

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

**MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA DUAL
OPERANDO COM DIESEL, BIODIESEL E GÁS NATURAL:
ANÁLISES DE DESEMPENHO E EMISSÕES**

Fernando José da Silva

Campina Grande, PB-Brasil

Fevereiro de 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

**MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA DUAL OPERANDO COM
DIESEL, BIODIESEL E GÁS NATURAL: ANÁLISES DE
DESEMPENHO E EMISSÕES**

Fernando José da Silva

Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Orientador

Campina Grande, PB-Brasil

Fevereiro de 2014.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586m Silva, Fernando José da.
Motor de combustão interna dual operando com diesel, biodiesel e gás natural: análises de desempenho e emissões / Fernando José da Silva.
– Campina Grande, 2014.
205 f.: il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2014.

"Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima". Referências.

1. Motor de Combustão Interna Dual. 2. Diesel. 3. Biodiesel.
4. Gás Natural. I. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. II. Título.

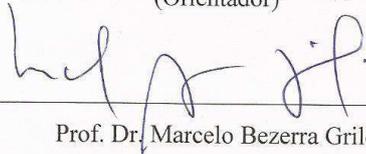
CDU 621.43(043)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE **FERNANDO JOSÉ DA SILVA** APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE.

Tese de Doutorado **aprovada** em 24 de Fevereiro de 2014



Prof. Dr. Antônio Gilson Barbosa de Lima
UFCG/CCT/UAEM
(Orientador)



Prof. Dr. Marcelo Bezerra Grilo
UFCG/CCT/UAEM
(Examinador Interno)



Prof. Dr. Carlos Antônio Cabral dos Santos
UFPB/CT/DEM
(Examinador Externo)



Prof. Dr. Yoge Jerônimo Ramos da Costa
UFCG/CCT/UAEM
(Examinador Externo)



Prof. Dr. Celso Rosendo Bezerra Filho
UFCG/CCT/UAEM
(Examinador Externo)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Manoel Gomes da Silva e Rosa Maria da Silva (*In memorian*), aos meus irmãos, e com amor e um carinho muito especial, a minha esposa Nailza Vitor dos Santos Silva e meus queridos filhos Felipe de Carvalho Silva, Fábio de Carvalho Silva (*In memorian*), Fred de Carvalho Silva, Olga Eliza Rocha e Silva, Nívea Stefani Vitor da Rocha e Natanni Vitor da Rocha.

AGRADECIMENTOS

A Deus onipotente e onipresente, por ter me concedido a graça de mais um período de aprendizado na vida e poder concluir esta etapa de renovação de conhecimentos.

Ao professor Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, pela grande dedicação, orientação e estímulo para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, esposa, filhos e irmãos pelo incentivo em todos os momentos de minha vida.

A CAPES, CNPq e FAPEAL, pelo suporte financeiro concedido.

A CETENE (Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste) pelo fornecimento do biodiesel para realização dos experimentos.

A QUALITEX – Engenharia e Serviços Ltda. Pelas análises realizadas.

Aos professores das Unidades Acadêmicas de Engenharia Mecânica e Elétrica da UFCG, os quais contribuíram com este trabalho, especialmente aos professores Dr. Yoge Jeronimo Ramos da Costa e Dr. Celso Rosendo Bezerra Filho.

Aos docentes do curso de Doutorado em Engenharia de Processos, pela dedicação e competência.

Aos demais colegas de doutorado, pelo auxílio e apoio, em especial aos amigos Iran Rodrigues, Ivonete Batista, João Carlos e Brauner Coutinho.

Ao amigo e técnico da UFCG Luiz Roberto Rocha de Lucena, pela dedicação e acompanhamento deste trabalho.

E a todos que colaboraram direta ou indiretamente para conclusão deste trabalho.

“Deus nos concede, a cada dia, uma página de vida nova no livro do tempo. Aquilo que colocarmos nela, corre por nossa conta.”

Chico Xavier.

SUMÁRIO

Capítulo 1

INTRODUÇÃO	1
------------------	---

Capítulo 2

REVISÃO DA LITERATURA.....	5
2.1 Combustíveis.....	5
2.1.1 Biodiesel.....	6
2.1.1.2 Matérias primas para produção de biodiesel no Brasil	8
2.1.1.3 Produção do biodiesel	10
2.1.2 Óleo diesel.....	14
2.1.3 Gás Natural.....	16
2.1.3.1 Composição físico-química do gás natural	19
2.2 Combustão.....	21
2.2.1 Aspectos gerais.....	21
2.2.2 Entalpia de formação.....	23
2.2.3 Entalpia de combustão	25
2.2.4 Temperatura adiabática de chama	26
2.3 Motores de combustão interna	26
2.3.1 Informações gerais	26
2.3.2 Motores diesel dual	30

Capítulo 3

MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1 Materiais.....	38
3.1.1 Biodiesel.....	38
3.1.2 Óleo diesel.....	39
3.1.3 Gás natural	40
3.2 Metodologia	41
3.2.1 Experimental	41
3.2.1.1 Análises dos combustíveis diesel e biodiesel.....	41
3.2.3 Modelagem matemática	58

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
4.1 Resultados experimentais.....	73
4.1.1 Análise dos combustíveis B5 e B100.....	73
4.1.2 Análise de consumo e custo específicos dos combustíveis.....	74
4.1.3 Análise do desempenho do motor.....	79
4.1.3.6 Eficiência de combustão	90
4.1.4 Análises da emissão de poluentes	91
4.1.5 Análise do excesso de ar	101
4.2 Resultados teóricos.....	103
4.2.1 Análise energética do motor operando com diesel, biodiesel e gás natural.	103
4.2.2 Análise exergética do motor operando com diesel, biodiesel e gás natural.	114

