	46,1	44,6
Número de cetano	46,2	50,8
Valor calorífico (MJ/kg)	42,3	37,5

Fonte: Rossi e Ramos, 2000

Segundo os autores apontados e como visto nas tabelas 12, 13 e 14, as principais propriedades do diesel e do biodiesel proveniente de diversas fontes são próximas, por isso o biocombustível pode, em teoria, substituir parcial ou completamente o diesel convencional, sem que isso traga grandes problemas ou sejam necessárias grandes alterações nos motores originais.

5 MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA

Motores a combustão interna são máquinas térmicas que transformam a energia do combustível em trabalho mecânico através do processo de combustão. Esses motores trabalham seguindo ciclos termodinâmicos, onde a maioria dos motores utilizados atualmente opera segundo o ciclo Otto e o ciclo Diesel. O ciclo de funcionamento é o nome dado ao conjunto de transformações na massa gasosa que ocorre no interior dos cilindros, desde a primeira fase, chamada de admissão, passando pela compressão, combustão, expansão e até a última fase, de liberação dos gases (VARELLA e SANTOS, 2010).

Os motores podem ser divididos em três principais partes, sendo elas o cabeçote, o bloco do motor e o cárter. Dentro dessas partes e acoplados ao motor há ainda diversos componentes mecânicos que precisam trabalhar em sincronia para garantir seu perfeito funcionamento. A figura 15 apresenta alguns componentes de um motor a combustão interna (VARELLA e SANTOS, 2010).

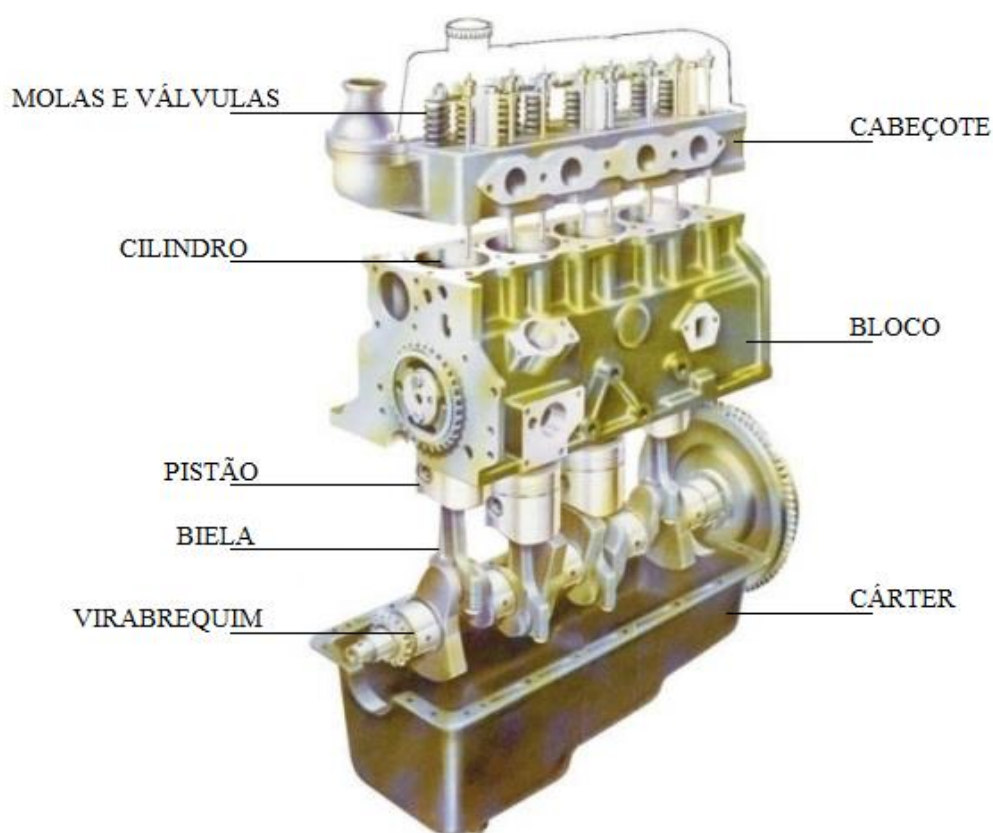


Figura 15 - Motor a combustão interna e alguns componentes
Fonte: Adaptado de VARELLA e SANTOS, 2010

O mecanismo composto por pistão, biela e virabrequim transformam a energia térmica da combustão em energia mecânica, com a rotação de um eixo. O pistão trabalha dentro do cilindro, movendo-se linearmente sempre uma mesma distância chamada de curso, que é a distância entre o ponto morto superior do pistão (PMS) e o ponto morto inferior do pistão (PMI). Acoplado ao pistão encontra-se a biela, em forma de haste, que faz a ligação e transfere o movimento linear do pistão ao virabrequim, que transforma o movimento linear em rotação. O conjunto é evidenciado na figura 16.

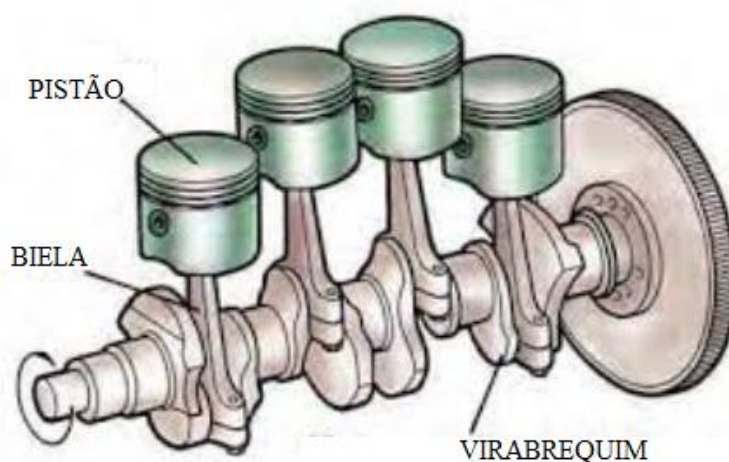


Figura 16 - Conjunto pistão, biela e virabrequim
Fonte: Adaptado de MOREIRA e COUTO, 2019

O ciclo dos motores é composto por quatro fases: Admissão, compressão, combustão e escape e podem ser realizadas em duas ou quatro etapas, ou seja, em dois ou quatro cursos do pistão, caracterizando motores dois ou quatro tempos respectivamente. A diferença entre o funcionamento desses motores está no número de voltas realizadas pelo virabrequim para completar um ciclo completo. Os motores dois tempos realizam o ciclo completo de admissão, compressão, combustão e escape com apenas uma volta do virabrequim, enquanto um motor quatro tempos precisa dar duas voltas para realizar a mesma função (VARELLA e SANTOS, 2010).

Na prática, os motores dois tempos produzem mais potência e são mais simples e leves, em contrapartida, apresentam maior consumo de combustível e maiores emissões de poluentes entre outras desvantagens que restringiram muito seu uso no mundo moderno.

As figuras 17 e 18 demonstram as fases realizadas pelos motores dois tempos e quatro tempos respectivamente.

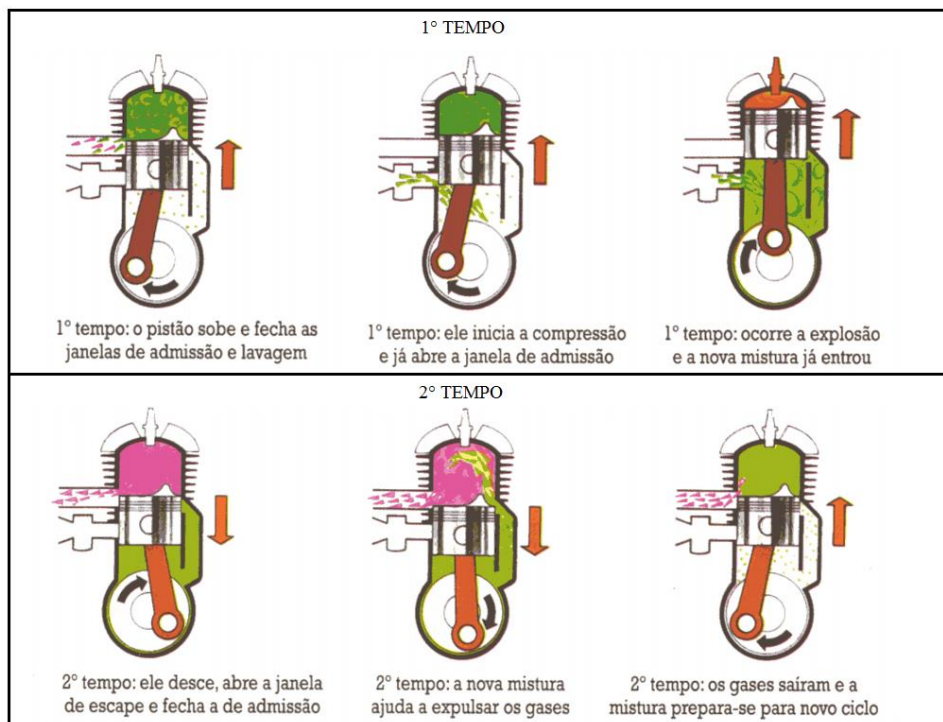


Figura 17 - Ciclos de um motor dois tempos
Fonte: MARTINELLI Jr , 1998

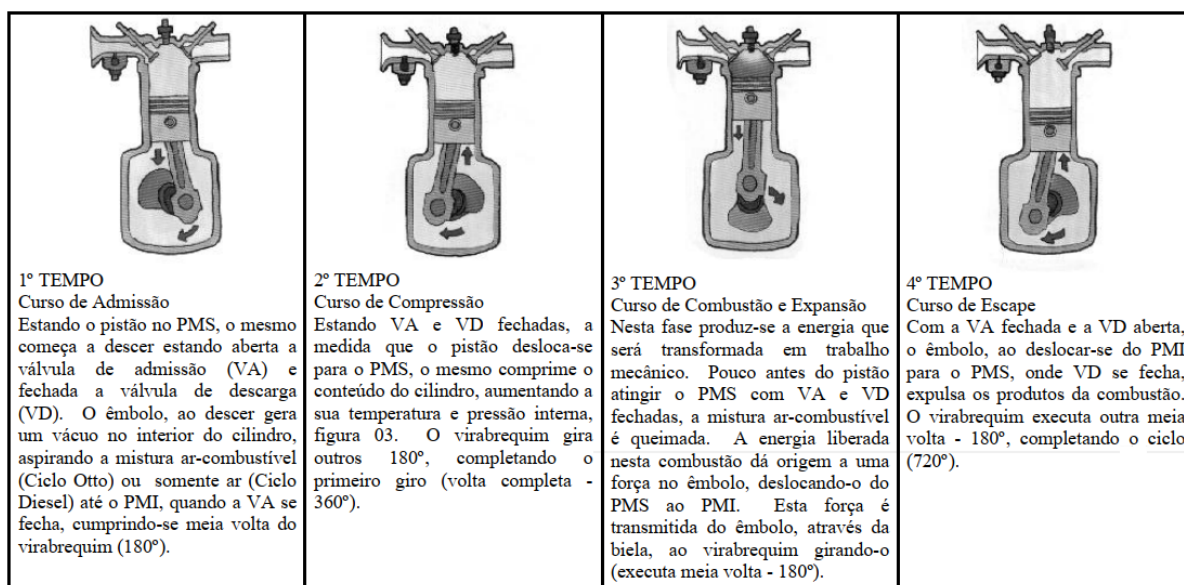


Figura 18 - Ciclos de um motor quatro tempos
Fonte: MARTINELLI Jr , 1998

Os motores quatro tempos são maiores, mais pesados e mais complexos, devido em grande parte ao maior número de peças e componentes móveis dentro do motor, em compensação, os motores quatro tempos realizam uma combustão mais completa do combustível, aproveitando melhor o seu potencial energético, por isso consomem menos combustível, emitem menos gases poluentes e fumaça. Com leis ambientais cada vez mais exigentes, tais fatores são determinantes para a homologação de novos motores atualmente, por isso os motores quatro tempos são mais utilizados, ficando os motores dois tempos restritos a aplicações específicas.

5.1 CICLO OTTO

Os motores que precisam de uma vela de ignição para dar início a combustão, conhecidos também como motores de ignição por centelha, são os motores que operam segundo o ciclo Otto de funcionamento.

O ciclo recebeu esse nome em homenagem a Nikolaus A. Otto, que em 1876 conseguiu criar um motor a combustão interna quatro tempos funcional e bem sucedido seguindo o ciclo proposto em 1862 por Beau de Rochas (VARELLA e SANTOS, 2010).

Nesses motores uma mistura de ar e combustível, seja ele líquido ou gasoso, é admitida durante o processo de admissão, essa mistura é então comprimida num processo de compressão isoentrópica, até o pistão chegar ao PMS, nesse momento uma faísca, gerada pela vela de ignição dá início ao processo de combustão da mistura ar + combustível presente no interior do cilindro, realizando uma expansão isoentrópica até que o pistão atinja o PMI, as válvulas de escape então se abrem para a saída dos gases da combustão enquanto o pistão retorna ao PMS para recomeçar o ciclo (YUNUS e MICHAEL, 2006). Os diagramas $P-v$ real e ideal do ciclo Otto são apresentados na figura 19.

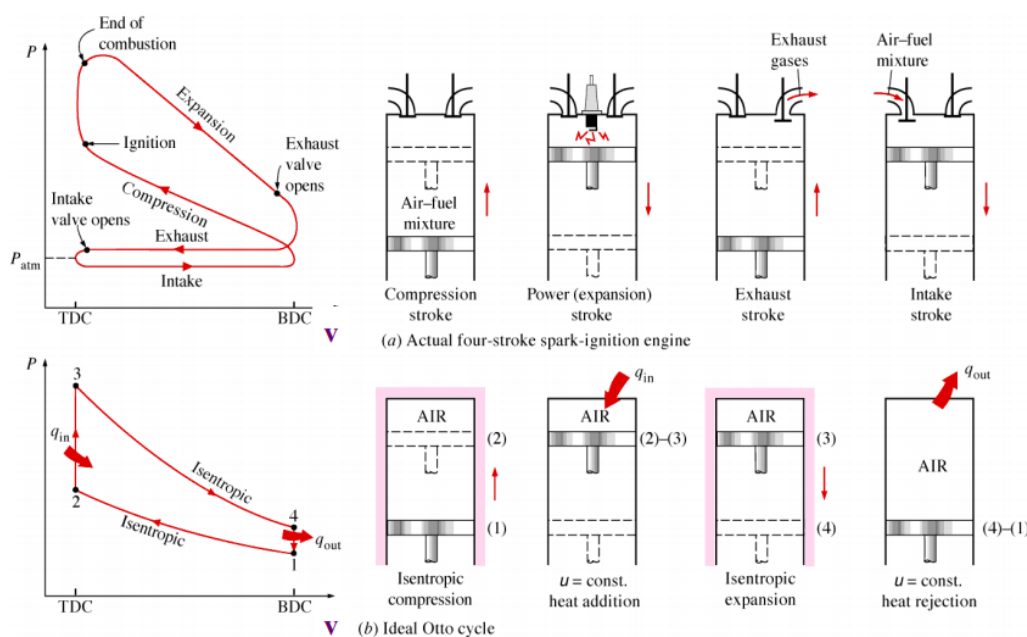


Figura 19 - Diagrama P-v do ciclo Otto real (a) e ciclo Otto ideal (b)
 Fonte: YUNUS e MICHAEL, 2006

A análise termodinâmica do processo real descrito anteriormente é muito complicada, por isso utilizam-se simplificações para descrever as quatro etapas do processo citado anteriormente. As etapas do processo são:

- (1) - (2) Compressão isentrópica
- (2) - (3) Fornecimento de calor a volume constante (q_{in})
- (3) - (4) Expansão isentrópica
- (4) - (1) Rejeição de calor a volume constante (q_{out})

A eficiência térmica do ciclo Otto ideal depende da razão de compressão do motor (r) e da razão dos calores específicos (k) do fluido de trabalho, aumentando conforme o aumento desses parâmetros. A razão de compressão (r) é determinada pela razão entre o volume máximo formado no cilindro quando o pistão se encontra no PMI e o volume mínimo formado dentro do cilindro quando o pistão atinge o PMS. O valor da razão de compressão costuma variar entre 8:1 ou 10:1 para motores a gasolina e entre 11,5:1 e 12,5:1 nos motores a álcool. Valores muito altos podem elevar a temperatura da mistura na câmara de combustão acima do ponto de autoignição do combustível, que é a temperatura na qual a reação de combustão acontece sem a necessidade da atuação da vela de ignição. Tal fenômeno é indesejado pois a combustão do combustível no momento incorreto pode danificar os

componentes internos do motor, além causar ruídos desagradáveis e prejudicar seu desempenho (YUNUS e MICHAEL, 2006).