Capítulo 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	125
5.1 Conclusões	125
5.1.1 Experimentais.....	125
5.1.2 Teóricos.....	126
5.2 Sugestões.....	127
Referências Bibliográficas.....	128
Apêndices	138
Apêndice A1- Resultados dos experimentos das misturas B10, B20 e B30 + Gás Natural... 138	
Apêndice A2- Resultados dos experimentos das misturas B40, B50 e B60 + Gás Natural... 139	
Apêndice A3- Resultados dos experimentos das misturas B70, B80 e B90 + Gás Natural... 140	
Apêndice A4- Resultados dos experimentos da mistura B100+ Gás Natural	141
Apêndice A5- Resultados do experimento com diesel comercial (B5).....	141
Apêndice A6- Resultados do motor operando com B5, B10, B20 e B30+85% de GNV	143
Apêndice A7- Resultados do motor operando com B40, B50 e B60+85% de GNV	144
Apêndice A8- Resultados do motor operando com B80, B90 e B100+85% de GNV	145
Apêndice B1- Dados obtidos do modelo matemático para mistura B10 + gás natural	147
Apêndice B2- Dados obtidos do modelo matemático para mistura B20 + gás natural	151

Apêndice B3- Dados obtidos do modelo matemático para mistura B30 + gás natural	155
Apêndice B4- Dados obtidos do modelo matemático para mistura B40 + gás natural	159
Apêndice B5- Dados obtidos do modelo matemático para mistura B50 + gás natural	163
Apêndice B6- Dados obtidos do modelo matemático para mistura B60 + gás natural	167
Apêndice B7- Dados obtidos do modelo matemático para mistura B70 + gás natural	171
Apêndice B8- Dados obtidos do modelo matemático para mistura B80 + gás natural	175
Apêndice B9- Dados obtidos do modelo matemático para mistura B90 + gás natural	179
Apêndice B10- Dados obtidos do modelo matemático para mistura B100 + gás natural ..	183
Apêndice B11- Dados obtidos do modelo matemático para diesel comercial B5	187
Apêndice C1- Cálculo da massa específica do ar e do gás natural, vazão mássica do ar e do gás natural	191
Apêndice D1- Cálculo do custo específico do combustível	197

RESUMO

SILVA, Fernando José da, *Motor de combustão interna dual operando com diesel, biodiesel e gás natural: análises de desempenho e emissões*, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2014.

O combustível gasoso (gás natural) tem sido muito utilizado em motores diesel nos últimos anos, devido suas características positivas quando o foco é o nível das emissões lançadas na atmosfera. O biodiesel; combustível renovável, tem se apresentado como potencial alternativo para contribuir com a redução das emissões poluentes no mundo, com propriedades comparáveis ao diesel, tem sido usado amplamente em motores do ciclo diesel. O desafio é utilizar o motor diesel que opere de forma dual (líquido/gás), com misturas adequadas de diesel, biodiesel e gás natural, para obter a proporção correta de cada combustível, mantendo as características originais do motor e bom desempenho. Neste sentido, o objetivo desta pesquisa é analisar o desempenho, as características das emissões de um motor diesel, trabalhando com diesel comercial B5, biodiesel e gás natural. O combustível utilizado no motor consiste na mistura de 15% de óleo diesel e biodiesel (combustível líquido) e 85% de gás natural. Experimentos foram realizados em potências de 40, a 120 kW, com intervalos de 20 kw. O motor foi instrumentado para obter temperatura, fluxos de massa de ar, gás, diesel e biodiesel, pressão do ar de entrada do motor, do óleo lubrificante e concentração dos gases de combustão durante cada teste experimental. O custo específico do motor operando no modo dual foi melhor do que no modo diesel e a mistura diesel, biodiesel e gás natural que apresentou o menor custo específico, foi a mistura B50. Verificou-se a partir dos resultados experimentais que as emissões de NO_x, NO e CO₂ diminuíram, enquanto que as emissões de CO aumentaram, quando comparadas com a condição do motor operando no modo diesel comercial B5 como único combustível

Palavras Chave:

Energia, exergia, combustão, motor dual, diesel, biodiesel, gás natural.

ABSTRACT

SILVA, Fernando José da, *Internal combustion engine dual operating with diesel, biodiesel and natural gas: analysis of performance and emissions*, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2014.

The gaseous fuel (Natural Gas) has been widely used on diesel engines in the last few years, due to its positive characteristics as far as the level of emissions released in the atmosphere is concerned. Biodiesel has been considered a potential alternative to contribute to reducing pollutant emissions level in the world, as a renewable fuel, its properties are comparable to the one of the diesel fuel which is already widely used in diesel engines. The big challenge is to use the diesel engine which operates in a dual form, using adequate mixtures of diesel, biodiesel and natural gas to obtain the correct proportion of each fuel and maintaining the original characteristics of the engine as well as a good performance. In this sense, the aim of this research is to study the characteristics of the commercial diesel engine emissions, operating with B40, B50, B60 and natural gas. The fuel used in the engine consists of a mixture of 15% diesel and biodiesel (liquid fuel) and 85% natural gas. Experiments were made using 40, to 120 kW, with an interval of 20 kW. The engine was instrumented to obtain the temperature, air, gas, diesel and biodiesel flow rate, the air pressure at the entrance of the engine, the lubricant oil temperature, and the concentration of exhaust gases during each experimental test. The specific cost of the engine operating in dual mode was better than in diesel mode, and the blend of diesel, biodiesel and natural gas with the lowest specific cost was the B50 blend. It was verified that the emission of NO_x, NO and CO₂ had decreased while the emissions of CO had increased, when compared to the conditions using commercial diesel (B5) as the only fuel.

Keywords:

Energy, exergy, combustion, dual engine, diesel, biodiesel, natural gas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Matérias-primas utilizadas para produção de biodiesel no Brasil.	9
Figura 2.2 - Processo de transesterificação, para produção de biodiesel.	11
Figura 2.3 - Evolução da mistura diesel/biodiesel no Brasil.	13
Figura 2.4 - Produção e importação de gás natural no Brasil.	18
Figura 2.5 - Distribuição percentual das reservas de gás natural por Estado brasileiro.	19
Figura 2.6 - Sistema representando o conceito de entalpia de formação.	24
Figura 2.7 - Conjunto pistão-cilindro de um motor de combustão interna.	28
Figura 2.8 - Diagrama pressão-deslocamento para um motor de combustão interna alternativo.	29
Figura 3.1 - Sistema de Termogeração Elétrica da UFCG.	43
Figura 3.2 - a) balança e b) sistema de leitura.	43
Figura 3.3 - Sistema de aquisição de dados.	44
Figura 3.4 - Interface gráfica do sistema de armazenamento de dados em operação com o sistema de aquisição de dados, o kit gás, a planilha auxiliar e o banco de cargas.	45
Figura 3.5 - Termopares instalados no coletor de escapamento.	46
Figura 3.6 - Sensores de medição de pressão e temperatura do ar na entrada do motor.	47
Figura 3.7 - Transdutor de pressão no corredor de admissão, termopares no corredor de admissão e na linha de óleo combustível.	47
Figura 3.8 - Transdutor para medição da pressão do óleo lubrificante na galeria.	48
Figura 3.9 - Termopar instalado no tubo guia da vareta de óleo do motor, para medição da temperatura do óleo lubrificante no interior do Carter do motor.	49
Figura 3.10 - Termopar instalado para medição da temperatura da água na saída do motor. ..	49
Figura 3.11 - Termopar instalado para medição da temperatura da água na entrada do motor.	50
Figura 3.12 - Sistema de medição da condição atmosférica local.	51
Figura 3.13 - Medidor de vazão de ar.	52
Figura 3.14 - Medidores de vazão e temperatura do GNV.	53
Figura 3.15 - Reboque com os 10 cilindros do sistema de armazenagem de gás.	54

Figura 3.16 - Sistema de redução de pressão do GNV.	55
Figura 3.17 - Controle de mistura ar-gás para o motor (kit gás).	56
Figura 3.18 - Analisador de gases.	56
Figura 3.19 - Sonda do analisador de gases instalada.	57
Figura 3.20 - Esquema do motor analisado.	58
Figura 3.21 - Algoritmo do código computacional desenvolvido.	72
Figura 4.1 - Consumo específico do diesel comercial B5, em função da potência do motor a 1800 rpm.	75
Figura 4.2 - Consumo específico das misturas diesel/biodiesel, em função da potência do motor a 1800 rpm.	76
Figura 4.3 - Consumo específico do gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.	77
Figura 4.4 - Consumo específico da mistura combustível em função da potência do motor a 1800 rpm.	78
Figura 4.5 - Custo específico do combustível em função da potência do motor a 1800 rpm.	79
Figura 4.6 - Taxas de substituição de combustível diesel por gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.	80
Figura 4.7 - Rotação do motor para diesel padrão B5 e misturas de biodiesel e gás natural, em função da potência a 1800 rpm.	81
Figura 4.8 - Vazão mássica de ar para o diesel padrão B5 e misturas de biodiesel e gás natural, em função da potência do motor a 1800 rpm.	82
Figura 4.9 - Vazão mássica de gás natural para as misturas de biodiesel e gás natural, em função da potência do motor a 1800 rpm.	84
Figura 4.10 - Vazão mássica de biodiesel para as misturas de biodiesel e gás natural, em função da potência do motor a 1800 rpm.	85
Figura 4.11 - Vazão mássica de diesel B(5) em função da potência do motor.	86
Figura 4.12 - Temperatura da água na saída do motor, em função da potência do motor.	87
Figura 4.13 - Temperatura do óleo lubrificante, em função da potência do motor a 1800 rpm.	88
Figura 4.14 - Temperatura do ar de admissão do motor, em função da potência do motor a 1800 rpm.	89
Figura 4.15 - Pressão do ar de admissão, em função da potência do motor a 1800rpm.	90

Figura 4.16 - Eficiência de combustão para os combustíveis diesel padrão B5 e misturas de biodiesel e gás natural, em função da potência do motor a 1800 rpm.	91
Figura 4.17 - Emissões de NO _x para os combustíveis diesel padrão B5 e misturas de biodiesel e gás natural, em função da potência motor a 1800 rpm.....	94
Figura 4.18 - Emissões de NO para os combustíveis diesel padrão B5 e misturas de biodiesel e gás natural, em função da potência do motor a 1800 rpm.....	95
Figura 4.19 - Emissões de CO para os combustíveis diesel padrão B5 e misturas de biodiesel e gás natural, em função da potência do motor a 1800 rpm.....	96
Figura 4.20 - Emissões de SO ₂ para combustíveis diesel padrão B5 e misturas de biodiesel e gás natural, em função da potência do motor a 1800 rpm.....	100
Figura 4.21 - Emissões de O ₂ para combustíveis diesel padrão B5 e misturas de biodiesel e gás natural, em função da potência do motor a 1800 rpm.....	101
Figura 4.22 - Excesso de ar para os combustíveis diesel padrão B5 e misturas de biodiesel e gás natural, em função da potência do motor a 1800 rpm.....	102
Figura 4.23 – Eficiência de combustão teórica para os combustíveis diesel padrão B5 e misturas de biodiesel e gás natural, em função da potência do motor a 1800 rpm.	104
Figura 4.24 – Eficiência térmica baseada no PCI, para os combustíveis diesel padrão B5 e misturas de biodiesel e gás natural, em função da potência do motor a 1800 rpm.	105
Figura 4.25 – Temperatura adiabática para os combustíveis diesel padrão B5 e misturas de biodiesel e gás natural, em função da potência do motor a 1800 rpm.	106
Figura 4.26 – Calor transferido para o ambiente para os combustíveis diesel padrão B5 e misturas de biodiesel e gás natural, em função da potência do motor a 1800 rpm.	107
Figura 4.27 –Entalpia dos produtos para os combustíveis diesel padrão B5 e misturas de biodiesel e gás natural, em função da potência do motor a 1800 rpm.	108
Figura 4.28 –Ar em excesso para os combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural, em função da potência do motor a 1800 rpm.....	109
Figura 4.29 – Fração molar do vapor d'água para os combustíveis diesel padrão B5 e misturas de biodiesel e gás natural, em função da potência do motor a 1800 rpm.....	110