A figura 20 apresenta a eficiência térmica (η) do motor operando no ciclo Otto em função da razão de compressão (r) do motor. A curva apresentada no gráfico se refere a uma razão de calor específico (k) de 1,4, que é a curva do calor específico do ar a temperatura ambiente.

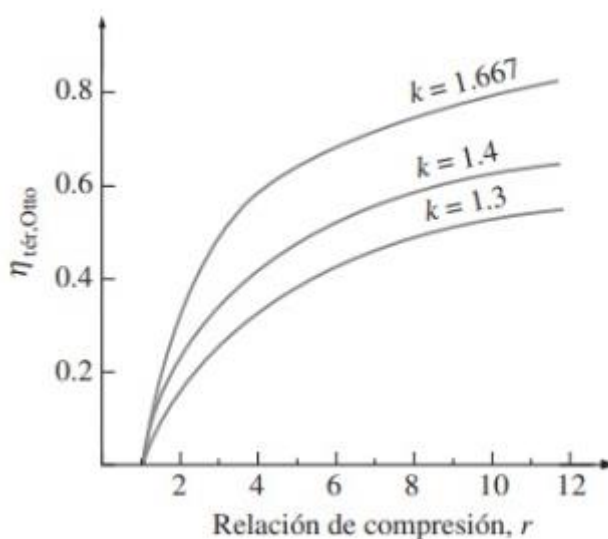


Figura 20 - Gráfico eficiência x razão de compressão
Fonte: YUNUS e MICHAEL, 2006

A eficiência térmica real dos motores a ignição por centelha é infelizmente abaixo do que o gráfico sugere, geralmente ficando entre 25% e 30%, pois como dito anteriormente, a razão dos calores específicos do fluido de trabalho é o outro fator que influencia diretamente no rendimento do motor e essa razão sofre variação com o aumento da temperatura e com o fluido de trabalho, sendo, por exemplo, $k = 1,2$ para o etanol e $k = 1,3$ para o dióxido de carbono a temperatura ambiente (YUNUS e MICHAEL, 2006).

5.2 CICLO DIESEL

O ciclo diesel é o ciclo ideal de funcionamento dos motores de combustão interna de ignição por compressão, ou simplesmente motores a diesel. O motor, proposto pela primeira vez por Rudolph Diesel nos anos de 1890, tem diversas similaridades com os motores que operam no ciclo Otto, diferenciando-se principalmente pela forma com é iniciado o processo de ignição.

Nos motores que operam no ciclo Otto, como falado anteriormente, uma mistura de ar e combustível é admitida para dentro da câmara de combustão na etapa de admissão, e após serem comprimidos, uma vela de ignição dá início ao processo de combustão da mistura. Nos motores que operam segundo o ciclo diesel apenas ar é admitido e comprimido na primeira fase do funcionamento do motor e a vela de ignição é substituída pelo bico injetor de combustível. O ar é altamente comprimido e por isso aquece a uma temperatura superior a temperatura de autoignição do combustível, geralmente entre 500°C e 600°C. Quando o pistão se aproxima do PMS é injetado o combustível sob alta pressão dentro da câmara de combustão, dando início ao processo de combustão (YUNUS e MICHAEL, 2006).

Como apenas ar é comprimido não existe o risco de autoignição, por isso a razão de compressão encontrada nos motores a diesel é muito superior as encontradas em motor do ciclo Otto, variando entre 12:1 a 24:1 (YUNUS e MICHAEL, 2006).

A combustão dos motores a diesel apenas ocorre com a injeção do combustível na câmara de combustão. Essa injeção começa quando o pistão se aproxima do PMS e continua por alguns instantes depois de tê-lo atingido, por essa duração mais longa o processo de combustão do ciclo diesel ideal é considerado como um processo de fornecimento de calor a pressão constante (YUNUS e MICHAEL, 2006).

O diagrama P-v do ciclo diesel ideal é apresentado na figura 21, assim como as etapas do seu processo.

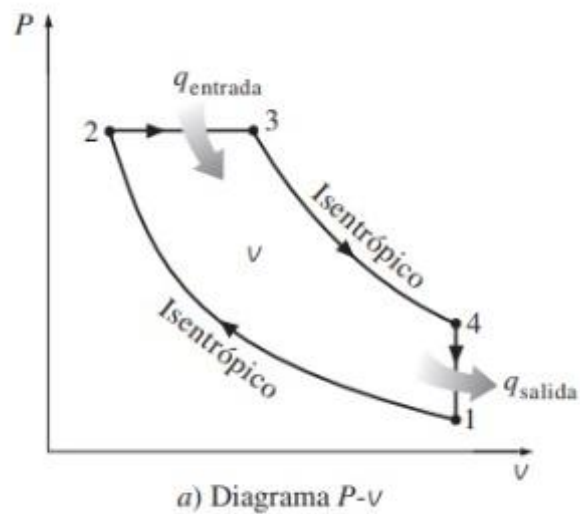


Figura 21 - Diagrama P-v do ciclo diesel ideal
 Fonte: YUNUS e MICHAEL, 2006

- (1) - (2) Compressão isoentrópica
- (2) - (3) Fornecimento de calor a pressão constante (q_e)
- (3) - (4) Expansão isoentrópica
- (4) - (1) Rejeição de calor a volume constante (q_s)

A eficiência térmica (η) dos motores a diesel é determinada de maneira diferente dos motores de ciclo Otto. Para determinar a eficiência do ciclo diesel é necessário conhecer um novo parâmetro do motor chamado de razão de corte (r_c), que é determinado pela razão entre os volumes do cilindro após e antes o processo de combustão (YUNUS e MICHAEL, 2006).

A razão de compressão continua tendo forte influência no rendimento do motor e como a razão de compressão dos motores a diesel é bem superior a encontrada nos motores Otto é comum que motores diesel tenham maior eficiência que motores do ciclo Otto. Além disso, os motores a diesel trabalham em um regime de rotações por minuto inferior a dos motores Otto, por isso queimam o combustível mais completamente. Outro fator que contribui para essa melhor queima de combustível é a elevada relação ar/combustível com que os motores trabalham. A eficiência térmica dos motores a diesel varia de 35% a 40% (YUNUS e MICHAEL, 2006).

A figura 22 apresenta a relação entre a eficiência térmica (η) e a razão de compressão (r_c) típica dos motores diesel, evidenciando também a faixa mais comum da razão de compressão encontrada nesses motores.

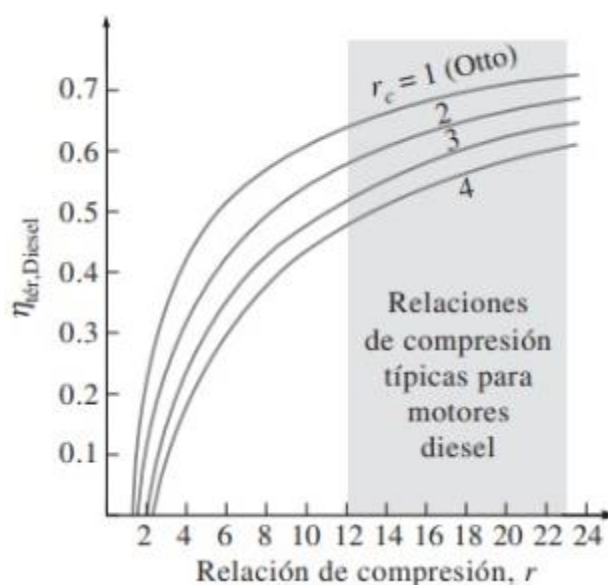


Figura 22 - Eficiência x razão de compressão
Fonte: YUNUS e MICHAEL, 2006

A maior eficiência térmica, associado a um custo de combustível inferior, menor consumo de combustível e uma grande robustez mecânica faz dos motores a diesel os motores ideais para muitas aplicações, desde automóveis de passeio a veículos de carga pesados, locomotivas, embarcações de todos os portes, motores estacionários, entre outras aplicações.

6 CONVERSÃO PARA MOTORES DIESEL DUAL FUEL

Os motores *Dual Fuel*, também conhecidos como motores bicombustíveis, são motores que podem operar utilizando dois combustíveis diferentes, separados ou simultaneamente, em diferentes proporções e de diferentes fases, podendo o combustível se encontrar no estado líquido ou gasoso (SCHLOSSER et al., 2004).

A ideia de se substituir o combustível original de um motor por outro não é nova, sendo muito usada durante a 2ª guerra mundial quando o petróleo e seus derivados nem sempre eram de fácil acesso. Pereira et al., (2005), cita por exemplo o uso de gás de carvão,

metano, biogás e gasolina de baixa qualidade misturados ao diesel durante a guerra para o uso em motores a diesel. Com o fim da guerra, o abastecimento de petróleo normalizado e o seu preço estável e atrativo, os combustíveis alternativos deixaram de ser interessantes comercialmente e por isso deixaram de ser utilizados.

Por volta dos anos 70, com a crise mundial do petróleo e os altos preços dos derivados do mesmo, os combustíveis alternativos voltaram a receber importância no cenário mundial. Além disso, a crescente preocupação com a poluição ambiental gerada pela atividade humana e em grande parte causada pela queima de combustíveis fósseis é outro grande estímulo a pesquisa de novas maneiras de geração de energia de forma mais limpa e eficiente, ecológica e renovável.

Os motores a diesel são amplamente utilizados em todo o mundo e para as mais diversas atividades, desde transporte de cargas a geração de energia, e embora possuam diversas vantagens sobre outros motores e outras formas de geração de energia, encontram como a maior de suas desvantagens justamente a emissão de poluentes pela queima do diesel. Uma maneira de prolongar a viabilidade do uso dos motores a diesel é aumentar sua eficiência e reduzir a emissão de poluentes e isso pode ser feito com a adaptação do motor que originalmente opera a diesel para operar num sistema Diesel *Dual Fuel*.

No Brasil, a primeira tentativa de utilizar um gás como combustível substituto parcial do diesel ocorreu em meados da década de 80, com o Plano Nacional de Gás Natural para uso no Transporte, o PLANGÁS, que visava a parcial substituição do diesel por gás natural na frota de veículos de carga e coletivos com o principal objetivo de diminuir a emissão de poluentes nos grandes centros urbanos, porém o projeto encontrou dificuldades em avançar devido a falta de tecnologias eficientes para a conversão, além da dificuldade de abastecimento do combustível gasoso, pois não havia no país uma cadeia de distribuição desenvolvida para o gás natural (OLIVEIRA et al., 2011).

No período entre os anos 90 e 2000 houve no Brasil um grande aumento na popularidade do gás natural e sua utilização em veículos, muito devido a descobertas de novas reservas nacionais de gás e ao crescente volume produzido. O então chamado de GNV, ou Gás Natural Veicular, passou a ser usado como combustível alternativo a gasolina nos motores de ciclo Otto através da instalação de um "kit", conhecido como "kit gás", que consistia na instalação de um cilindro de armazenamento de gás e diversos componentes e válvulas responsáveis por dosar e injetar o combustível gasoso. Com o aumento da oferta e da demanda do GNV foi desenvolvida uma grande malha de distribuição do mesmo pelo país,

viabilizando assim também a sua aplicação em motores diesel, que embora possível e altamente viável ainda não é comum na frota de veículos brasileira.

Nos motores Diesel *Dual Fuel* segue-se a mesma receita de se usar dois combustíveis, nesse caso diesel e gás natural são atualmente as opções mais estudadas e utilizadas, mas há outras opções ainda mais interessantes no ponto de vista ambiental, como a mistura de biodiesel e biogás purificado, ou biometano, que são dois biocombustíveis renováveis, além de emitirem muito menos poluentes pela sua queima e terem uma cadeia produtiva com muito potencial de crescimento, principalmente no Brasil.

O biodiesel como visto anteriormente apresenta características muito próximas ao diesel de petróleo, o que permite sua utilização puro ou misturado ao diesel no motores a diesel sem que haja a necessidades de grandes adaptações, enquanto o biogás, composto em sua maior parte por metano, pode ser purificado com a remoção do gás carbônico e outras impurezas e chegar a uma pureza superior aos 96% de metano, o que aproxima suas propriedades a do gás natural, que também é composto principalmente por este mesmo gás.

A conversão dos motores a diesel para operara de forma dual pode ser feita de diversas maneiras. Uma delas é a injeção de combustível gasoso sob alta pressão diretamente na câmara de combustão acompanhando a injeção do combustível líquido. Nesse processo o combustível principal será o combustível gasoso, enquanto o combustível líquido servirá apenas para dar início ao processo de combustão. Nessa conversão o ciclo termodinâmico continua sendo o ciclo diesel, onde apenas ar é comprimido na primeira etapa do ciclo e graças a alta taxa de compressão do motor e as altas temperaturas atingidas pelo ar dentro da câmara de combustão o combustível líquido se inflama e a combustão continua graças a presença do combustível gasoso (SANTOS et al., 2016)

Outra maneira de se utilizar um combustível gasoso em um motor originalmente a diesel é através do processo de "ottorização" do motor, ou seja, o ciclo termodinâmico da combustão deixa de ser feito pelo ciclo diesel e o motor passa a operar no ciclo Otto. Todo o sistema de injeção de diesel é removido e em sua substituição é instalado um sistema de injeção de combustível gasoso. O sistema elétrico do motor é modificado e o bico injetor de diesel é substituído por uma vela de ignição e esta será responsável por dar início ao processo de combustão da mistura. A taxa de compressão deve ser reduzida e diversos componentes internos do motor devem ser modificados ou substituídos, o que torna esse processo de conversão caro e complicado, além disso, não é incomum encontrar perdas de desempenho e eficiência resultante desse tipo de conversão, além de emissões de poluentes superiores a

encontradas em motores projetados propriamente para uso de combustíveis gasosos (PEREIRA et al., 2005).

Mais um inconveniente desse tipo de conversão é a impossibilidade de o motor operar novamente com o combustível original, pois muitas características são alteradas. A utilização de motores convertidos por esse método fica restrita a lugares que tenham um suprimento constante de gás, caso contrário, haveriam problemas de abastecimento.

A maneira mais simples de conversão do motor e que apresenta menores custos e ainda sim um rendimento satisfatório é com a injeção do combustível gasoso durante a admissão de ar, ainda no coletor de admissão. Dessa maneira, assim como na primeira, o combustível gasoso será o combustível principal, em maior quantidade, e o combustível líquido será o combustível secundário, em menor quantidade, sendo responsável novamente apenas para dar início ao processo de combustão.

O combustível gasoso é comprimido juntamente ao ar atmosférico e graças as altas taxas de compressão comuns aos motores a diesel a temperatura no interior do cilindro se eleva, mas não o suficiente para que o combustível gasoso entre em combustão espontânea, algo que só o ocorre ao redor dos 600C°. Quando o pistão se aproxima do PMS a injeção do combustível líquido ocorre, como ocorre normalmente em um motor a diesel convencional, mas a quantidade de combustível injetada é inferior, sendo apenas suficiente para dar início ao processo de combustão, que ocorre espontaneamente pois o combustível líquido apresenta temperatura de auto ignição inferior a do combustível gasoso (PEREIRA et al., 2005)

Nesse tipo de conversão não há nenhuma alteração interna ou física no motor original, permitindo assim que o motor opere no modo dual ou apenas com o diesel ou biodiesel, dependendo da oferta de combustível.

Segundo Oliveira et al., (2011) as modificações necessárias são principalmente a instalação de sensores que vão acompanhar diversos parâmetros do motor e seu funcionamento, bem como do processo de combustão e da emissão de gases pelo escapamento, e a partir desses parâmetros fazer uma correta dosagem dos combustíveis para minimizar a emissão de poluentes, reduzir o consumo dos combustíveis e maximizar o desempenho.

A instalação de um sistema de injeção eletrônica e seus sensores, como sensores de temperatura do ar de admissão e da água do sistema de refrigeração, sensores de rotação, sensores de pressão no coletor de admissão, além de controladores para a bomba do combustível líquido e para o injetor do combustível gasoso e controladores de rotação do motor e marcha são necessários para que o motor funcione perfeitamente, além de uma sonda

lambda para fazer a análise dos gases de escape e a partir dessa leitura definir a quantidade exata de cada combustível para tornar a combustão o mais estequiométrica possível (OLIVEIRA et al., 2011).

Tais modificações são mais necessárias em motores menos modernos, que não dispõem de sensores ou que possuem a bomba de alimentação ainda mecânica. Os motores a diesel mais modernos já possuem diversos sensores que acompanham os mais diversos parâmetros do motor e de seu processo de combustão, além disso, possuem um eficiente sistema de injeção, simplificando e reduzindo as modificações necessárias para a conversão para a operação *Dual Fuel*.

A viabilidade e o sucesso da conversão de motores originalmente a diesel para Diesel Dual Fuel são comprovados através de diversas teses e artigos de diversos autores que ensaiaram e obtiveram sucesso na substituição parcial do diesel por gás natural, biometano e até por biogás sem purificação. Alguns autores foram além e já testaram sistemas operando apenas com combustíveis renováveis, como a mistura anteriormente citada de biodiesel e biogás também obtendo resultados positivos.

Colle (2018) apresentou em seu estudo a análise de um pequeno motogerador originalmente a diesel operando com diferentes concentrações de biodiesel produzido por transesterificação de óleo residual de fritura (PCI correspondente a 35912 kJ/kg) adicionado ao diesel e também convertido para a operação em modo dual diesel utilizando como combustíveis o mesmo biodiesel e o biogás proveniente da suinocultura (PCI de 22562 kJ/m³). Colle (2018), conseguiu a substituição de até 30,08% do combustível líquido pelo gasoso, com um consumo específico do combustível líquido até 34,97% inferior, encontrando também uma potência elétrica gerada até 21,77% maior que no modo de operação com apenas um combustível, o motor, porém apresentou um menor rendimento quando operado no modo dual para todas as concentrações de biodiesel (20,18% contra 24,74% para operação biodiesel B100). Segundo Colle (2018), embora a menor eficiência do motor no modo dual, o desempenho encontrado ainda é satisfatório, ainda mais se considerarmos o biodiesel e o biogás como fontes de energia renováveis e menos poluentes que seus equivalentes não renováveis.

Silva et al., (1998) operou um motogerador a diesel substituindo 75% do diesel convencional, com PCI equivalente 42500 kJ/kg, por metano com uma pureza de 95,97% de CH₄ (porcentagem de metano próxima a encontrada no biometano obtido através da purificação do biogás), considerando o PCI do combustível gasoso aproximado a 46500 kJ/kg. O autor encontrou uma maior potência gerada com o motor alimentado com os dois

combustíveis em todas as faixas de operação, outras medidas como a de consumo específico ou eficiência não foram avaliadas, mas o teste comprova a viabilidade de se converter um motor originalmente a diesel para a operação em modo *Dual Fuel* com poucas e simples modificações, podendo ainda operar o motor apenas com o diesel caso necessário.

Agosto et al., (2019) avaliou o uso do sistema diesel *Dual Fuel* aplicado a 10% da frota de ônibus do setor de transporte público urbano do Rio de Janeiro, onde comparou as emissões resultantes, em dióxido de carbono equivalente, CO_{2e}, com as da frota atual composta por 100% de ônibus movidos exclusivamente a diesel. Segundo Agosto et al., (2019), com apenas 10% da frota movida a uma mistura de diesel-gás natural haveria uma redução da emissão de CO_{2e} de 32% em relação a frota convencional, além disso, os ônibus que receberam o sistema diesel *Dual Fuel* apresentaram um tempo de aceleração do veículo inferior aos operados apenas com diesel. Um rendimento médio 12% inferior foi encontrado para a operação no modo dual diesel, que obteve médias inferiores no consumo, em compensação, no ano de 2019 o gás natural era 22% mais barato que o diesel, significando que mesmo com o maior consumo de combustível a operação no modo *Dual Fuel* ainda era economicamente viável.

Schlosser et al., (2004) testou um motor a diesel convertido para *Dual Fuel* acoplado diretamente a um dinamômetro e encontrou os melhores resultados para a substituição de até 78% do diesel, obtendo um consumo específico em R\$/kW/h 46% inferior e um ganho de potência próximo a 14%.

Camargo et al., (2013) realizou um estudo completo sobre as pressões desenvolvidas no interior do cilindro durante o ciclo de combustão real de um motor a diesel convertido, sem grandes alterações, para a operação no modo *Dual Fuel*, encontrando picos de pressão maiores e com duração de um menor intervalo de tempo para a operação no modo dual, aproximando-se do encontrado num motor de ciclo Otto, além foram avaliadas as emissões provenientes da combustão operando-se o motor no modo dual e no modo original, encontrando emissões de dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrocarbonetos livres e SO₂ inferiores, principalmente em rotações mais elevadas, fato que o autor atribuiu a melhor combustão do combustível gasoso se comparada ao combustível líquido.

7 ANÁLISE ENERGÉTICA E DE EMISSÕES TTW

Neste capítulo serão apresentadas algumas características dos combustíveis estudados neste trabalho e do processo de combustão dos mesmos, além de uma análise termodinâmica da combustão em diferentes proporções de biodiesel e biogás em substituição ao diesel convencional.

7.1 COMBUSTÍVEIS, REAÇÃO DE COMBUSTÃO E A PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA

Os combustíveis mais utilizados atualmente em motores a combustão interna são de origem não renovável, sendo obtidos principalmente através da destilação do petróleo. Tais combustíveis apresentam como principais elementos de sua composição química o carbono e hidrogênio, sendo chamados assim de hidrocarbonetos, além de alguns outros elementos presentes em menores quantidades, como oxigênio, nitrogênio e o enxofre por exemplo. O teor de enxofre merece atenção especial quando se trata de combustíveis pois durante a combustão este reage com o oxigênio e forma compostos como o SO e SO₂ que reagem com o vapor de água também presente nos produtos da combustão e forma o ácido sulfúrico, extremamente danoso e corrosivo para o motor e seus componentes, além de altamente poluente ao meio ambiente (VLASSOV, 2008).

A principal e mais importante característica de um combustível é seu poder calorífico, que representa a quantidade de calor liberada pelo processo de combustão completa do mesmo. O poder calorífico é expresso em Joule por quilograma para combustíveis líquidos e Joules por metro cúbico para combustíveis gasosos, sendo determinados experimentalmente em bomba calorimétrica ou calorímetro (VLASSOV, 2008).

O poder calorífico subdivide-se ainda em poder calorífico superior e poder calorífico inferior, onde no primeiro caso o valor é maior, pois inclui o valor do calor de condensação do vapor de água formado pela combustão do hidrogênio e pela umidade presente no combustível, enquanto o poder calorífico inferior desconta este valor. Como nos motores a combustão interna os gases de combustão que saem pelo escapamento encontram-se acima da temperatura de condensação da água tal calor não é aproveitado e por isso deve-se considerar o poder calorífico inferior nos cálculos da combustão dos combustíveis (VLASSOV, 2008).

O poder calorífico inferior dos combustíveis líquidos e gasosos também pode ser estimado teoricamente a partir do conhecimento de sua composição química e da porcentagem de massa de cada elemento (VLASSOV, 2008). As fórmulas para o cálculo do poder calorífico inferior de um combustível líquido e para um combustível gasoso são respectivamente enunciadas abaixo.

$$\text{PCI} = 339,13 C + 1029,95 H - 108,85 (O - S) - 25,12 W, \text{ em [kJ/kg]} \quad (7.1)$$

Onde os valores de C, H, O e S representam as porcentagens de massa de cada elemento e W representa a umidade presente no combustível.

$$\begin{aligned} \text{PCI} = & 108 H_2 + 126 CO + 234 H_2S + 358 CH_4 + 591 C_2H_4 + 638 C_2H_6 + 860 C_3H_6 \\ & + 913 C_3H_8 + 1135 C_4H_8 + 1187 C_4H_{10} + 1461 C_5H_{12} + 1403 C_6H_6, \text{ em [kJ/m}^3] \end{aligned} \quad (7.2)$$

Onde H₂, CO, e demais componentes da equação representam as porcentagens volumétricas de cada componente do combustível.

Os combustíveis, independente de se encontrarem no estado líquido ou gasoso, de origem fóssil ou renovável, apresentam diferentes composições químicas e diversos hidrocarbonetos diferentes em sua composição. É conveniente portanto a simplificação da composição química do combustível tratando-o como se este fosse composto por apenas um hidrocarboneto. Neste trabalho os combustíveis levados em análise são o diesel, o biodiesel de soja e o biogás proveniente de diversas fontes. A composição química do diesel será aproximada como C₁₆H₃₄, contendo pequenos traços de enxofre da ordem de 0,3%, o biodiesel de soja foi escolhido por ser o mais produzido e mais utilizado no Brasil, de fórmula química aproximada como C₁₈H₃₂O₂, o biogás é composto por principalmente metano e dióxido de carbono e quando purificado alcança altas proporções de metano em sua composição, da ordem de 96%, e ainda algum dióxido de carbono, na ordem de 4%, além de traços de alguns outros gases. Para simplificação dos cálculos o biogás será tratado apenas como metano puro, ou CH₄.

Os PCI's dos combustíveis estudados neste trabalho são calculados seguindo as fórmulas anteriores como segue:

Para o diesel, de fórmula C₁₆H₃₄, o carbono e o hidrogênio representam respectivamente 84,66% e 15,04% da massa do combustível, além da parte de 0,3% de enxofre, que segundo a fórmula (7.1), correspondem a um PCI de 44233 kJ/kg, pois:

$$\text{PCI} = 339,13 * 84,66 + 1029,95 * 15,04 - 108,85 * (0 - 0,3) - 25,12 * 0 = 44233 \text{ kJ/kg}$$

Para o biodiesel, considerado como $C_{18}H_{32}O_2$, carbono, hidrogênio e oxigênio correspondem a respectivamente 77,14%, 11,43% e 11,43% da massa total do combustível e novamente segundo a equação (7.1), encontra-se o valor de 36679 kJ/kg para o PCI, pois:

$$PCI = 339,13 \cdot 77,14 + 1029,95 \cdot 11,43 - 108,85 \cdot (11,43 - 0) - 25,12 \cdot 0 = 36679 \text{ kJ/kg}$$

Para o biogás, tratado como apenas CH_4 , seguindo a equação (7.2), encontra-se o valor de 35800 kJ/m³, pois segundo a equação:

$$PCI = 108 \cdot 0 + 126 \cdot 0 + 234 \cdot 0 + 358 \cdot CH_4 + 591 \cdot 0 + 638 \cdot 0 + 860 \cdot 0 + 913 \cdot 0 + 1135 \cdot 0 + 1187 \cdot 0 + 1461 \cdot 0 + 1403 \cdot 0 = 35800 \text{ kJ/m}^3$$

A conversão do PCI do biogás da unidade de kJ/m³ para kJ/kg é feita pela multiplicação do valor em kJ/m³ pela sua densidade, em kg/m³. Logo, obtém-se

$$35800 \text{ kJ/m}^3 \cdot 0,657 \text{ kg/m}^3 = 54490 \text{ kJ/kg}$$

Desta forma:

Tabela 15 - PCI e densidade dos combustíveis

Combustível	Diesel convencional	Biodiesel	Biogás
PCI	44233kJ/kg	36679 kJ/kg	54490 kJ/kg
Densidade	0,853 kg/l	0.888 kg/l	0,657 kg/m ³

Fonte: Elaboração própria.

A tabela 15 contempla os valores encontrados seguindo as equações (7.1) e (7.2) apresentadas. Tais valores de PCI estão de acordo com as bibliografias consultadas e próximo aos valores conhecidos experimentalmente, por isso esses valores serão considerados para cálculos posteriores.

A reação de combustão é a reação química de oxidação dos hidrocarbonetos presentes nos combustíveis (BIZZO, 2003). Tal reação pode ser chamada de completa, quando há oxigênio suficiente na câmara de combustão para a oxidação de todos os componentes do combustível. Neste cenário idealizado os produtos de combustão encontrados nos gases de escape são o CO_2 , o H_2O em forma de vapor, o SO_2 caso haja enxofre no combustível e o N_2 que está presente no ar e não reage com nenhum elemento durante o processo (VLASSOV, 2008).

Entretanto, a presença de oxigênio apenas suficiente na câmara de combustão não garante a queima completa do combustível, sendo por isso muitas vezes os motores regulados para que haja mais ar e conseqüentemente mais oxigênio que o necessário para a combustão, caracterizando um cenário de excesso de ar. Nesse caso nos produtos de combustão também é encontrado oxigênio, O₂ (VLASSOV, 2008).

No caso oposto, com menos oxigênio que o necessário para a combustão é detectada a presença de monóxido de carbono nos produtos da combustão. Nesse cenário há desperdício de combustível e queda no rendimento do motor, sendo isso sempre indesejável. A correta dosagem do combustível injetado é feita através da constante análise dos gases de escape feita pela sonda lambda (VLASSOV, 2008).

O processo de combustão nos motores a diesel deve sempre ser feito com excesso de ar. Neste trabalho será considerado um excesso de ar de 50%, ou seja, um coeficiente de excesso de ar de $\lambda=1,5$.

Durante e depois do processo de combustão ocorrem ainda outros fenômenos, como a dissociação, que é a separação dos produtos da combustão em outros que não apenas o CO₂ e H₂O, como o CO e O₂ principalmente, além disso, após a combustão pode o nitrogênio presente nos gases reagir com o oxigênio e formar compostos do tipo NO_x, altamente tóxicos e poluentes (BIZZO, 2003). Tais fenômenos estão ligados a condições exatas temperatura, pressão e de equilíbrio químico e embora sejam fenômenos conhecidos, para caráter de simplificação, seu estudo não será abordado nesse trabalho, ficando como sugestão para trabalhos futuros.

O ar é sempre utilizado como comburente nas reações de combustão dos motores a combustão interna, por isso, conhecer as características do ar atmosférico é fundamental para a realização dos cálculos. Embora a composição química do ar seja complexa, os principais elementos nele presente são o nitrogênio e oxigênio, sendo o nitrogênio aqui considerado um gás inerte no processo de combustão e permanecendo inalterado nos dois lados da equação química, enquanto o oxigênio reage com o carbono e o hidrogênio presentes no combustível formando dióxido de carbono e vapor de água (BIZZO, 2003). A composição mássica e volumétrica do ar atmosférico é apresentada na tabela 16.

Tabela 16 - Porcentagem de massa e volume dos principais elementos presentes no ar atmosférico

Elemento	Porcentagem em massa	Porcentagem em volume
Oxigênio	23,2 %	21 %
Nitrogênio	76,8 %	79 %

Fonte: Elaboração própria.

Para a análise termodinâmica serão estudadas a reação de combustão dos combustíveis puros e misturas entre os biocombustíveis nas proporções de 20, 30 e 50% de biogás em substituição do biodiesel. Também serão analisados os produtos das reações de combustão, principalmente com a relação a emissão de CO₂.

A primeira lei da termodinâmica, também conhecida como princípio da conservação de energia, anuncia que a energia não pode ser criada ou destruída durante um processo, podendo está apenas mudar de forma (YUNUS e MICHAEL, 2006). Tal enunciado pode ser mais bem visualizado nas equações a seguir e a partir delas serão analisados os diferentes cenários propostos, comparando os mesmos.

$$E_e - E_s = \Delta E_{\text{sistema}} \quad (7.3)$$

$$\Delta E_{\text{sistema}} = E_{\text{final}} - E_{\text{inicial}} = E_1 - E_2 \quad (7.4)$$

Onde E_e , E_s , E_{inicial} e E_{final} representam respectivamente a energia total que entra no sistema, a energia total que sai do sistema, a energia no estado inicial e a energia no estado final do sistema, enquanto $\Delta E_{\text{sistema}}$ representa a variação da energia total do sistema. A equação pode ainda ser reescrita da maneira a seguir para sistemas reagentes, como o processo de combustão, de maneira a explicitar as reações químicas que ocorrem durante o processo.

$$Q_e + W_e + \sum \dot{m}_e h_e = Q_s + W_s + \sum \dot{m}_s h_s \quad (7.5)$$

Onde as incógnitas Q_e , Q_s , W_e , W_s , $\sum \dot{m}_e h_e$ e $\sum \dot{m}_s h_s$ representam respectivamente quantidade de calor entrando e saindo do sistema, o trabalho entrando e saindo do sistema, e o somatório da vazão mássica dos elementos entrando e saindo multiplicada pela sua própria entalpia, ou PCI, no caso dos combustíveis.

A entalpia de um elemento ou substância está relacionada a energia interna contida no mesmo. Para processos de combustão deve-se ainda conhecer a entalpia de formação (h_f) que pode ser definida como a entalpia de uma substância em um estado especificado devido a sua composição química (YUNUS e MICHAEL, 2006). O conhecimento da entalpia dos elementos ou substâncias será necessário para a análise termodinâmica do processo de combustão e esta pode ser calculada através da equação a seguir.

$$\text{Entalpia} = h_f + (h - h^\circ), \text{ em [kJ/kmol]} \quad (7.6)$$

Onde, h_f é a entalpia de formação de determinada substância e $(h - h^\circ)$ representa a entalpia sensível relativa ao estado de referência padrão. Os valores de h e h° variam com a temperatura e são conhecidos e tabelados (YUNUS e MICHAEL, 2006). Para as análises desse trabalho a temperatura inicial do processo será considerada como 25°C , que corresponde a 298K e é a temperatura tida como padrão de referência para as propriedades das substâncias, enquanto a temperatura final será considerada como 1500K , uma temperatura média comum para gases de exaustão em processos de combustão em MCI. A variação da entalpia pode apresentar valores positivos ou negativos, onde valores negativos significam processos de liberação de calor e variações positivas correspondem a processos onde o calor é absorvido (YUNUS e MICHAEL, 2006). A partir do conhecimento das temperaturas de entrada e saída dos elementos pode-se calcular a entalpia para todas as substâncias envolvidas no processo de combustão. Esses valores estão agrupados na tabela 17.