Figura 4.30 – Temperatura de orvalho para os combustíveis diesel padrão B5 e misturas de biodiesel e gás natural, em função da potência do motor a 1800 rpm.	111
Figura 4.31 – Eficiência exergética para os combustíveis diesel padrão B5 e misturas de biodiesel e gás natural, em função da potência do motor a 1800 rpm.	115
Figura 4.32 – Exergia total para os combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural, em função da potência do motor a 1800 rpm.....	116
Figura 4.33 – Exergia destruída para os combustíveis diesel padrão B5 e misturas de biodiesel e gás natural, em função da potência do motor a 1800 rpm.....	117
Figura 4.34 – Exergia do calor perdido para o ambiente para os combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural, em função da potência do motor a 1800 rpm.	118
Figura 4.35 – Exergia total dos produtos da combustão para os combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural, em função da potência do motor a 1800 rpm.	119
Figura 4.36 – Exergia química dos produtos da combustão para os combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural, em função da potência do motor a 1800 rpm.	120
Figura 4.37 – Exergia térmica para os combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural, em função da potência do motor a 1800 rpm.....	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Produtividade das diferentes oleaginosas disponíveis no Brasil.	10
Tabela 2.2 - Especificação para biodiesel (B100) ASTM D6751.	12
Tabela 2.3 - Produção nacional de biodiesel puro - B100 (bep).	14
Tabela 2.4 - Especificações do óleo diesel no Brasil.	16
Tabela 2.5 - Composição típica do gás natural no Brasil.	20
Tabela 2.6 - Características do gás natural comercial Brasileiro.	20
Tabela 2.7 - Propriedades do gás natural.	20
Tabela 3.1- Parâmetros físico-químicos do biodiesel de algodão, rota metílica e etílica.	39
Tabela 3.2 - Composição do diesel em base mássica.	39
Tabela 3.3 - Composição do diesel em fração volumétrica.	40
Tabela 3.4 - Composição do gás natural do gasoduto Nordeste.	40
Tabela 3.5 - Propriedades do gás natural do gasoduto Nordeste.	40
Tabela 3.6 - Especificações técnicas do medidor de vazão marca Nykon Dwyler.	52
Tabela 3.7- Especificações técnicas do analisador de gases.	57
Tabela 3.8 - Valores de entalpia de formação dos reagentes e produtos da combustão.	66
Tabela 3.9 - Poder calorífico inferior de alguns componentes a 25°C e 1 atm.	67
Tabela 3.10 - Exergia química padrão dos componentes dos combustíveis e gases de exaustão a $T_0=298\text{ K}$ e $P_0=1\text{ atm}$	68
Tabela 4.1 - Resultado das análises do combustível biodiesel puro B100 de algodão.	73
Tabela 4.2 - Resultado das análises do combustível diesel padrão B5.	74

NOMENCLATURA

A	Área do pistão	[m ²]
AC	Razão ar combustível	[-]
\overline{AC}	Razão ar-combustível na base molar	[-]
Ar	Ar atmosférico	[-]
c _p	Calor específico a pressão constante.....	[J/kgK]
c _v	Calor específico a volume constante.....	[J/kgK]
d	Densidade	[kg/m ³]
$\overline{\Delta h}$	Variação de entalpia.....	[kJ/kmol]
F	Força aplicada no pistão.....	[kgf]
h	Entalpia	[kJ/kmol]
HC	Hidrocarbonetos	[-]
H _P	Entalpia de produtos	[kJ/kmol]
H _R	Entalpia de reagentes	[kJ/kmol]
\overline{h}_f°	Entalpia de formação	[kJ/kmol]
$\overline{h}_{T,P}$	Entalpia de para condições de temperatura e pressão	[kJ/kmol]
M	Peso molecular	[kg/kmol]
\dot{m}_{ar}	Vazão de ar que entra no motor	[kg/h]
\dot{m}	Fluxo de massa no motor.	[kg/h]
m _{ar}	Massa de ar que entra no motor	[kg]
\dot{m}_f	Vazão de combustível	[kg/h]
m _f	Massa de combustível por ciclo	[kg]
n	Número de moles	[kmol]
N	Número de rotações por minuto.....	[rpm]
ρ_{ar}	Densidade do ar.....	[kg/m ³]
\overline{NC}	Número de cetano	[-]
P	Pressão	[Pa]
P _{ref}	Pressão de referência.....	[Pa]
PCI	Poder calorífico inferior	[kCal/kg]

P_{me}	Pressão média efetiva.....	[Pa]
P_p	Pressão que os gases deixam o motor	[Pa]
P_{vs}	Pressão de vapor saturado	[Pa]
\dot{Q}	Fluxo de calor	[W]
r	Razão de compressão	[-]
s	Entropia.....	[kJ/kmol]
t_a	Temperatura do ar de admissão	[C]
t_d	Temperatura do combustível diesel	[C]
t_g	Temperatura do gás natural.....	[C]
t_p	Temperatura de produtos	[C]
$t_{orvalho}$	Temperatura de orvalho	[C]
T_{ref}	Temperatura de referência	[C]
u	Energia interna	[J/kg]
V	Volume.....	[m ³]
v	Volume específico.....	[m ³ /kg]
W	Trabalho	[kW]
\dot{W}	Potência.....	[kW]
X_{Air}	Excesso de ar.....	[%]
\dot{X}	Exergia	[kW]
y	Fração molar	[%]
η	Eficiência	[%]
η_c	Eficiência da combustão	[%]
η_f	Eficiência do ciclo.....	[%]
η_t	Eficiência térmica	[%]
η_v	Rendimento volumétrico.....	[%]

Sobrescritos

qui	Química
term	Térmica
res	Resultante

Subscritos

ar	Ar
c	Combustível
min	Mínimo ou teórico
p	Produtos
r	Reagentes
rel	Relativa
vp	Vapor de água
comb	Combustão

Símbolos e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional do Petróleo e Gás Natural
BEN	Balanco Energético Nacional
bep	barris equivalente de petróleo
bep	barris equivalente de petróleo
EPA	Agencia de proteção ao meio ambiente – Estados Unidos
C ₂ H ₅ OH	Etanol
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
C _x H _y	Hidrocarboneto genérico (metano)
DEE	Departamento de engenharia elétrica
EGR	Recirculação dos gases de escape
DNC	Departamento Nacional de Combustíveis
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GNL	Gás natural liquefeito
GNV	Gás Natural Veicular
H ₂	Hidrogênio
H ₂ S	Ácido sulfídrico