Do lado dos reagentes do processo de combustão encontramos O_2 e N_2 , ambos a 298K de temperatura. Segundo a fórmula (7.6) anterior e seguindo as tabelas de propriedades das substâncias (YUNUS e MICHAEL, 2006). Os valores da entalpia do oxigênio e do hidrogênio são respectivamente 0 e 0 kJ/kmol, pois:

$$h_{\text{O}_2} = h_f + (h - h^\circ) = 0 + (8682 - 8682) = 0 \text{ kJ/kmol}$$

$$h_{\text{N}_2} = h_f + (h - h^\circ) = 0 + (8669 - 8669) = 0 \text{ kJ/kmol}$$

Enquanto do lado dos produtos de combustão encontram-se CO_2 , H_2O , O_2 e N_2 todos a uma temperatura de 1500K e possuem entalpias de -331806 , -193725 , 40610 e 38404 kJ/kmol, seguindo a mesma equação (7.6) e tabela de propriedades.

$$h_{O_2} = h_f + (h - h^\circ) = 0 + (49292 - 8682) = 40610 \text{ kJ/kmol}$$

$$h_{N_2} = h_f + (h - h^\circ) = 0 + (47073 - 8669) = 38404 \text{ kJ/kmol}$$

$$h_{CO_2} = h_f + (h - h^\circ) = -393520 + (71078 - 9364) = -331806 \text{ kJ/kmol}$$

$$h_{H_2O} = h_f + (h - h^\circ) = -241820 + (57999 - 9904) = -193725 \text{ kJ/kmol}$$

Os valores obtidos devem ser ainda corrigidos e transformados de kJ/kmol para kJ/kg, dividindo-se o valor encontrado pelo valor da massa atômica de cada substância.

$$h_{O_2} = 0 \text{ kJ/kmol} = 0 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{N_2} = 0 \text{ kJ/kmol} = 0 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{O_2} = 40610 \text{ kJ/kmol} = 1269,063 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{N_2} = 38404 \text{ kJ/kmol} = 1371,571 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{CO_2} = -331806 \text{ kJ/kmol} = -7541,045 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{H_2O} = -193725 \text{ kJ/kmol} = -10762,500 \text{ kJ/kg}$$

Estes serão os valores utilizados posteriormente na equação da primeira lei da termodinâmica e estão agrupados na tabela 17.

Tabela 17 - Entalpias de cada substância em cada etapa do processo

Substância	Entalpia como reagente a 298K	Entalpia como produto a 1500K
O ₂	0	1269,063 kJ/kg
N ₂	0	1371,571 kJ/kg
CO ₂	Não reagente	-7541,045 kJ/kg
H ₂ O	Não reagente	-10762,500 kJ/kg

Fonte: Elaboração própria.

No caso de um motor a combustão interna, consideramos um sistema fechado, ou um volume de controle, onde como entrada temos combustível e ar que são utilizados para gerar trabalho e em consequência do processo de combustão, gases de exaustão. Não há calor ou trabalho entrando no sistema ($Q_e + W_e = 0$) e a diferença de calor entre o lado externo e o lado interno do motor é muito grande, por isso a transferência de calor, ou seja, o calor gerado pela combustão do combustível rejeitado para o meio externo é aproximadamente nulo ($Q_s \approx 0$). A figura 23 é utilizada para demonstrar esse sistema.

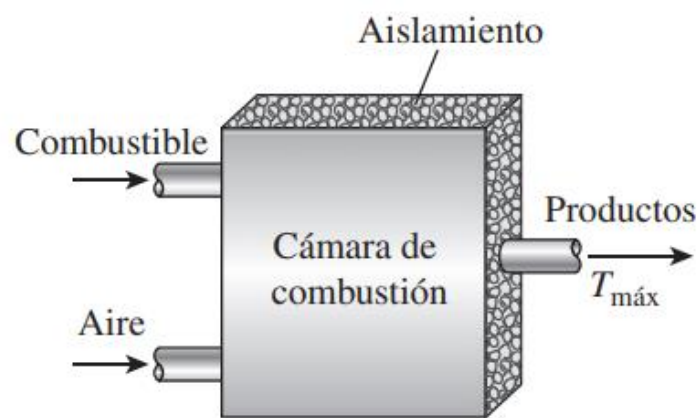


Figura 23 - Motor a combustão interna sob o ponto de vista termodinâmico
Fonte: YUNUS e MICHAEL, 2006

Com as considerações adotadas para o sistema a equação da primeira lei da termodinâmica apresentada fica reduzida a:

$$\sum \dot{m}_e h_e = W_s + \sum \dot{m}_s h_s \quad (7.7)$$

Que pode ser reescrita como:

$$\dot{m}_{\text{comb}} h_{\text{comb}} + \dot{m}_{\text{O}_2} h_{\text{O}_2} + \dot{m}_{\text{N}_2} h_{\text{N}_2} = W_s + \dot{m}_{\text{CO}_2} h_{\text{CO}_2} + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} h_{\text{H}_2\text{O}} + \dot{m}_{\text{O}_2} h_{\text{O}_2} + \dot{m}_{\text{N}_2} h_{\text{N}_2} \quad (7.8)$$

onde $\dot{m}_{\text{comb}}h_{\text{comb}}$ corresponde ao produto da vazão mássica de combustível pelo seu PCI, em kJ/kg, e os demais componentes representam o produto da vazão mássica da substância pela sua entalpia no estado em que se encontra. Essa equação será utilizada para todos os processos de combustão a seguir.

O sucesso, ou desempenho, de um processo de transferência ou conversão de calor é designado pela eficiência deste processo (YUNUS e MICHAEL, 2006).

A equação que determina a eficiência de um equipamento que utiliza um combustível e sua combustão como forma de geração de calor é dada por:

$$\eta_{\text{COMBUSTÃO}} = \frac{Q}{PC} = \frac{\text{Quantidade de calor liberada durante a combustão}}{\text{Poder Calorífico}} \quad (7.9)$$

Essa equação pode ser adaptada para motores a combustão interna, onde trabalho gerado é dado como a potência produzida em um eixo, e os gases de combustão são liberados a altas temperaturas, por isso o poder calorífico utilizado deve ser o poder calorífico inferior do combustível queimado. A equação adaptada é apresentada a seguir.

$$\eta_{\text{GLOBAL}} = \frac{W}{PCI \cdot \dot{m}} = \frac{\text{Trabalho produzido no eixo}}{\text{Poder Calorífico Inferior} \cdot \text{vazão mássica do combustível}} \quad (7.10)$$

Essa equação será posteriormente utilizada para o cálculo da eficiência em todos os processos de combustão e com todos os combustíveis e taxas de substituição.

7.2 COMPARAÇÃO ENTRE AS EMISSÕES DOS COMBUSTÍVEIS E APLICAÇÃO DA PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA

Uma das maneiras de se avaliar o quanto um combustível é poluente ao meio ambiente é analisando a quantidade de gases poluentes emitidos pela sua queima.

Como apresentado anteriormente a fórmula química simplificada para o óleo diesel é dada por $C_{16}H_{34}$, além de conter pequenas frações de enxofre de correspondentes a aproximadamente 0,3% de sua massa. A equação da reação de combustão do $C_{16}H_{34}$ com um coeficiente de excesso de ar de 50% é dada por:



É possível observar que um mol do combustível consome cerca de 36,75 moles de oxigênio para sua queima. A massa molar do diesel é dada pela multiplicação da quantidade de cada elemento na molécula pelo peso atômico do mesmo elemento, calcula-se assim uma massa molar de 226g para um mol do diesel. Analogamente, calcula-se que a massa consumida de oxigênio para a combustão de um mol de diesel com excesso de ar de 50% é de 1176g, ou 5045,04g de ar atmosférico.

A razão da mistura ar/combustível da equação é dada pela simples equação abaixo. A mesma equação será usada outras vezes para outros combustíveis e misturas (BIZZO, 2003).

$$\text{Razão Ar/Combustível} = \text{Razão A/C} = \frac{\text{Massa de ar}}{\text{Massa de combustível}} \quad (7.11)$$

Para o diesel a razão A/C equivale a 22,3:1, ou seja, são 22,3 partes de ar consumido para uma parte de diesel.

Os produtos da reação também podem ser analisados individualmente. Serão analisados apenas os gases poluentes, no caso específico do diesel são eles o CO₂ e o SO₂.

As fórmulas simplificadas para análise do volume emitido de CO₂ e do SO₂ para combustíveis líquidos são dadas por (VLASSOV, 2008).

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01866 C^t \frac{\text{Nm}^3\text{CO}_2}{\text{kg}} \quad (7.12)$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,00699 S^t \frac{\text{Nm}^3\text{SO}_2}{\text{kg}} \quad (7.13)$$

Onde as incógnitas C^t e S^t significam respectivamente as porcentagens de carbono e de enxofre na massa do combustível.

Utilizando os valores já conhecidos para a porcentagem de massa do carbono e do enxofre no combustível, calculamos os valores de V_{CO₂} e V_{SO₂} segundo as equações (7.12) e (7.13) como, respectivamente:

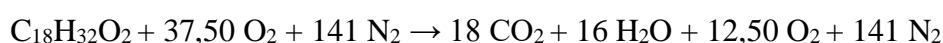
$$V_{\text{CO}_2} = 0,01866 C^t \frac{\text{Nm}^3\text{CO}_2}{\text{kg}} = 1,586 \frac{\text{Nm}^3\text{CO}_2}{\text{kg}}$$

$$V_{SO_2} = 0,00699S \frac{Nm3SO_2}{kg} = 0,002 \frac{Nm3SO_2}{kg}$$

Tais valores representam a quantidade de CO₂ e SO₂ emitidos pela queima de 1 Kg de combustível.

A mesma análise pode ser feita para o biodiesel, de fórmula química simplificada como C₁₈H₃₂O₂. O biodiesel já apresenta como vantagem inicial a presença muito pequena ou nula de enxofre, por isso não há emissão de produtos de combustão contendo esse gás.

A reação de combustão do biodiesel com o mesmo excesso de ar de 50% é dada por:



É observado que um mol do combustível consome 37,5 moles de oxigênio. As massas molares, assim como a razão A/C são obtidas da mesma maneira do caso anterior, sendo encontrados que um mol do combustível tem massa de 280g, e consome 1200g de oxigênio ou 5148g de ar atmosférico. A razão A/C da queima do biodiesel é de 18,39: 1.

Os valores do volume de CO₂ e SO₂ são dados pelas mesmas equações usadas no combustível anterior, sendo os valores de V_{CO₂} e V_{SO₂} iguais a:

$$V_{CO_2} = 0,01866 C \frac{Nm3CO_2}{kg} = 1,440 \frac{Nm3CO_2}{kg}$$

$$V_{SO_2} = 0,00699S \frac{Nm3SO_2}{kg} \approx 0 \frac{Nm3SO_2}{kg}$$

Também é possível fazer a mesma analogia para o biogás, simplificado como metano puro, de fórmula química CH₄, onde a equação de combustão é expressa abaixo:



A equação mostra que um mol do metano precisa de 3 moles de oxigênio para a combustão com o excesso de ar determinado. A molécula de metano tem massa de 16g e reage com 96g de oxigênio ou 411,84g de ar atmosférico. A razão A/C da combustão do metano é de 25,74: 1.

A equação usada para determinar os produtos da reação de combustíveis gasosos é levemente diferente da usada para combustíveis líquidos, além disso, deve-se considerar para simplificação da análise, que o combustível gasoso, o ar e os produtos da combustão se comportam como gases ideais. Como o CO₂ continua sendo o produto mais interessante da combustão, novamente só ele será analisado, visto que o biogás ou biometano após o processo de purificação também apresenta valores muito baixos ou nulos de enxofre. A fórmula do volume de CO₂ de produto da combustão de combustíveis gasosos é expressa por (VLASSOV, 2008).

$$V_{CO_2} = 0,01(CO_2 + CO + \sum mC_m H_m), \text{ em } \frac{Nm^3}{Nm^3} \quad (7.14)$$

Onde o valor obtido é expresso em m³ de CO₂ por m³ de combustível gasoso. Como o combustível em análise é composto basicamente por CH₄, ou seja, 100% de CH₄, os valores de CO₂ + CO na equação são equivalentes a zero e o valor de V_{CO₂}, obtido pela equação (7.14), é dado por:

$$V_{CO_2} = 0,01(1 * 100), \text{ em } \frac{Nm^3}{Nm^3} = 1 \frac{Nm^3}{Nm^3}$$

As comparações considerando apenas os valores das emissões de CO₂ ou SO₂ não são suficientes pois a função do motor a combustão interna é transformar a energia contida no combustível em trabalho útil, portanto, para tal comparação ser correta é necessário incluir o poder calorífico e a quantidade de energia liberada através da queima de cada combustível. A equação utilizada para correlacionar esses valores é dada por (VLASSOV, 2008).

$$m_{CO_2} = V_{CO_2} \frac{\rho_{CO_2}}{PCI}, \text{ em } \frac{kgCO_2}{MJ} \quad (7.15)$$

Onde m_{CO₂} significa a massa de CO₂ em kg/MJ gerado pela queima do combustível, ρ_{CO₂} é a densidade do CO₂ em condições normais, em kg/m³ e o PCI é o poder calorífico inferior de cada um dos combustíveis. A partir desse ponto calcula-se o valor da m_{CO₂} para cada um dos três combustíveis.

$$\text{Para o diesel: } m_{\text{CO}_2} = V_{\text{CO}_2} \frac{\rho_{\text{CO}_2}}{\text{PCI}} = 1,586 * 1,964 / 44,233 = 0,070 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{MJ}}$$

$$\text{Para o biodiesel: } m_{\text{CO}_2} = V_{\text{CO}_2} \frac{\rho_{\text{CO}_2}}{\text{PCI}} = 1,440 * 1,964 / 36,679 = 0,077 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{MJ}}$$

$$\text{Para o biogás purificado: } m_{\text{CO}_2} = V_{\text{CO}_2} \frac{\rho_{\text{CO}_2}}{\text{PCI}} = 1 * 1,964 / 35,800 = 0,055 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{MJ}}$$

Observando os resultados é possível notar a menor emissão gerada pelo combustível gasoso, nesse caso sendo o menos poluente entre os três. Para o biodiesel e o diesel foram encontrados valores próximos, com pequena vantagem ao combustível fóssil. Isso se deve ao fato que embora o biocombustível emita menos CO₂ por molécula de combustível queimada o seu poder calorífico é inferior ao do diesel. Na prática significa que o motor consumirá mais combustível e emitirá mais CO₂ para produzir a mesma potência e o mesmo trabalho quando abastecido somente com o biodiesel.

Para realizar a análise seguindo a primeira lei da termodinâmica é necessário, além do conhecimento das entalpias das substâncias e o PCI do combustível, o conhecimento da vazão mássica dos reagentes e produtos.

Nesse contexto será considerado o consumo de combustível em uso rodoviário de um caminhão de grande porte genérico, onde devido a grande tecnologia empregada tais caminhões, com capacidade de carga de até 100t, conseguem um consumo de combustível de até 3km/l de diesel rodando a uma velocidade de 90km/h, que é a velocidade máxima permitida para esses veículos em rodovias brasileiras.

Para se converter o consumo médio em km/l para kg/s, considerando uma velocidade média de 90km/h e a densidade de 0,853kg/l do diesel adota-se o procedimento a seguir:

$$90\text{km/h} * 11/3\text{km} * 1/3600\text{s} * 0,853\text{kg/l} = 0,007 \text{ kg/s de diesel}$$

Conhecida a reação de combustão do diesel e o valor da vazão mássica de combustível pode-se calcular a vazão mássica de todas as outras substâncias da reação. Assim, a vazão mássica do diesel é de 0,007kg/s, que consome 0,036kg/s de oxigênio e 0,119kg/s de nitrogênio e gera como produto 0,022kg/s de CO₂, 0,009kg/s de H₂O, 0,012 kg/s de O₂ e 0,119kg/s de N₂. Aplicando esses valores na primeira lei da termodinâmica, apresentada como equação (7.8), encontra-se o valor do trabalho produzido por essa reação

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{comb}}h_{\text{comb}} + \dot{m}_{\text{O}_2}h_{\text{O}_2} + \dot{m}_{\text{N}_2}h_{\text{N}_2} &= W_s + \dot{m}_{\text{CO}_2}h_{\text{CO}_2} + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}h_{\text{H}_2\text{O}} + \dot{m}_{\text{O}_2}h_{\text{O}_2} + \dot{m}_{\text{N}_2}h_{\text{N}_2} = \\ 0,007*44233 + 0,036*0 + 0,119*0 &= W + (0,022(-7541,045)) + (0,009(-10762,5)) + \\ (0,012(1269,063)) + (0,119(1371,571)) &= \\ W &= 393,950 \text{ kW}_{\text{DIESEL}} \end{aligned}$$

A eficiência do processo é dada pela equação (7.10) e corresponde a:

$$\eta_{\text{GLOBAL}} = \frac{W}{PCI*\dot{m}} = \frac{393,950}{44233*0,007} = 27,23\%$$

Os mesmos cálculos podem ser feitos para o biodiesel, considerando apenas a diferença entre suas densidades, que é maior no biodiesel e vale 0,888kg/l. Os cálculos para a vazão mássica de biodiesel são apresentados a seguir:

$$90\text{km/h} * 11/3\text{km} * 1/3600\text{s} * 0,888\text{kg/l} = 0,007 \text{ kg/s de biodiesel}$$

Para tal vazão mássica de combustível calcula-se um consumo de 0,030 kg/s de oxigênio e 0,099 kg/s de nitrogênio e como produto da reação serão produzidos 0,019 kg/s de dióxido de carbono, 0,007 kg/s de vapor de água, 0,010 kg/s de oxigênio e 0,099 kg/s de nitrogênio.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{comb}}h_{\text{comb}} + \dot{m}_{\text{O}_2}h_{\text{O}_2} + \dot{m}_{\text{N}_2}h_{\text{N}_2} &= W_s + \dot{m}_{\text{CO}_2}h_{\text{CO}_2} + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}h_{\text{H}_2\text{O}} + \dot{m}_{\text{O}_2}h_{\text{O}_2} + \dot{m}_{\text{N}_2}h_{\text{N}_2} = \\ 0,007*36679 + 0,030*0 + 0,099*0 &= W + (0,019(-7541,045)) + (0,007(-10762,5)) + \\ (0,010(1269,063)) + (0,099(1371,571)) &= \\ W &= 326,892 \text{ kW}_{\text{BIODIESEL}} \end{aligned}$$

A eficiência do processo é novamente dada pela equação (7.10) e corresponde a:

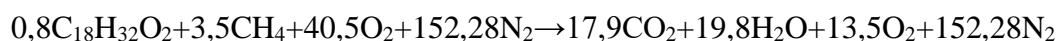
$$\eta_{\text{GLOBAL}} = \frac{W}{PCI*\dot{m}} = \frac{326,892}{36679*0,007} = 27,32\%$$

O raciocínio anterior pode ser seguido para as diferentes misturas de biodiesel e biogás, caracterizando o motor como operante no modo *Dual Fuel*. Neste trabalho serão estudadas as misturas com substituição de 20, 30 e 50% da massa de combustível líquido pelo gasoso.

A vazão mássica total dos biocombustíveis será mantida em todos os cenários de substituição e operação *Dual Fuel* como 0,007Kg/s. A massa de um mol de $C_{18}H_{32}O_2$ é equivalente a 280g, enquanto um mol de CH_4 possui uma massa correspondente a 16g.

Uma substituição de 20% da massa de biodiesel pelo biogás corresponderá a uma mistura contendo 224g de biodiesel e 56g de biogás, ou seja, 0,8 mol de $C_{18}H_{32}O_2$ e 3,5 mol de CH_4 . Nesse caso, a massa de carbono corresponde a 76,71% da massa total do combustível.

A reação de combustão da mistura com um excesso de ar de 50% corresponde a:



Nessa reação 280g de combustível reagem com 1296g de O_2 e 4263,84 N_2 e geram como produtos da combustão 787,6g de CO_2 , 356,4g de H_2O , 432g de O_2 e 4263,84g de N_2 . Considerando a vazão mássica de biocombustível de 0,007kg/s, dos quais 0,0056kg/s de biodiesel e 0,0014kg/s de biogás, a vazão mássica dos demais elementos podem ser determinada através de uma proporcionalidade. Tais vazões são 0,032kg/s de O_2 e 0,107kg/s de N_2 como reagentes e 0,019kg/s de CO_2 , 0,090kg/s de H_2O , 0,011 O_2 e 0,107 de N_2 .

Conhecidos os valores da vazão mássica de todos os elementos, assim como o PCI dos biocombustíveis e as entalpias dos elementos, pode-se novamente resolver a equação (7.8), agora para a mistura de biodiesel e biogás com 20% de substituição do combustível líquido.

$$\dot{m}_{comb}h_{comb} + \dot{m}_{O_2}h_{O_2} + \dot{m}_{N_2}h_{N_2} = W_s + \dot{m}_{CO_2}h_{CO_2} + \dot{m}_{H_2O}h_{H_2O} + \dot{m}_{O_2}h_{O_2} + \dot{m}_{N_2}h_{N_2} =$$

$$(\dot{m}_{biodiesel}h_{biodiesel} + \dot{m}_{biogás}h_{biogás}) + \dot{m}_{O_2}h_{O_2} + \dot{m}_{N_2}h_{N_2} = W_s + \dot{m}_{CO_2}h_{CO_2} + \dot{m}_{H_2O}h_{H_2O} + \dot{m}_{O_2}h_{O_2} + \dot{m}_{N_2}h_{N_2} =$$

$$0,0056*36679 + 0,0014*54490 + 0,032*0 + 0,107*0 = W + (0,019(-7541,045)) + (0,009(-10762,5)) + (0,011(1269,063)) + (0,107(1371,571)) =$$

$$W = 361,112kW_{\text{BIODIESEL} + \text{BIOGÁS (80/20)}}$$

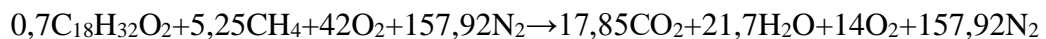
O volume de CO₂ emitido será calculado para as misturas assim como foi para o caso de um combustível líquido único e para o caso de uma mistura com 20% de biogás, seguindo a equação (7.12), corresponde a

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01866 C \frac{\text{Nm}^3\text{CO}_2}{\text{kg}} = 0,01866 * 76,71 = 1,431 \frac{\text{Nm}^3\text{CO}_2}{\text{kg}}$$

A eficiência calculada pela equação (7.10) é:

$$\eta_{\text{GLOBAL}} = \frac{W}{PCI * \dot{m}} = \frac{361,112}{(0,0056 * 36679) + (0,0014 * 54490)} = 28,19\%$$

Para uma substituição de 30% da massa de biodiesel por biogás a massa de biodiesel na reação corresponderá a 196g, enquanto o biogás corresponderá a 84g, ou seja, 0,7 mol de C₁₈H₃₂O₂ e 5,25 mol de CH₄. Nessa mistura o carbono corresponde a 76,5% da massa total do combustível. A reação de combustão da mistura é dada por



Nessa reação 280g de combustível reagem com 1344g de oxigênio e 4421,76g de nitrogênio e geram como produtos 785,4g de dióxido de carbono, 390,6g de vapor de água, 448g de oxigênio e 4421,76g de nitrogênio.

Uma vazão mássica do combustível de 0,007kg/s, dos quais 0,0049kg/s de biodiesel e 0,0021kg/s de biogás, consumirá 0,034kg/s de oxigênio e 0,111kg/s de nitrogênio e produzirá 0,020kg/s de dióxido de carbono, 0,010kg/s de vapor de água, 0,011kg/s de oxigênio e 0,111kg/s de nitrogênio.

Novamente utiliza-se a equação (7.8) para descobrir a potência produzida pelo sistema.

$$\dot{m}_{\text{comb}}h_{\text{comb}} + \dot{m}_{\text{O}_2}h_{\text{O}_2} + \dot{m}_{\text{N}_2}h_{\text{N}_2} = W_s + \dot{m}_{\text{CO}_2}h_{\text{CO}_2} + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}h_{\text{H}_2\text{O}} + \dot{m}_{\text{O}_2}h_{\text{O}_2} + \dot{m}_{\text{N}_2}h_{\text{N}_2} =$$

$$(\dot{m}_{\text{biodiesel}}h_{\text{biodiesel}} + \dot{m}_{\text{biogás}}h_{\text{biogás}}) + \dot{m}_{\text{O}_2}h_{\text{O}_2} + \dot{m}_{\text{N}_2}h_{\text{N}_2} = W_s + \dot{m}_{\text{CO}_2}h_{\text{CO}_2} + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}h_{\text{H}_2\text{O}} + \dot{m}_{\text{O}_2}h_{\text{O}_2} + \dot{m}_{\text{N}_2}h_{\text{N}_2} =$$

$$0,0049*36679 + 0,0021*54490 + 0,034*0 + 0,111*0 = W + (0,020(-7541,045)) + (0,010(-10762,5)) + (0,011(1269,063)) + (0,111(1371,571)) =$$

$$W = 386,398 \text{ kW}_{\text{BIODIESEL} + \text{BIOGÁS}} (70/30)$$

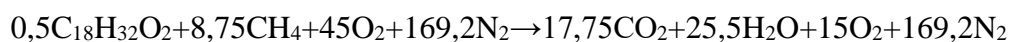
O volume de CO₂ emitido para a taxa de substituição de 30% do biodiesel por biogás é calculado seguindo a equação (7.12) e corresponde a

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01866 \text{ C} \frac{\text{Nm}^3\text{CO}_2}{\text{kg}} = 0,01866*76,5 = 1,427 \frac{\text{Nm}^3\text{CO}_2}{\text{kg}}$$

A eficiência calculada pela equação (7.10) é:

$$\eta_{\text{GLOBAL}} = \frac{W}{PCI*\dot{m}} = \frac{386,398}{(0,0049*36679)+(0,0021*54490)} = 31,35\%$$

Uma mistura composta por 50% de massa de biogás e 50% de massa de biodiesel terá em sua composição 140g de biodiesel e 140g de biogás, ou seja, 0,5 mol de C₁₈H₃₂O₂ e 8,75 mol de CH₄. A massa de carbono nessa composição corresponde a 76,07% da massa total do combustível. A reação de combustão da mistura é a seguir apresentada.



Nessa reação 280g de combustível reagem com 1440g de oxigênio e 4737,6g de nitrogênio e produzem 781g de dióxido de carbono, 459g de vapor de água, 480g de oxigênio e 4737,6g de nitrogênio. As vazões mássicas na equação são 0,007kg/s de combustível, onde 140g de biodiesel e 140g de biogás, 0,036kg/s de oxigênio e 0,118kg/s de nitrogênio do lado dos reagentes e como produtos, 0,019kg/s de dióxido de carbono, 0,011kg/s de vapor de água, 0,012kg/s de oxigênio e 0,118kg/s de nitrogênio.

A equação (7.8) novamente é montada com os valores obtidos e agora conhecidos

$$\dot{m}_{\text{comb}}h_{\text{comb}} + \dot{m}_{\text{O}_2}h_{\text{O}_2} + \dot{m}_{\text{N}_2}h_{\text{N}_2} = W_s + \dot{m}_{\text{CO}_2}h_{\text{CO}_2} + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}h_{\text{H}_2\text{O}} + \dot{m}_{\text{O}_2}h_{\text{O}_2} + \dot{m}_{\text{N}_2}h_{\text{N}_2} =$$

$$(\dot{m}_{\text{biodiesel}}h_{\text{biodiesel}} + \dot{m}_{\text{biogás}}h_{\text{biogás}}) + \dot{m}_{\text{O}_2}h_{\text{O}_2} + \dot{m}_{\text{N}_2}h_{\text{N}_2} = W_s + \dot{m}_{\text{CO}_2}h_{\text{CO}_2} + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}h_{\text{H}_2\text{O}} + \dot{m}_{\text{O}_2}h_{\text{O}_2} + \dot{m}_{\text{N}_2}h_{\text{N}_2} =$$

$$0,0035*36679 + 0,0035*54490 + 0,036*0 + 0,118*0 = W + (0,019(-7541,045)) + (0,012(-10762,5)) + (0,012(1269,063)) + (0,118(1371,571)) =$$

$$W = 411,912 \text{ kW}_{\text{BIODIESEL} + \text{BIOGÁS (50/50)}}$$

O volume de CO₂ emitido para substituição de 50% da massa do biodiesel por biogás é dada pela equação (7.12) e o resultado obtido é apresentado a seguir

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01866 \text{ C} \frac{\text{Nm}^3\text{CO}_2}{\text{kg}} = 0,01866 * 76,07 = 1,419 \frac{\text{Nm}^3\text{CO}_2}{\text{kg}}$$

Onde a eficiência calculada pela equação (7.10) é:

$$\eta_{\text{GLOBAL}} = \frac{W}{PCI * \dot{m}} = \frac{411,912}{(0,0035*36679) + (0,0035*54490)} = 29,09\%$$

As emissões e a determinação do quanto um combustível, ou um biocombustível, é poluente ao meio ambiente também podem ser determinadas seguindo outros métodos, como o método Well To Tank (WTT) e o método Tank To Wheel (TTW).

No método WTT calculam-se as emissões referentes a toda a cadeia produtiva do combustível, desde sua extração no caso do petróleo, ou do plantio no caso da soja para biodiesel, passando pelo processamento até a disponibilização do produto final ao consumidor como combustível acabado, enquanto o método TTW analisa as emissões provenientes da queima do combustível e sua consequente produção de energia (REIS, 2019).

O método Well To Wheel (WTW) consiste na análise completa, considerando os dois outros métodos, e por isso pode ser considerada uma maneira mais completa de se analisar o Ciclo de Vida de um produto, ou no caso específico deste trabalho, um veículo abastecido com determinado combustível (OLIVEIRA, 2020).

A análise de toda a cadeia produtiva e suas emissões foge ao objetivo deste trabalho, sendo por isso feita apenas a análise só do processo de combustão, ou seja, a análise TTW dos combustíveis já considerados. O Custo Ambiental do Ciclo de Vida da operação a diesel será calculada para referência, assim como este também será calculado para a operação do motor convencional abastecido apenas com biodiesel.

As condições de abastecimento com biocombustíveis em modo *Dual Fuel* contendo biogás nas proporções de 20%, 30% e 50%, respectivamente, serão agora chamados de cenários de substituição 1, 2 e 3. As características dos combustíveis, bem como suas vazões serão mantidas para essa segunda análise.

Novamente a análise será baseada em um caminhão de uso rodoviário, sendo para este caso o caminhão escolhido o Volvo FH540. Tal escolha se deve ao fato de este ser o caminhão pesado mais vendido no Brasil nos últimos anos. A potência gerada pelo motor deste caminhão é de 540cv, que convertidos correspondem a 397,169 kW (VOLVO CAMINHÕES BRASIL). O valor de aquisição para esse veículo, novo, no ano de 2020, segundo a tabela FIPE, corresponde a R\$ 654.451,00 (FIPE, 2020).

Segundo uma pesquisa da Confederação Nacional do transporte, realizada no ano de 2019, caminhões desse porte no Brasil percorrem uma média de 8500 km ao mês, ou 102000 km ao ano. A utilização é em média de 11,5 horas por dia e a idade média da frota desse tipo de veículo é de 15,2 anos. O custo médio com revisões é de R\$ 13.312,65 ao ano (CNT, 2019).

O Custo Ambiental do Ciclo de Vida (eLCC) utiliza a análise de diversos parâmetros e custo internos e externos, como custos de aquisição e manutenção, para determinar o custo do ciclo de vida de um produto e pode ser obtido através da equação (7.16) (OLIVEIRA, 2020).

$$C_{eLC} = C_{CAP} + (C_{OP} + C_{REP}) * (1 + d_{rate})^{-J} \quad (7.16)$$

Onde C_{eLC} corresponde ao custo anual para o ciclo de vida, C_{CAP} é o custo capital do caminhão, C_{OP} é o custo operacional, C_{REP} corresponde ao custo de reposição de tecnologia, todos em R\$/km, d_{rate} é a taxa de juros do mercado, em % ao ano e J é o tempo de vida.

O C_{CAP} para o caminhão modificado para a operação em modo Dual Fuel será considerado como o custo original do caminhão de R\$ 654.451,00, mais o custo de adaptação de um kit GNV veicular de última geração multiplicado por cinco, onde este custa aproximadamente R\$ 4.000,00 em 2020, totalizando R\$ 674.451,00. A multiplicação por

cinco deve-se ao fato de a parte mais onerosa do processo de conversão ser a compra dos reservatórios de combustível gasoso, e devido a necessidade de armazenamento de grandes quantidades de biogás o caminhão precisaria de cinco cilindros reservatórios, ou mais, em relação a um veículo comum.

O C_{REP} será considerado nulo, uma vez que feita a conversão para a operação em modo *Dual Fuel*, a tecnologia não precisará de reposição e os custos de manutenção não diferem dos custos de um motor operante no modo convencional apenas a diesel.