HP	Horsepower
IEA	Agência Internacional de Energia
IQA	Índice de qualidade do ar
MCT	Ministério de Ciência e Tecnologia
MME	Ministério das Minas e Energia
MP	Material particulado
NBB	Conselho Nacional de Biodiesel (EUA)
N ₂	Nitrogênio
NO	Monóxido de nitrogênio
NO ₂	Dióxido de nitrogênio
NO _x	Óxidos de nitrogênio
\overline{NC}	Número de cetano
\overline{NO}	Número de octano
O ₂	Oxigênio
O ₃	Ozônio
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
pme	pressão média efetiva
PMI	Ponto morto inferior
PMS	Ponto morto superior
PNPB	Programa Nacional de Produção e uso de Biodiesel
PBGÁS	Companhia paraibana de gás
SO ₂	Dióxido de enxofre
UAM	Unidade acadêmica de engenharia mecânica
DEM	Departamento de engenharia mecânica
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
UTE	Unidades Térmicas de Eletricidade
V.C.	Volume de controle
w	Umidade absoluta

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Desde a primeira crise mundial do petróleo, os países buscam combustíveis alternativos para viabilizarem suas matrizes energéticas. Em outubro de 1973, com o primeiro choque do petróleo, o mundo se viu ante o risco de desabastecimento energético. Reacendeu-se, nesse período, o interesse mundial por fontes alternativas de energia, o que levou vários países a buscarem soluções mais adequadas às suas necessidades. Em relação ao Brasil, as preocupações dos gestores fizeram com que a inclusão de fontes de energias renováveis e limpas na matriz energética ganhasse força nas últimas três décadas, principalmente após o apagão sofrido pelo país em 2001. No processo para diversificar as fontes e produzir energia de maneira mais limpa e sustentável do ponto de vista dos recursos disponíveis, o Brasil leva vantagem, pois grande parte da produção de energia do país já provém de fontes renováveis, principalmente geração hidrelétrica, em níveis muito acima da média mundial.

As usinas de geração hidroelétrica dependem da quantidade de água em seus reservatórios, que por sua vez, depende de uma conjunção de fatores meteorológicos e geográficos. Quando há irregularidade na precipitação pluviométrica, os níveis baixam e conseqüentemente a capacidade geradora de uma usina hidrelétrica fica comprometida. Para

compensar estes períodos sazonais, faz-se opção pela utilização das termelétricas, que independem das condições climáticas.

Para minimizar a dependência do petróleo e da geração de energia elétrica via hidrelétrica, o Brasil descobriu no álcool sua primeira opção energética atraente e, em 1975, criou o programa nacional do álcool (PROÁLCOOL), uma fonte de energia limpa e renovável. O objetivo do Proálcool era principalmente diminuir a dependência externa de energia – uma questão estratégica de segurança nacional, mas também propiciar uma melhora na balança de pagamentos, reduzir disparidades regionais de renda, expandir a produção de bens de capital e gerar empregos. O gás natural é outra fonte de energia limpa que foi incentivada pelo governo brasileiro e atualmente é utilizado nas indústrias, comércio, residências, veículos e na geração de energia elétrica. O programa brasileiro de expansão da capacidade de geração de energia elétrica está fortemente apoiado na instalação de UTE (Usinas Térmicas de Eletricidade) movidas a Gás Natural. Mais recentemente, o Gás Natural tem sido muito utilizado em projetos de co-geração que proporcionam alta eficiência energética na produção de eletricidade, calor e frio (Aneel, 2010).

O gás natural é um combustível mais limpo e mais puro que o diesel e outros que se encontra em uso. Quando submetido a processos de combustão gera produtos menos poluente.

Segundo o Ministério das Minas e Energia (MME), as reservas de gás natural provadas no Brasil, no ano de 2013, foram estimadas em aproximadamente 459,403 bilhões de metros cúbicos de gás. De acordo com o BEN - Balanço Energético Nacional (2012), nos últimos dois anos foram descobertas reservas adicionais de gás no litoral do Sudeste Brasileiro, incrementando de forma significativa as reservas desse energético no país.

Devido à disponibilidade do gás natural, algumas características próprias deste combustível e preços atrativos, este tem sido empregado de forma satisfatória tanto em motores do ciclo Otto, onde a substituição do combustível líquido pelo gasoso é total (100%), como em motores do ciclo Diesel, onde se utilizam dois combustíveis simultaneamente. Mesmo considerando as novas tecnologias de sistema de injeção eletrônica de combustível, o uso do gás natural em motores do ciclo Diesel está limitado a sistemas de baixa potência, com predominância para motores alternativos. Além disso, devido à complexidade do tema, novos

estudos têm sido conduzidos no intuito de melhorar o desempenho do motor quando operando de forma dual, com diesel e gás natural, experimento este, já realizado por vários pesquisadores (Costa, et al., 2012; Abdelghaffar, 2011; Papagiannakis et al., 2010; Sahoo et al., 2009; Cordiner et al., 2008; Papagiannakis et al., 2008; Costa, et al., 2007; Papagiannakis et al., 2007; Costa, 2007; Papagiannakis et al., 2005; Papagiannakis e Hountalas, 2004; Uma et al., 2004).

Contudo, se por um lado há escassez de energia elétrica gerada a partir de fontes hídricas e do sério problema da poluição ambiental, por outro, lado existe a disponibilidade de gás para produção de energia mecânica/elétrica, e este ser um combustível menos poluente que o diesel. Então, se justifica estudar e aperfeiçoar formas e técnicas apropriadas para produção de energia, elétrica e mecânica, a partir do gás natural misturado com outros combustíveis, como por exemplo, o biodiesel, tendo em vista que estudos já foram realizados com diesel e gás natural nos quais se obteve excelentes resultados.

O biodiesel, combustível renovável, tem se apresentado como potencial alternativo para contribuir com a redução das emissões poluentes no mundo, com propriedades comparáveis ao diesel, usado amplamente em motores do ciclo diesel. O desafio é utilizar o motor diesel que opere de forma dual (líquido/gás), com misturas adequadas de diesel, biodiesel e gás natural, para obter a proporção correta de cada combustível, mantendo as características originais do motor e bom desempenho.