O custo operacional pode ser determinado pela fórmula (7.17) (OLIVEIRA, 2020).

$$C_{OP} = C_m + C_n + C_{CO_2} \quad (7.17)$$

Onde C_m , C_n e C_{CO_2} correspondem respectivamente ao custo de manutenção, em R\$/km, custo da energia suprida pelo combustível, em R\$ e custo de CO_2 , em R\$/km, esse último determinado pela fórmula (7.18) (OLIVEIRA,2020).

$$C_{CO_2} = E_{CO_2} * P_{CO_2} \quad (7.18)$$

Nessa equação E_{CO_2} e P_{CO_2} representam respectivamente a emissão de CO_2 , em kg de CO_2/h e o preço de CO_2 no mercado de créditos de carbono, em R\$/kg. O cálculo do valor de E_{CO_2} é feito a partir da equação (7.19) (OLIVEIRA, 2020).

$$E_{CO_2} = \dot{m}_{fuel} * F_{fuel} \quad (7.19)$$

Onde \dot{m}_{fuel} corresponde a vazão de combustível ou biocombustível, em kg/h, e F_{fuel} corresponde ao fator de emissão de CO_2 do combustível, em kg de CO_2 por kg de combustível, sendo este obtido através do balanceamento da equação química da combustão dos determinados combustíveis.

Considerando os cenários de abastecimento já citados, serão calculados e comparados os quatro valores obtidos para o custo do ciclo de vida ambiental do caminhão de carga proposto, sendo para o primeiro cálculo quando o caminhão abastecido apenas com diesel, o cenário de substituição 1 para sistema *Dual Fuel* com 20% de combustível gasoso, cenário 2 para 30% de substituição com combustível gasoso e cenário 3 com 50% de substituição com combustível gasoso. A tabela 18 agrupa os valores do fator de emissão e a

vazão mássica de cada um dos combustíveis, conhecidos através do balanço estequiométrico de cada uma das reações de combustão, e apresenta os valores obtidos para a emissão de CO₂ em cada uma das condições propostas.

Tabela 18 - Cálculo de E_{CO2}

Combustível	F _{fuel} (kg de CO ₂ por kg de combustível)	m _{fuel} (kg/h)	E _{CO2} (kg CO ₂ /h)
Diesel	3,115	25,200	78,498
Biodiesel	2,828	25,200	71,266
Cenário 1	2,828	20,160	70,872
(80% Biodiesel e 20% Biogás)	2,750	5,040	
Cenário 2	2,828	17,640	70,676
(70% Biodiesel e 30% Biogás)	2,750	7,560	
Cenário 3	2,828	12,600	70,283
(50% Biodiesel e 50% Biogás)	2,750	12,600	

Fonte: Elaboração própria.

O preço do CO₂ em janeiro de 2021 é de 34,24 euro/ton (investing.com.br, 2021) e considerando a cotação do euro em R\$6,63 na mesma data, calcula-se um P_{CO2} equivalente a 0,227 R\$/kg de CO₂. Conhecidos os valores de E_{CO2} e de P_{CO2}, o C_{CO2} pode ser então calculado para cada um dos cenários, em R\$/kg e R\$/km, conforme a tabela 19.

Tabela 19 - Cálculo do C_{CO2}

Combustível	E _{CO2} em kg de CO ₂ /h	P _{CO2} em R\$/kg de CO ₂	C _{CO2} em R\$/kg	C _{CO2} em R\$/km
Diesel	78,498	0,227	17,819	0,198
Biodiesel	71,266	0,227	16,177	0,179
Cenário 1	70,872	0,227	16,088	0,178
Cenário 2	70,676	0,227	16,043	0,178
Canário 3	70,283	0,227	15,954	0,177

Fonte: Elaboração própria.

O custo de manutenção, C_m, pode ser obtido através da divisão do custo médio anual das revisões pela distância média percorrida em um ano. Assim, com um custo médio de R\$13.312,65 ao ano e percorrendo 102000 km no mesmo período, estima-se, para um

caminhão rodoviário de grande porte, um custo de manutenção de 0,131 R\$/km. Este mesmo custo será considerado para todos os cenários, pois além do custo inicial para a conversão do motor para operação em modo dual fuel, não haveriam custos extras com manutenção devido a este sistema.

O custo da energia suprida pelo combustível, C_n , é calculado a partir do conhecimento do custo do combustível, sua vazão mássica e a velocidade média do veículo. A tabela 20 demonstra os valores de C_n para o diesel e para cada cenário de substituição considerado.

Tabela 20 - Valores de C_n em R\$/km

Combustível	C_n em R\$/km
Diesel	1,034
Biodiesel	1,210
Cenário 1	0,899
Cenário 2	0,832
Cenário 3	0,696

Fonte: Elaboração própria.

Conhecidos os valores de C_m , C_n e C_{CO_2} , pode-se calcular o valor de C_{OP} para todas as condições de operação. A tabela 21 agrupa as incógnitas envolvidas e os valores obtidos para o cálculo de C_{OP} .

Tabela21 - Cálculo de C_{OP}

	C_m em R\$/km	C_n em R\$/km	C_{CO_2} em R\$/km	C_{OP} em R\$/km
Diesel	0,131	1,034	0,198	1,363
Biodiesel	0,131	1,210	0,179	1,520
Cenário 1	0,131	0,899	0,178	1,208
Cenário 2	0,131	0,832	0,178	1,141
Cenário 3	0,131	0,696	0,177	1,004

Fonte: Elaboração própria

O cálculo do custo ambiental do ciclo de vida do veículo é feito a partir do conhecimento do custo capital, dos custos operacionais e o custo de reposição de tecnologia, seguindo a equação (7.16).

O valor do custo capital é corrigido pelo Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo, IPCA, calculado entre os anos de 2015 e 2019, onde como resultado encontrou-se um fator de correção correspondente a 2,8. A taxa de juros do mercado será considerada de 4,5% a.a., que correspondeu ao valor de fechamento da taxa SELIC no ano de 2019. (OLIVEIRA, 2020).

O Custo Ambiental do Ciclo de Vida do veículo para todas as condições de abastecimento e ao longo dos 15 anos de sua vida útil e sua média são apresentados na tabela 22.

Tabela 22 - Cálculo de C_{eLC} em R\$/km

Tempo (anos)	Diesel (Motor convencional)	Biodiesel (Motor convencional)	Cenário 1 (Motor Dual Fuel)	Cenário 2 (Motor Dual Fuel)	Cenário 3 (Motor Dual Fuel)
1	1,429	1,458	1,438	1,425	1,400
2	1,227	1,232	1,258	1,256	1,251
3	1,190	1,191	1,225	1,225	1,224
4	1,183	1,183	1,219	1,219	1,218
5	1,182	1,182	1,218	1,218	1,218
6	1,182	1,182	1,218	1,218	1,218
7	1,182	1,182	1,218	1,218	1,218
8	1,182	1,182	1,218	1,218	1,218
9	1,182	1,182	1,218	1,218	1,218
10	1,182	1,182	1,218	1,218	1,218
11	1,182	1,182	1,218	1,218	1,218
12	1,182	1,182	1,218	1,218	1,218
13	1,182	1,182	1,218	1,218	1,218
14	1,182	1,182	1,218	1,218	1,218
15	1,182	1,182	1,218	1,218	1,218
Média	1,203	1,205	1,236	1,235	1,232

Fonte: Elaboração própria

Como diversos custos são correlacionados, embora o diesel como combustível apresente um custo menor em relação ao biodiesel, ele emite mais CO₂, por isso seu custo com emissões é maior. Na prática o Custo Ambiental do Ciclo de Vida para a operação a diesel ou biodiesel apresenta valores muito próximos, com diferença inferior a 1%, as operações em modo *Dual Fuel* apresentam, em média, um custo aproximadamente 3% maior em todos os cenários ao longo dos anos.

8 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A tabela 23 e os gráficos a seguir apresentam os principais resultados obtidos através dos cálculos do capítulo anterior, agrupados de maneira a permitir uma mais simples visualização e comparação dos mesmos.

Tabela 23 - Compilação dos resultados para diferentes combustíveis e taxas de substituição de biodiesel por biogás

	DIESEL Motor convencional	BIODIESEL Motor convencional	80/20 Motor <i>dual fuel</i>	70/30 Motor <i>dual fuel</i>	50/50 Motor <i>dual fuel</i>
PCI (kJ/kg)	44233	36679	40241	42022	45584
Potência (kW)	393,95	326,89	361,11	386,39	411,91
Eficiência (%)	27,23	27,32	28,19	31,35	29,09
V_{CO2} (Nm³CO₂/kg)	1,586	1,440	1,431	1,427	1,419
C_{eLC} (R\$/km) médio	1,203	1,205	1,236	1,235	1,232

Fonte: Elaboração própria.

As bibliografias consultadas apresentaram um valor para o PCI do biogás com até 99% de concentração de metano de 11661,02 kcal/kg (LIMA e PASSAMANI, 2012), que convertido corresponde a aproximadamente 48790 kJ/kg, próximo aos 54490 kJ/kg calculados para o biogás teórico com 100% de metano. A geração de potência e a eficiência não foram analisados pois não há como utilizar apenas biogás nos motores adaptados.

O PCI do biodiesel encontrado de 36679 kJ/kg está próximo aos valores obtidos pelos autores que variou entre 35,39 MJ/kg para o biodiesel de gordura de frango (SILVA et al., 2012) e 40,15 MJ/kg para o biodiesel de Pequi (RAMOS et al., 2000). O PCI do diesel também ficou próximo ao consultado nas bibliografias, com o valor encontrado de 44233 kJ/kg contra valores entre 40,14 MJ/kg (WERNCKE, 2014) a 45,31 MJ/kg (RAMOS et al., 2000).

O gráfico 1 apresenta o poder calorífico inferior para os diferentes combustíveis e taxas de substituição do biodiesel por biogás.

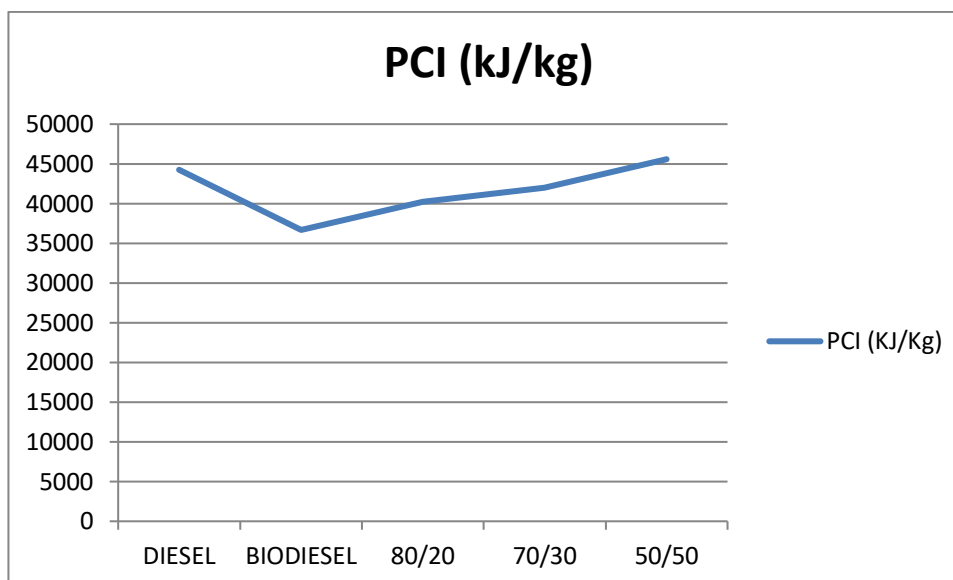


Gráfico 1 - Poder calorífico dos combustíveis e misturas
Fonte: Elaboração própria.

Nota-se pelo gráfico o quanto o poder calorífico inferior do biodiesel é menor que o do diesel convencional, diferença que corresponde a quase 18%, por isso, como já era previsto, a potência gerada pelo motor abastecido apenas com o biodiesel seria consideravelmente menor, fato comprovado pelos diversos autores citados e consultados.

Deve-se lembrar, porém, que neste trabalho, para simplificação das análises, o diesel foi tratado como composto apenas por moléculas de $C_{16}H_{34}$ e o biodiesel apenas como moléculas de $C_{18}H_{32}O_2$, o que causa um distanciamento dos valores obtidos teoricamente através de equações dos valores obtidos na prática.

O aumento do PCI das misturas contendo biocombustíveis nas operações em modo *Dual Fuel* deve-se ao fato do biogás, tratado neste trabalho como composto apenas por CH_4 , apresentar um alto valor para o seu PCI em kJ/kg, mais alto este que o do próprio biodiesel e do diesel (54490, 36679 e 44233 kJ/kg respectivamente), por isso, quanto maior a taxa de substituição do biodiesel pelo biogás, maior será o PCI da mistura.

Assim como ocorre na comparação entre o diesel o biodiesel, a simplificação do biogás como CH_4 , distancia os resultados obtidos dos resultados práticos, porém, todos os valores estão próximos e condizentes com as literaturas consultadas.

O gráfico 2 apresenta a potência produzida por cada um dos combustíveis e cada uma das composições entre biodiesel e biogás.

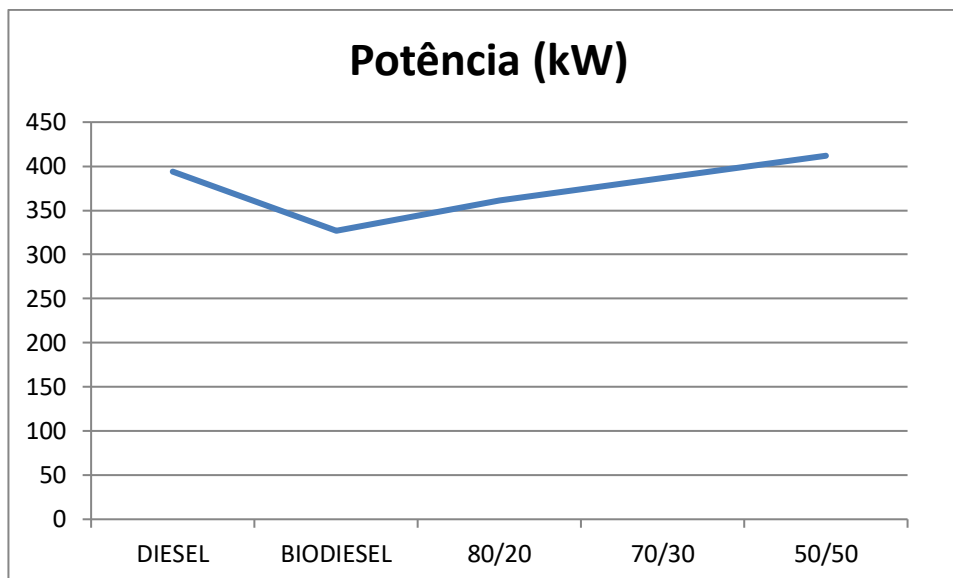


Gráfico 2 -Potência produzida pela combustão de cada combustível e misturas
Fonte: Elaboração própria

Novamente, atribui-se a menor potência gerada na condição de abastecimento com biodiesel puro e nos primeiros dois cenários de operação em modo *Dual Fuel* (20 e 30% de biogás) ao menor poder calorífico do combustível e mistura. As potências geradas nessas operações, que corresponderam a 326,89 kW, 361,11 kW e 386,39 kW, respectivamente, ante os 393,95 kW da operação a diesel, corresponderam a uma perda de potência de 17%, 8% e 2%, respectivamente.

No cenário onde o biogás atende a uma demanda de 50% da vazão de combustível a situação se reverte, e a potência produzida pelo motor supera a produzida na operação apenas a diesel, com 411,912 kW produzidos contra os 393,95 kW originais, o que corresponde a uma diferença de 4,6%, sendo esse portanto, o melhor cenário no quesito de geração de potência.

Os autores que operaram motores a diesel ou biodiesel abastecidos com um combustível gasoso, como o biogás ou o GNV, configurando um cenário similar de operação em modo *Dual Fuel*, encontraram resultados similares, onde a potência crescia com o aumento da taxa de substituição do combustível líquido pelo gasoso.

O gráfico 3 apresenta a variação da eficiência do processo de combustão entre os diferentes combustíveis e misturas.

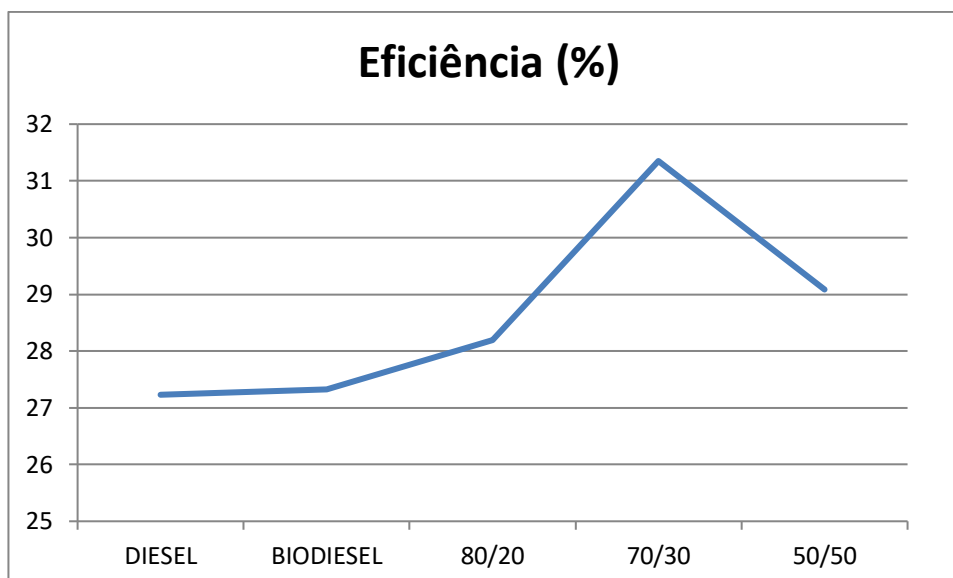


Gráfico 3- Eficiência na conversão de calor para cada combustível e misturas
Fonte: Elaboração própria

A variação encontrada para a eficiência, considerando como referência o valor da operação a diesel, foi crescente nas condições de abastecimento com o biodiesel puro e nos dois primeiros cenários da operação *Dual Fuel*, com valores de 27,32%, 28,19% e 31,35%, respectivamente, contra os 27,23% obtidos da operação a diesel, o que correspondeu a uma diferença de 0,3%, 3,5% e 15,1%.

No último cenário de operação no modo *Dual Fuel* houve uma pequena redução na eficiência, com valor calculado de 29,09%, ou seja, uma queda de 7% na eficiência em comparação com o cenário com a taxa de substituição de 30% de biogás. Ainda assim o valor é maior que as demais operações, a diesel, biodiesel e com 20% de biogás.

O gráfico 4 apresenta o valor de CO₂ emitido por kg de combustível queimado, o que pode ser interpretado como qual combustível emite mais poluente e qual emite menos.

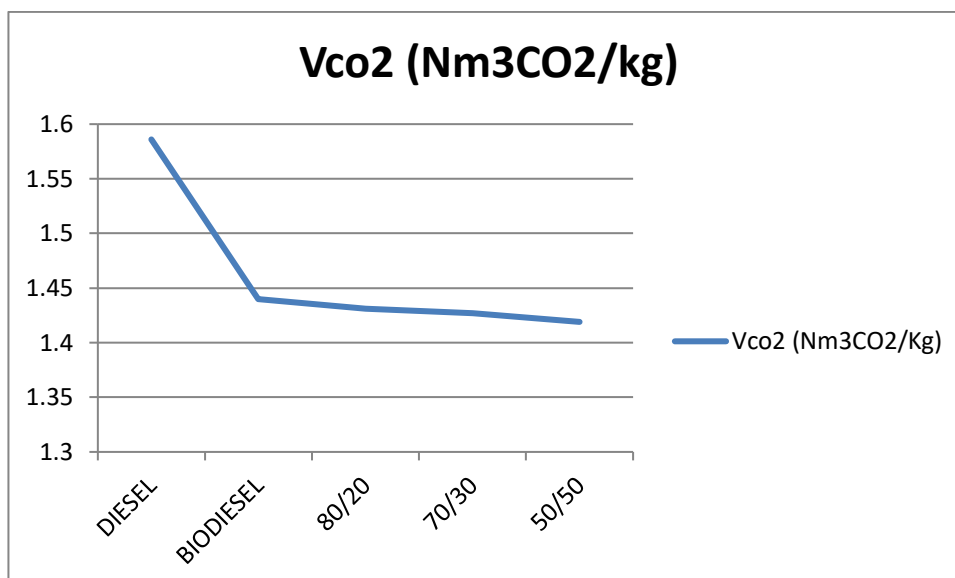


Gráfico 4- Emissão de CO₂ por kg de combustível queimado
Fonte: Elaboração própria

Como já esperado o combustível mais poluente foi o diesel convencional, enquanto a emissão de CO₂ do biodiesel foi sensivelmente inferior (1,586 do biodiesel contra 1,440 do diesel mineral) e continuou decaindo com o aumento da taxa de substituição do biodiesel pelo biogás (1,431, 1,427 e 1,419, para 20%, 30% e 50% de biogás, respectivamente). Tal fato já era esperado pois a comparação direta entre a emissão de CO₂ do diesel, do biodiesel e do biogás apontaram o biogás como menor poluidor entre os três. Conforme a quantidade de biogás introduzido aumenta, a quantidade de CO₂ emitido decresce. O V_{CO2} está ligado diretamente a porcentagem da massa de carbono contida do combustível, sendo esta porcentagem maior no diesel e inferior na mistura composta por 50% de biodiesel e 50% de biogás (84,95% no diesel contra 76,07% na mistura).

O gráfico 5 é traçado através dos valores obtidos e apresentados na tabela 23 para o Custo Ambiental do Ciclo de Vida, ano a ano, em R\$/km, em cada uma das condições de abastecimento consideradas.

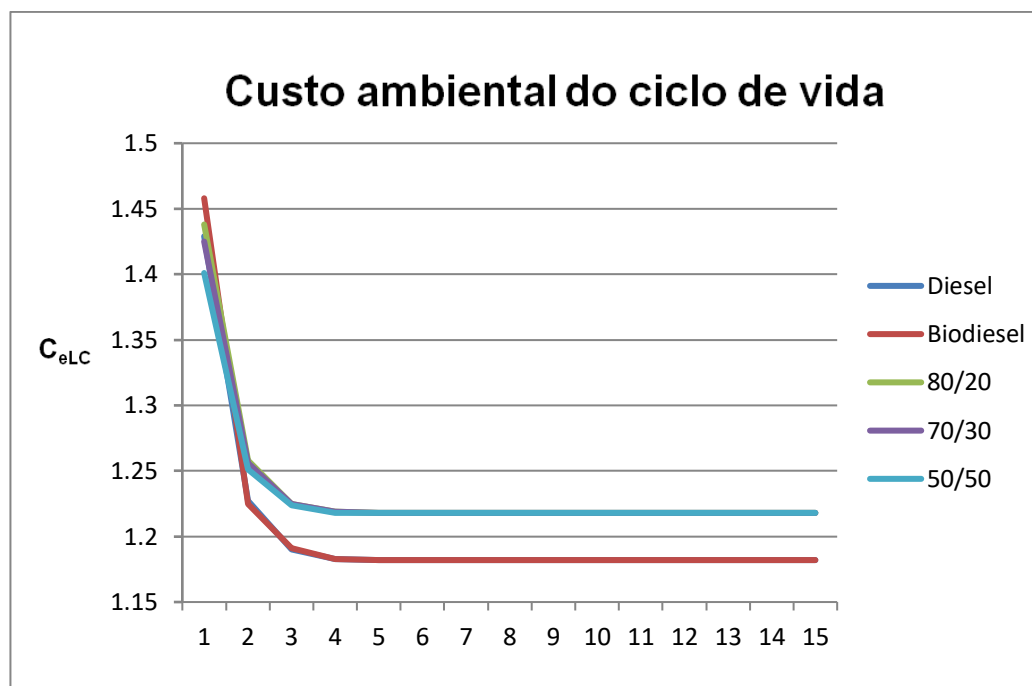


Gráfico 5- Custo ambiental do ciclo de vida do caminhão no intervalo de 1 a 15 anos
Fonte: Elaboração própria

Como apresentado anteriormente, o Custo Ambiental do Ciclo de Vida correlaciona diversos parâmetros, entre eles a vazão do combustível e o custo da energia suprida por esse, a quantidade de CO₂ emitida pelo processo de combustão, o custo de aquisição do veículo, entre outros.

Analisando o gráfico e comparando somente as curvas para a operação a diesel e a biodiesel puro nota-se que o custo da operação do caminhão movido a biodiesel nos primeiros anos é levemente maior, com 1,458 R\$/km do biodiesel contra 1,429 R\$/km do diesel puro, o que corresponde a uma diferença de aproximadamente 2%. Ao longo da vida útil do caminhão, porém, os custos se aproximam e a partir do quinto ano de operação apresentam o mesmo valor de 1,182 R\$/km. A diferença deve-se principalmente ao maior custo da energia suprida pelo biodiesel, que é mais caro que o diesel. Em contrapartida, as emissões do biocombustível são consideravelmente menores, o que reduz os custos de emissão de CO₂ e aproxima os custos finais.

A média entre as duas operações ao longo dos 15 anos da vida útil é de 1,205 R\$/km para a operação a biodiesel e 1,202 R\$/km para a operação a diesel, o que pode ser considerado como custos equivalentes.

Quando comparados apenas os cenários de operação em modo *Dual Fuel*, o que possui o menor C_{eLC} é o cenário com a maior taxa de substituição do combustível líquido pelo

gasoso, com 50% de biogás, onde o custo no primeiro ano de operação foi de 1,400 R\$/km. Os demais cenários apresentaram valores de 1,425 R\$/km para 30% de biogás e 1,438 R\$/km para 20% de biogás, que corresponderam a uma diferença de 1,7% e 2,7%, respectivamente. O menor custo de energia suprida pelo combustível e menores emissões de CO₂ do biogás foram os responsáveis por essa diferença, onde maiores taxas de substituição implicam em custos finais menores. A média entre todos os cenários foi bem próxima, novamente podendo ser tratadas com equivalentes.

Quando comparado o C_{eLC} entre todos os cenários, com a operação do motor convencional abastecido com diesel ou biodiesel e a operação *Dual Fuel* com as diferentes taxas de substituição, as curvas do gráfico de cruzam. O maior custo capital do motor convertido à operação em modo *Dual* faz com que este sempre apresente um C_{eLC} maior ao longo dos anos, mas as menores emissões de CO₂ e o menor custo de energia suprida pelo biogás faz com que as operações com taxas de substituição de 30% e 50% apresentem custos no primeiro ano de operação menores até que a operação a diesel, com 1,425 R\$/km, 1,400 R\$/km e 1,429 R\$/km, respectivamente. Ao longo da vida útil porém, o maior custo do veículo convertido sobressai-se sobre o menor custo do combustível e menores custos com emissões e por isso esse apresenta o C_{eLC} maior em comparação com o motor original.

A média entre a operação do motor convencional e a operação do motor convertido corresponde a uma diferença de aproximadamente 2,5%.

OLIVEIRA (2020) encontrou resultados semelhantes em seu estudo, onde calculou o Custo Ambiental do Ciclo de Vida para um ônibus urbano abastecido somente a diesel e em três cenários de substituição do combustível fóssil por biodiesel e biogás. Com taxas de substituição entre 75, 80 e até 85% de biogás com 25, 20 e 15% de biodiesel, respectivamente, os resultados obtidos apontaram um C_{eLC} inferior para a operação somente a diesel, com variação de aproximadamente 12, 7 e 3% para os respectivos cenários de substituição.

A maior variação do C_{eLC} se comparados os dois trabalhos pode ser atribuída ao consumo mais elevado do ônibus urbano, que trafega a baixas velocidades e pequenas distâncias diárias, o que eleva o seu consumo em km/l. Nesse caso, o custo suprido pela energia, ou seja, o custo com combustíveis, passa a ser mais relevante que o C_{CAP} . O caminhão de uso rodoviário apresenta uma operação completamente oposta, onde são percorridas longas distâncias a velocidades consideravelmente mais altas porém constantes, o que reduz seu consumo em km/l. Nesse tipo de operação os custos com combustível são

"diluídos" pelas longas distâncias percorridas e o C_{CAP} representa uma parcela mais relevante do C_{eLC} .

Os resultados obtidos neste trabalho estão de acordo com o encontrado pelos autores consultados e são apontados como as principais vantagens do biodiesel em relação ao diesel convencional, além de apontarem uma vantagem maior ainda para quando o motor operado em modo dual fuel com os dois biocombustíveis.

Os biocombustíveis estudados são boas promessas para um futuro próximo, onde a emissão de poluentes e a eficiência na geração de energia são cada vez mais importantes. O aproveitamento dos RSU e outros materiais orgânicos para a produção do biogás e seu uso como biocombustível, além de reduzirem o grande problema da geração de lixo urbano e resíduos industriais, é uma solução também para a gerar energia limpa e renovável. O biodiesel, que vem crescendo tanto em popularidade nos últimos anos, também contribui para uma geração de energia limpa e renovável, e sua longa cadeia produtiva é oportunidade de emprego para diversas pessoas e desenvolvimento de diversos setores econômicos.

9 CONCLUSÃO

Conclui-se que a análise energética apontou uma potência gerada de 393,950 kW pelo motor a diesel, enquanto para o biodiesel obteve-se 326,892 kW e no melhor cenário de combinação de biocombustíveis, com 50% de biodiesel e 50% de biogás, 411,912 kW o que significa uma perda de aproximadamente 17% de potência quando o biodiesel puro substitui o diesel, porém, com um aumento de quase 5% quando o motor é operado com a mistura de biocombustíveis.

A eficiência variou entre 27,23% para o diesel e 31,35% para a mistura de biocombustíveis, sendo o cenário de maior eficiência quando o motor em operação em modo *Dual* abastecido com uma combinação de 30% de biogás e 70% de biodiesel, correspondendo a 15% a mais de eficiência que a do motor quando operado apenas a diesel. O biodiesel apresentou uma eficiência de 27,32%, muito próxima e por isso considerada como equivalente a operação a diesel.

As emissões *TTW* de CO₂ são sempre menores para os biocombustíveis, sendo 9% inferiores para o biodiesel em relação ao diesel e até 11% inferior em relação a misturas dos biocombustíveis líquido e gasoso, além disso, os biocombustíveis não possuem enxofre em sua composição, por isso não há emissão desse gás, o mesmo não se aplica ao diesel, que possui enxofre em sua composição e emite compostos desse gás após o processo de combustão.

O Custo Ambiental do Ciclo de Vida, C_{eLC} , considerando a operação de um motor original utilizando diesel ou biodiesel apresentaram custos muito próximos, ou seja, o uso de biodiesel não encareceu de forma significativa o C_{eLC} de um caminhão de uso rodoviário.

Quando são comparados o C_{eLC} do caminhão com o motor original com o C_{eLC} da operação em modo *Dual* este último apresentou um custo maior ao longo dos anos, com uma diferença de aproximadamente 3%, que deve-se principalmente ao custo de conversão do veículo para o modo *Dual*. Diferença pequena se comparado os benefícios trazidos pelo uso de biocombustíveis.

O melhor cenário da operação do motor foi com a operação em modo *Dual* com a maior taxa de substituição do biodiesel por biogás, com 50% deste. Nesse caso a potência produzida foi a maior entre todos, com as menores emissões de poluentes e a segunda maior eficiência, o que corresponde a diversas vantagens técnicas dessa operação em relação as demais, inclusive se comparada a original. Este cenário também apresentou os menores custos

operacionais e o menor C_{eLC} entre todas as operações em modo *Dual* e embora este seja mais elevado que o custo da operação original a diesel, o acréscimo não superou os 3%, o que aponta também para sua viabilidade econômica.

Tais resultados demonstram que mesmo com um Custo Ambiental do Ciclo de Vida mais elevado no modo de operação *Dual Fuel*, os biocombustíveis ainda apresentam grandes vantagens sobre os combustíveis derivados de petróleo, como potência produzida próxima ou superior, maiores eficiências e menores emissões de poluentes.

Além dessas vantagens técnicas e econômicas, há ainda grande potencial de crescimento econômico do setor, o que atrai investimentos e gera empregos. O óleo utilizado para a produção do biodiesel ainda é majoritariamente extraído de sementes oleosas, como a soja, o que encarece seu custo final e gera conflitos entre a produção de biocombustível e a produção de alimentos, enquanto o óleo residual de frituras é pouco utilizado e baratearia o preço final do biocombustível. O biogás também pode ser muito melhor explorado e aproveitado, podendo ser produzido em maior escala devido a grande oferta de matéria prima proveniente dos RSU e das indústrias, agregando valor ao que hoje é considerado como lixo.

Fica como sugestão para trabalhos futuros a aplicação prática dos conceitos desse projeto, como ensaios em bancada de motores operados nos cenários aqui propostos e posteriormente testes de campo, convertendo-se um ou mais caminhões para a operação em modo *Dual* e utilizando-os na prática para o transporte de cargas pelo Brasil.

REFERÊNCIAS

ABREU, F. V. *et al.* **Avaliação Técnica e Econômica da Geração de Energia do Biogás nos Aterros de Gramacho e Seropédica.** Acta Scientiae et Technicae, [S.l.], v. 2, n. 1, Jul. 2014. ISSN 2317-8957. Disponível em: <<http://uezo.edu.br/ojs/index.php/ast/article/view/15>>. Acesso em: 25 de nov. 2020.

ANP [Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis]. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2019.** 2019. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/arquivos/central-conteudos/anuario-estatistico/2019/2019-anuario-versao-impressao.pdf>>. Acesso em: 16 de mar. 2021.

BARBOSA, R. L. *et al.* **Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de biodiesel.** Ciênc. agrotec, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1588-1593, set./out., 2008.

BIZZO, W. A. **Geração, distribuição e utilização de vapor.** Apostila de curso. 2003. Faculdade de Engenharia Mecânica UNICAMP.