Neste contexto, este trabalho visa avaliar a viabilidade do uso de motores do ciclo diesel (desempenho e emissões) operando de forma dual, com gás natural e uma mistura de biodiesel e diesel, para produção de energia mecânica/elétrica. Como objetivos específicos pode-se citar:

- a) Estudar o desempenho de um motor de combustão interna do ciclo Diesel, quando submetido a variações de carga e diferentes percentagens de biodiesel na mistura;
- b) Avaliar a emissão de poluentes em função da mistura de biodiesel e gás natural;

- c) Desenvolver um modelo matemático baseando-se na termodinâmica clássica e código computacional para avaliar energeticamente e exergeticamente o sistema operando com diesel, biodiesel e gás natural em diferentes condições de carga e percentagem de combustíveis.
- d) Comparar os resultados teóricos do modelo proposto com os resultados experimentais obtidos visando à otimização do modelo e do processo de combustão.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Combustíveis

Define-se energia como a capacidade de produzir trabalho. Pode ser encontrada em diferentes formas, tais como elétrica, radiante, sônica, movimento, térmica, mecânica, química, nuclear e gravitacional. A energia pode ser armazenada e/ou convertida, dependendo da aplicação (Dermirbas, 2008).

As fontes de energia podem ser: fóssil (petróleo, carvão, betume, gás natural, óleo de xisto, areias de alcatrão, etc.), renovável ou alternativa (biomassa, hídrica, eólica, solar, geotérmica, hidrogênio, marinha, etc.) e dissociável (tório, urânio, etc.). O combustível pode ser obtido de diferentes fontes. Por exemplo, óleo diesel e gasolina são derivados de petróleo e o biocombustível (etanol, metanol, biodiesel, hidrogênio, metano, etc.) é produzido a partir da biomassa. O biodiesel (óleo vegetal) pode ser produzido a partir de diferentes produtos agrícolas, como soja, palma, coco, sementes de girassol e de canola, grãos de amendoim e de algodão.

Globalmente, em vista de diferentes fatores, tais como esgotamento rápido das fontes de combustíveis, consumo crescente de combustíveis fósseis, incertezas com a

disponibilidade futura desse combustível no mundo, redução de custos da energia e aumento das emissões de poluentes (CO₂, HC, NO_x, SO_x, etc.) que afetam os sistemas respiratório e nervoso das pessoas, produzindo doenças de pele e mudanças climáticas (efeito estufa, aquecimento da Terra), muitas pesquisas têm sido direcionadas para investigações de uso de diferentes fontes de energia como alternativa aos combustíveis derivados do petróleo (Atabani et al., 2012; Panwar et al., 2011; Sidibé et al., 2010; Escobar et al., 2009; Murugesan et al., 2009; Sahoo et al., 2009; Shahid and Jamal, 2008).

O combustível diesel tem sido utilizado há décadas em motores para geração de energia mecânica e/ou elétrica. Nos cenários de considerações políticas, redução de custo de energia e redução das emissões poluentes, tanto o gás natural como o biodiesel aparecem como os melhores combustíveis alternativos a serem utilizados em motores do ciclo diesel, porque o combustível diesel pode ser substituído parcial ou totalmente por eles.

2.1.1 Biodiesel

2.1.1.1 Características gerais

Sob o ponto de vista químico, o biodiesel (*bio*, que significa vida, do grego, mais *diesel* de Rodolfo Diesel) é um combustível sustentável (energia alternativa renovável), obtido a partir de fontes biológicas. É derivado de uma mistura de ésteres mono alquílicos de ácidos graxos, de cadeia longa, a partir de óleos de plantas oleaginosas (óleos vegetais, comestíveis ou não comestíveis) ou gorduras animais (Knothe, 2010; Demirbas, 2008; Zheng et al., 2008; Knothe et al., 2005; Mittelbach, 2004). Uma característica essencial de um combustível biodiesel é que o perfil de ácidos graxos corresponde a óleo ou gordura. Todos os óleos vegetais e de gorduras animais consistem, principalmente, de triglicéridos (também conhecidos como triacilgliceróis). Triglicéridos têm três carbonos na cadeia principal, com cadeias longas de hidrocarbonetos ligados a cada um dos carbonos. Assim, os combustíveis derivados de biodiesel a partir de matérias-primas distintas podem ter composições e propriedades significativamente diferentes (Benjumea et al., 2011; Escobar et al., 2009). O biodiesel é produzido através de uma reação química chamada transesterificação, que quebra as moléculas de óleo (com ou sem catalisador) e transforma o óleo novo ou usado em biodiesel mais glicerina (Demirbas, 2008).

O Biodiesel tem sido utilizado em muitos lugares, como Estados Unidos, Malásia, Indonésia, Brasil, Alemanha, França, Itália e outros países europeus. Globalmente, existem mais de 350 oleaginosas identificadas como fontes potenciais para produção de biodiesel. Atualmente, mais de 95% do biodiesel produzido no mundo é proveniente de óleos alimentares, tais como semente de canola ou colza, óleo de girassol, óleo de palma, óleo de soja e outros.

Globalmente, há muitos esforços para desenvolver e melhorar as propriedades dos óleos vegetais, a fim de aproximar as propriedades desse combustível para serem usadas em motores diesel de forma eficiente. Tem sido observado que a alta viscosidade, a baixa volatilidade e caracteres polinsaturados são os problemas associados principalmente aos óleos vegetais brutos (Atabani et al., 2012).

O biodiesel não se apresenta como um único, mas sim um conjunto de compostos. O range de fórmulas químicas de ésteres metílicos é: C_{14} a $C_{25}H_{28}$ a $H_{48}O_2$. Ou seja, o carbono apresenta-se no range de 14 a 25, enquanto o hidrogênio, de 28 a 48. Uma fórmula típica molecular do biodiesel é $C_{18,74}H_{34,43}O_2$ (Canakci e Hosoz, 2006).

Para a identificação de biodiesel, utiliza-se a nomenclatura internacional Bxx, onde xx representa a concentração volumétrica de biodiesel na mistura diesel/biodiesel. Então, B100 corresponde a biodiesel puro e B20 corresponde à mistura com 20% de biodiesel e 80% de diesel puro (sem biodiesel). No Brasil, B5 corresponde ao diesel comercial (Escobar et al., 2009; Demirbas, 2008).

No Brasil, para se tornar regulamentado como um combustível compatível para uso em motores do ciclo diesel, o biodiesel deve atender à especificação brasileira estabelecida pela Resolução ANP nº 7/2008, de 19 de março de 2008.