BONOMETO, R. P. **Análise energética do processo experimental de produção de biodiesel a partir de óleo de frango.** 2009. 58 p. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu, 2009. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/90637>>. Acesso em: 25 de nov. 2020.

Brasil escola. **Óleo Diesel.** 2020. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/quimica/oleo-diesel.htm>>. Acesso em: 2 de abr. 2020.

BRAUN, S.; APPEL, L. G.; SCHMAL, M. **A Poluição Gerada por Máquinas de Combustão Interna Movidas à Diesel – A Questão dos Particulados. Estratégias Atuais para a Redução e Controle das Emissões e Tendências Futuras.** Quim. Nova, v. 27, n. 3, p. 472-482, 2003.

BRENNEISEN, P. J. **Desempenho de Motogerador de Ciclo Diesel Operando com Gás de Gaseificação/Diesel ou Biogás/Diesel.** 2013. 54 p. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel. 2013.

CAMARGO, M. N. *et al.* **Ciclo Real de um Motor de Ignição por Compressão que Trabalha em Regime Bicomcombustível: Diesel e Gás Natural.** 2013. Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal), p. 87-95, 2013.

CANAONLINE, 2019. **Nova Iguaçu vai receber a maior usina termelétrica movida biogás. 2019** Disponível em: <<http://www.canaonline.com.br/conteudo/nova-iguacu-vai-receber-a-maior-usina-termeletrica-movida-biogas.html>>. Acesso em: 16 de mar. 2021

CASTELLANELLI, M. *et al.* **Desempenho de motor ciclo Diesel em bancada dinâmométrica utilizando misturas diesel/biodiesel.** Eng. Agríc., Jaboticabal, v. 28, n. 1, p. 145-153, Mar. 2008. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162008000100015&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 29 de nov. 2020.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 5 ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006. 740 p.

Chiptronic. **Sistema Euro 6: tire suas dúvidas**. 2018. Disponível em: <<https://chiptronic.com.br/blog/sistema-euro-6-tire-suas-duvidas>>. Acesso em: 6 de abril 2021.

CNT [Confederação Nacional do Transporte]. **Perfil dos Caminhoneiros 2019**. 2019. Disponível em: <<https://www.cnt.org.br/perfil-dos-caminhoneiros>>. Acesso em: 16 de mar. 2021.

COELHO, S. T. *et al.* **A conversão da fonte renovável biogás em energia**. In. Políticas públicas para a Energia: Desafios para o próximo quadriênio. 2006. Brasília - DF. 2006.

COELHO, S. T. *et al.* **Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto**. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 2006, Campinas. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000100070&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 26 de nov. 2020.

COLLE, D. **Avaliação de Desempenho Energético de um Gerador Elétrico Operando no Modo Dual, Utilizando Biogás e Blendas de Biodiesel de Óleo Residual de Fritura**. 2018. 59 f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel. 2018.

CORREA, I. M. *et al.* **Desempenho de motor diesel com misturas de biodiesel de óleo de girassol**. Ciênc. agrotec., Lavras, v. 32, n. 3, p. 923-928, Jun 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-70542008000300033&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 26 de nov. 2020.

COSTA NETO, P. R. *et al.* **Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras**. Quím. Nova, São Paulo, v. 23, n. 4, p. 531-537, Ago 2000. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422000000400017&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 26 de nov. 2020.

COSTA, D.F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto**. 2006. 176 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

D`AGOSTO, M. A. *et al.* **Cenários de Penetração de Sistemas de Alimentação Dual-Fuel no Transporte Urbano de Passageiros por Ônibus**. In. 33º Congresso de Pesquisa e Ensino de Transporte da ANPET. Balneário Camboriú, 2019.

DALPAZ, R. **Avaliação Energética do Biogás com Diferentes Percentuais de Metano na Produção de Energia Térmica e Elétrica**. 2019. 91 p. Dissertação (Pós-Graduação em Sistemas Ambientais Sustentáveis) - Universidade do Vale do Taquari, Lajeado. Maio 2019

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis ano 2018**, 2018. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/analise-de-conjuntura-dos-biocombustiveis-2018>>. Acesso em: 16 de mar. 2021.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis ano 2019**, 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-489/Analise_de_Conjuntura_Ano_2019.pdf>. Acesso em: 16 de mar. 2021.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis ano 2017**, 2017. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/analise-de-conjuntura-dos-biocombustiveis-2017>>. Acesso em: 16 de mar. 2021

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Balanco Energético Nacional (BEN) 2020**: Ano base 2019, 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>. Acesso em: 16 de mar. 2021.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Balanco Energético Nacional (BEN) 2019**: Ano base 2018, 2019. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>. Acesso em: 16 de mar. 2021.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Balanco Energético Nacional (BEN) 2018**: Ano base 2017, 2018. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>>. Acesso em: 16 de mar. de 2021.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Balanco Energético Nacional (BEN) 2016**: Ano base 2015, 2016. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2016>>. Acesso em: 16 de mar. de 2021.

ESPERANCINI, M. S. T. *et al.* **Viabilidade Técnica e Econômica da Substituição de Fontes Convencionais de Energia por Biogás em Assentamento Rural do Estado de São Paulo**. Eng. Agríc., Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 110-118, abr. 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162007000100004&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 26 de nov. 2020.

FACCO, A.; SANTOS, F. V. **Análise de Viabilidade Técnica e Econômica da Implantação de um Grupo Motor-Gerador em uma Granja Suinícola**. 2012. 59 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2012.

FERRARI, R. A. *et al.* **Biodiesel de Soja: Taxa de Conversão em Ésteres Etilicos, Caracterização Físico-química e Consumo em Gerador de Energia**. Química Nova, v. 28, n. 1, 2005, p.19-23.

FERREIRA, A. A.; COSTA, Y. J. R. **Análise de Desempenho de um Motor de Combustão Interna Operando de Forma Dual (diesel + gás natural).** *In*: VII CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE. Campina Grande, 2010.

FIPE [Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas] **Preço Médio de Veículos.** 2020. Disponível em: <<https://veiculos.fipe.org.br/#caminhao-comum>>. Acesso em: 13 de jan. 2020.

FLUMIGNAM, D. L. *et al.* **Avanços brasileiros no desenvolvimento de normas técnicas analíticas para certificação e controle da qualidade de biodiesel.** *In*: LEMOS, E. G. M.; STRADIOTTO, N. R. (org.). Bioenergia, Desenvolvimento, Pesquisa e Inovação. São Paulo: Editora UNESP Cultura Acadêmica, 2012. cap. 25, p. 889-943.

GONÇALVES, A. C.; ALBUQUERQUE, M. C. F.; KIMURA, R. K. **Efeitos da utilização do biodiesel em motores de combustão interna.** *In*: LEMOS, E. G. M.; STRADIOTTO, N. R. (org.). Bioenergia, Desenvolvimento, Pesquisa e Inovação. São Paulo: Editora UNESP Cultura Acadêmica, 2012. cap. 16, p. 521-546.

GUIA Prático do Biogás: Geração e Utilização. 5. ed. Gülzow Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2010. 233 p.

IANNICELLI, A. L. **Reaproveitamento Energético do Biogás de uma Indústria Cervejeira.** 2008. 84 p. Dissertação (Mestrado em Energia e Gestão Ambiental da Indústria) - Universidade de Taubaté, Taubaté, 2008.

IBP. **Evolução do Consumo de Diesel e Atividade Econômica, 2019.** Disponível em: <<https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/consumo-de-diesel-e-atividade-economica/>>. Acesso em: 16 de mar. 2021.

KARLSSON, T. *et al.* **Manual básico de biogás.** 1. ed. Lajeado, UNIVATES, 2014. 70 p.

KOIKE, G. H. A. K. **Sistema de controle digital para fornecer etanol como combustível complementar em motores 4 tempos de ignição por compressão funcionando com biodiesel.** 2008. 160 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

KOSLOWSK, L. A. D. *et al.* **Estudo da Emissão dos Gases de Combustão Provenientes da Queima do Diesel S10 e S50.** *In*: XX Congresso Brasileira de Engenharia Química, 2014. Florianópolis, 2014.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. (ed.). **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato.** Concórdia: Sbera, Embrapa Suínos e Aves, 2019. 209 p.

LIMA, A. C. G.; PASSAMANI, F. C. **Avaliação do Potencial Energético do Biogás Produzido no Reator UASB da ETE-UFES.** 2012. 106 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO, Vitória.

LOPES A. *et al.* **Combustível renovável em trator agrícola: experiências na utilização de biodiesel.** In: LEMOS, E. G. M.; STRADIOTTO, N. R. (org.). Bioenergia, Desenvolvimento, Pesquisa e Inovação. São Paulo: Editora UNESP **Cultura** Acadêmica, 2012. cap. 15, p. 491-520.

LOPES, A.; FURLANI, C. E. A.; GROTTA, D. C. C.. **Consumo de biodiesel etílico de óleo residual em trator agrícola variando o percentual de mistura biodiesel e diesel de petróleo.** *Revista da ANPG: Ciência, Tecnologia e Políticas Educacionais*, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 10-15, 2009.

MACHADO. G. B.; MELO T. C. C.; LASTRES. L. F. M. **Panorama da utilização do Gás Natural Veicular em veículos pesados no Brasil.** In: IV LACGEC - Congreso Latinoamericano y del Caribe de Gas y Electricidad, Rio de Janeiro. 2004.

MARTINELLI Jr., L. C. **Máquinas Térmicas I: noções sobre geradores de vapor.** Cadernos UNIJUÍ, Série Tecnologia Mecânica, nº 8, Editora Unijuí, Ijuí, RS, 1998.

MARTINS, F. M.; OLIVEIRA, P. A. V. **Análise econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás na suinocultura.** Eng. Agríc., Jaboticabal, v. 31, n. 3, p. 477-486, Jun 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162011000300008&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 26 de nov. 2020.

MILANEZ, A. Y. *et al.* **Biogás de Resíduos Agroindustriais: Panorama e Perspectivas.** BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 47, p. 221-276, mar. 2018.

MME [Ministério de Minas e Energia]. **Resenha Energética Brasileira exercício de 2018.** 2019. Disponível em: <<http://antigo.mme.gov.br/web/guest/secretarias/planejamento-e-desenvolvimento-energetico/publicacoes/resenha-energetica-brasileira>>. Acesso em: 16 de mar. 2021.

MME [Ministério de Minas e Energia]. **Resenha Energética Brasileira ano base 2019.** 2020. Disponível em: <<http://antigo.mme.gov.br/web/guest/secretarias/planejamento-e-desenvolvimento-energetico/publicacoes/resenha-energetica-brasileira>>. Acesso em: 16 de mar. 2021.

MOREIRA, A. F.; COUTO F. P.; **A Termodinâmica do Motor de Combustão Interna, Implicações sociais do uso dessa tecnologia.** Minas Gerais. 2019. Disponível em: <<http://www.cac.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/30/2019/10/main.pdf>> Acesso em: 16 de mar. 2021

NETO, P. R. C.; ROSSI L. F. S. **Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras.** Química Nova, São Paulo, v. 23, n. 4, p. 531-537, agosto 2000. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422000000400017&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 26 de nov. 2020.

OKAMURA, L. A. **Avaliação e Melhoria do Poder Calorífico de Biogás Proveniente de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

OLIVEIRA, F. B.; VANDRESEN, M.; PEREIRA, M. **Desenvolvimento de Kit para Conversão de Motores Diesel Estacionários de Geradores para Operar com Mistura Diesel-Gás Natural**. 2010. Caderno de Publicações Acadêmicas, v.2, pp. 62-70.

OLIVEIRA, K. F. **Mistura Biogás-Biodiesel alimentando motores dual a compressão por ignição na frota de ônibus do município de Volta Redonda**. 2020. 109 f. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia de Produção e Sistemas) - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2020.

OLIVEIRA, L. E.; SILVA M. L. C. P. D. **Comparative study of calorific value of rapeseed, soybean, jatropha curcas and crambe biodiesel**. International Conference on Renewable Energies and Power Quality. Bilbao (Spain), mar 2013.

OLIVEIRA, P. A. V.; MARTINS, F. M. **Utilização do biogás na suinocultura para geração de energia elétrica**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 36., 2007, Bonito. Anais [...]. Jaboticabal: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2007.

PARENTE, E. J. S. **Biodiesel: uma aventura tecnológica num país engraçado**. Fortaleza, 2003. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/63748762/BIODIESEL-UMA-AVENTURA-TECNOLOGICA-NUM-PAIS-ENGRACADO>>. Acesso em: 26 de nov. 2020

PEREIRA, R.H.; BRAGA, S. L.; BRAGA, C. V. M. - **Substituição parcial do óleo diesel pelo gás natural em motores** – atratividade da tecnologia e sua avaliação experimental. In: CONEM 2004, Belém, 2004.

RAMOS, R. A. V. *et al.* **Aspectos relacionados à produção de biodiesel com aproveitamento de resíduos, caracterização e testes de misturas em motores de combustão interna**. In: LEMOS, E. G. M.; STRADIOTTO, N. R. (org.). Bioenergia, Desenvolvimento, Pesquisa e Inovação. São Paulo: Editora UNESP Cultura Acadêmica, 2012. cap. 27, p. 979-1058.

REIS, G. E. **Avaliação do impacto das plataformas de mobilidade na energia e emissões**. 2019. 80 f. Dissertação (Mestra Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) - Universidade de Lisboa, Lisboa, 2019.

SANTOS, D. F. *et al.* **Análise Experimental de um Motor Diesel de Médio Porte em Operação Mono e Bicomustível**. SCI. CUM IND, v. 4, n. 38, p. 38-47, 2016.

SCHLOSSER, J. F. *et al.* **Comportamento de um motor de ignição por compressão trabalhando com óleo Diesel e gás natural**. Eng. Agríc., Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 736-744, Dec. 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162004000300026&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 26 de nov. 2020.

SILVA, F. M.; SANTOS, A. M.; BARBOSA, C. R. F.; **Desempenho de um motor sob dois sistemas de alimentação a duplo combustível: metano e diesel.** *Engenharia Agrícola* [S.l.], v. 17, n. 3, p. 93-104, 1997.

SILVA, M. J. *et al.* **Motor gerador ciclo diesel sob cinco proporções de biodiesel com óleo diesel.** *Rev. bras. eng. agríc. ambient.*, Campina Grande, v. 16, n. 3, p. 320-326, 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662012000300014&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 26 de nov. 2020.

SORANSO, A. *et al.* **Desempenho dinâmico de um trator agrícola utilizando biodiesel destilado de óleo residual.** *Rev. bras. eng. agríc. ambient.*, Campina Grande, v. 12, n. 5, p. 553-559, Oct. 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662008000500018&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 26 de nov. 2020.

SOUZA, R. G.; SILVA, F. M.; BASTOS A. C.. **Desempenho de um Conjunto Motogerador Adaptado a Biogás.** *Ciênc. agrotec.*, Lavras, v. 34, n. 1, p. 190-195, jan./fev., 2010.

SOUZA, S. N. M.. **Manual de geração de energia elétrica a partir do biogás no meio rural.** Cascavel: Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), 2016.

SOUZA, S. N. M. *et al.* **Viabilidade econômica de uso de biogás da bovinocultura para geração de eletricidade e irrigação.** *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA*, 35., 2006, João Pessoa. Anais [...]. Jaboticabal: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2006.

SOUZA, S. N. M. *et al.* **Custo da Eletricidade Gerada em Conjunto Motor Gerador Utilizando Biogás da Suinocultura.** *Acta Scientiarum Technology*, Maringá, v.26, n.2, p.127-133, 2004.

SOUZA, J.; LIMA, H. Q.; SCHAEFFER, L. **Desenvolvimento de tecnologia para utilização de biogás e biodiesel em motor de ciclo diesel.** *IX CONGRESSO SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL*, AGRENER GD. Itajubá, 2013.

SUZUKI, A. B. P. *et al.* **Uso de biogás em motores de combustão interna.** *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias*. Guarapuava - PR, v. 4, n. 1, p. 221-237, 2011.

TABILE, R. A. *et al.* **Biodiesel de mamona no diesel interior e metropolitano em trator agrícola.** *Eng. Agríc.*, Jaboticabal, v. 29, n. 3, p. 412-423, Set. 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162009000300008&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 26 de nov. 2020.

VOLVO CAMINHÕES BRASIL. **Fichas técnicas.** Disponível em: <<https://www.volvotrucks.com.br/pt-br/trucks/truck/volvo-fh/specifications/data-sheets.html>>. Acesso em: 16 mar. 2021.

WERNCKE, I. **Desempenho energético de um motor gerador de 5 kVA operando no modo dual com diesel, biodiesel de crambe e biogás.** 2014. 60 p. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2014.

ZUNIGA, A. D. G. *et al.* **Revisão: propriedades físico-químicas do biodiesel.** Pesticidas: r. ecotoxicol. e meio ambiente, Curitiba, v. 21, p. 55-72, jan./dez. 2011