A legislação brasileira (Lei nº 11.0097, de 13 de janeiro de 2005) define o biodiesel como sendo “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 combustível de origem fóssil”. Essa definição, a princípio, permite que o biodiesel seja produzido de qualquer tipo de

oleaginosa, com características que possam substituir o diesel parcial ou totalmente, desde que atendam aos requisitos normativos.

O biodiesel foi definido pela National Biodiesel Board (EUA) como o derivado monoalquil éster de ácidos graxos de cadeia longa, proveniente de fontes renováveis como óleos vegetais, cuja utilização está associada à substituição de combustíveis fósseis em motores de ignição por compressão (motores de ciclo diesel). Enquanto produto, pode-se dizer que o biodiesel tem as seguintes características: (a) é virtualmente livre de enxofre e aromáticos; (b) tem número de cetano equivalente ao diesel; (c) possui teor médio de oxigênio em torno de 11%; (d) possui maior viscosidade e maior ponto de Fulgor que o diesel convencional; (e) tem preço de mercado relativamente equivalente ao diesel comercial; (f) no caso do biodiesel de óleo de fritura, caracteriza-se por uma grande contribuição ambiental com redução nas emissões de CO, particulados e SOx. Entretanto, se o processo de recuperação e aproveitamento dos subprodutos (glicerina e catalisador) for otimizado, o biodiesel pode ser obtido a um custo seguramente competitivo com o preço do óleo diesel, ou seja, aquele verificado nas bombas de postos de abastecimento.

O biodiesel encontra-se registrado na Environment Protection Agency – EPA (EUA) como combustível e aditivo para combustíveis. Pode ser usado puro, a 100% (B100); em mistura com o diesel de petróleo (B20) ou numa proporção baixa, como aditivo de 1 a 5%. Sua utilização está associada à substituição de combustíveis fósseis em motores do ciclo diesel, sem modificação no motor.

2.1.1.2 Matérias-primas para produção de biodiesel no Brasil

O biodiesel pode ser produzido a partir de diferentes matérias-primas: gordura, sebo e óleos vegetais derivados de diferentes oleaginosas.

O biodiesel produzido e comercializado no Brasil é originário das mais diversas oleaginosas, dependendo das condições do mercado, da disponibilidade de matéria-prima e da região. Cada oleaginosa tem um método de cultivo e produtividade diferente. Atualmente, a maior parte do biodiesel produzido no Brasil é de origem vegetal, com predominância da soja. O Anuário Biodiesel 2011 dispõe informações em que o percentual do biodiesel brasileiro derivado da soja varia, mês a mês, entre 70% e 85% do total da produção nacional. Para

minimizar a dependência da soja, o governo brasileiro tem incentivado a plantação de outros vegetais promissores, tais como: canola, pinhão-manso, macaúba e babaçu (Anuário do Biodiesel 2011).

O Brasil tem possibilidade de produzir diferentes oleaginosas, graças à sua extensão, variada condição climatológica e flexibilidade da indústria agrícola. As principais matérias-primas para produção de biodiesel no Brasil são: óleo de soja, algodão, dendê, mamona, girassol, óleo de fritura usado, de gordura bovina, de gordura de porco e de gordura de frango (Anuário do Biodiesel, 2011).

O relatório da ANP de abril de 2013 apresenta o perfil nacional das matérias-primas utilizadas para produção de biodiesel, Figura 2.1.

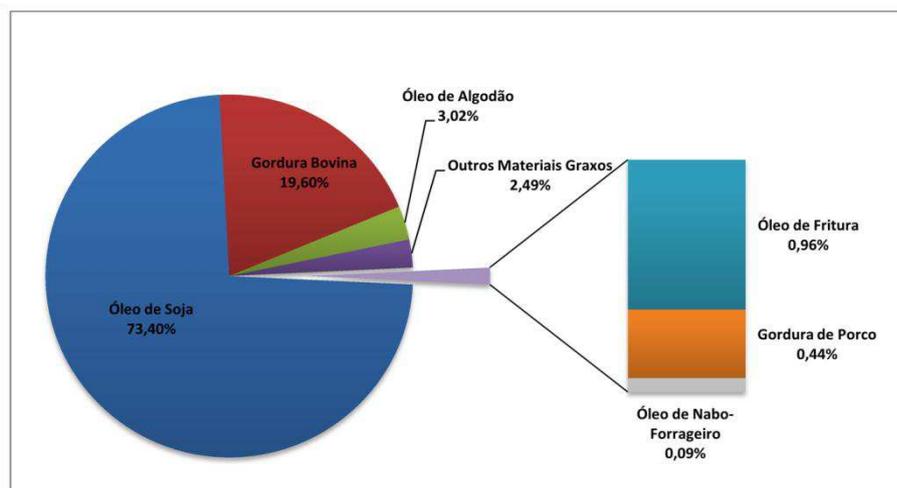


Figura 2.1 - Matérias-primas utilizadas para produção de biodiesel no Brasil.

Fonte: ANP (2013)

Segundo Nogueira (2010), o rendimento médio das lavouras para produção de biodiesel depende basicamente do tipo da oleaginosa plantada, clima e manejo agrícola; conseqüentemente, diferentes produções de óleo para cada oleaginosa são obtidas, conforme ilustrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Produtividade das diferentes oleaginosas disponíveis no Brasil.

Oleaginosa	Teor/percentual de óleo (%)	Rendimento agrícola (ton./ha)	Rendimento de óleo (litros/ha)
Girassol	39 – 48	1,5 – 2,0	2.100 – 2.510
Mamona	42 – 45	0,6 – 2,5	270 – 450
Amendoim	39 – 48	1,4 – 2,5	950 – 1.680
Dendê	18 – 26	10 – 22	3.000 – 5.900
Soja	17 – 20	1,5 – 3,0	700 – 1.000
Canola	37 – 46	1,7 – 2,0	690 – 1.100
Algodão	16 – 18	1,7 – 3,0	490 – 700
Pinhão-mansô	24 – 26	1,0 – 5,0	350 – 520

Fonte: Nogueira (2011)

2.1.1.3 Produção do biodiesel

Existem vários métodos para produzir biodiesel, porém o mais comum e mais utilizado é a transesterificação, principalmente a do tipo alcalino-catalisada (Leung et al., 2009).

Basha et al. (2009) afirmam que pesquisadores e cientistas desenvolveram diferentes métodos para a produção de biodiesel a partir de diferentes oleaginosas, mas vários deles relataram que a produção era maior quando, no processo, era utilizado um catalisador.

O processo de transesterificação é utilizado para transformar triglicerídeos em ésteres, ou seja, em biodiesel. No processo de transesterificação, os triglicerídeos presentes em diferentes tipos de óleos e gorduras animais reagem com álcool, geralmente metanol ou etanol, para produzir ésteres e glicerina. Para que a reação aconteça, é necessário utilizar um catalisador (Knothe, 2010; Dermibras, 2003).

A produção de biodiesel pelo processo de transesterificação acontece quando uma grande molécula de triglicerídeo reage com uma molécula de álcool (etanol ou metanol), gerando a separação de um dos ácidos graxos do triglicerídeo, produzindo um diglicerídeo e um éster. Este diglicerídeo, por sua vez, reage com uma segunda molécula de álcool, que retira outro ácido graxo, gerando um éster e um monoglicerídeo; e, finalmente, uma terceira molécula de álcool reage com o monoglicerídeo, retirando o ácido graxo, formando o terceiro éster e uma molécula de glicerina (Tulcan, 2009). Conforme representado na Figura 2.2, o processo de transesterificação.

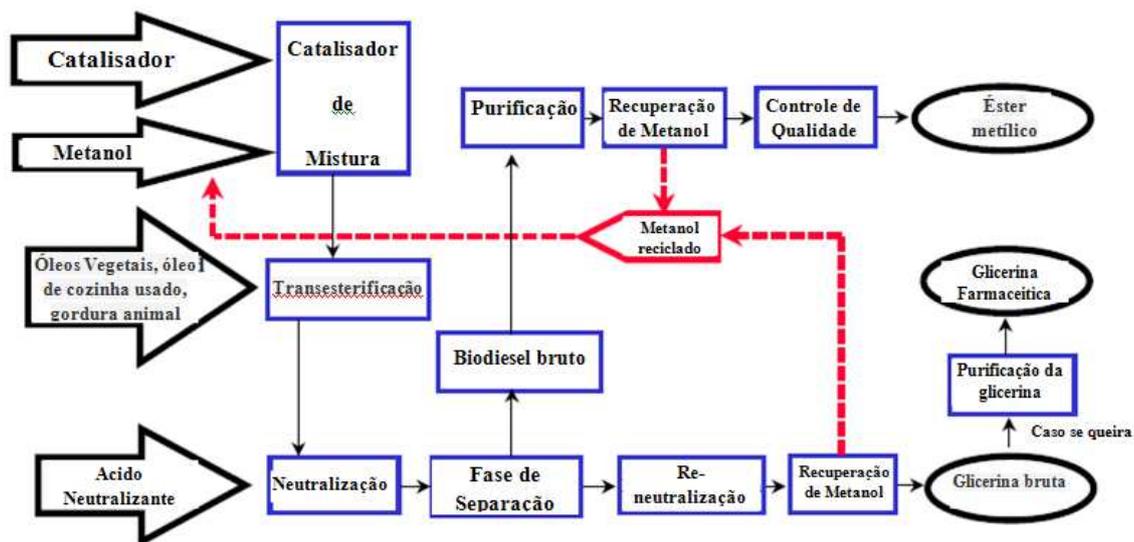


Figura 2.2 - Processo de transesterificação, para produção de biodiesel.

Fonte: ASTM (2007)

A especificação do Biodiesel B(100) foi definida pela ASTM, conforme está representado na Tabela 2.2.

Atualmente, existem 69 plantas produtoras de biodiesel autorizadas pela ANP em operação no País, correspondendo a uma capacidade total autorizada de 17.415,95 m³/dia (ANP 2011). A evolução da produção de biodiesel no Brasil tem acontecido de acordo com as solicitações e liberações da ANP. Segundo o órgão, encontram-se autorizadas para construção 29 fábricas de biodiesel. Além disso, 111 fábricas estão autorizadas a produzir biodiesel e 75 estão autorizadas a comercializá-lo.

Tabela 2.2 - Especificação para biodiesel (B100) ASTM D6751.

Propriedade	Método ASTM	Limites	Unidades
Cálcio e magnésio, Combinado	EN 14538	5 máximo	ppm (ug/g)
Ponto de Fulgor (vaso fechado)	D 93	93 mínimo	Graus °C
Controle de Álcool (Um dos seguintes deve ser atendido)			
Conteúdo de metanol	EN14110	0,2 máximo	% volume
Ponto de fulgor	D 93	130 mínimo	Graus °C
Água e sedimentos	D 2709	0,05 máximo	% volume
Viscosidade cinemática, 40 °C	D 445	1,9 – 6,0	mm ² /segundo
Cinzas sulfatadas	D 874	0,02 máximo	% massa
Enxofre			
Enxofre, Categoria 15	D 5453	0,0015 máx.(15)	% massa (ppm)
Enxofre, Categoria 500	D 5453	0,05 máx. (500)	% massa (ppm)
Faixa de corrosão de cobre	D 130	No. 3 máximo	-
Índice de cetano	D 613	47 mínimo	-
Ponto de névoa	D 2500	Informar	Graus C
Amostra de carbono de resíduo 100%	D 4530*	0,05 máximo	% massa
Número de ácido	D 664	0,50 máximo	mg KOH/g
Glicerina livre	D 6584	0,020 máximo	% massa
Glicerina total	D 6584	0.240 máximo	% massa
Conteúdo de fósforo	D 4951	0.001 máximo	% massa
Destilação, T90 AET	D 1160	360 máximo.	Graus C
Sódio/Potássio, combinado	EN 14538	5 máximo	ppm
Estabilidade à oxidação	EN 14112	3 minutos	Horas

* O resíduo de carbono deve ser executado em 100% da amostra. **Fonte:** ASTM (2007)

No Brasil, o Programa Nacional de Produção e uso do Biodiesel (PNPB) foi introduzido na matriz energética brasileira pela Lei nº 11.097, de 13 de Janeiro de 2005. A partir desta data, o governo definiu, inicialmente, as seguintes metas para o programa: entre 2005 e 2007, foi autorizado o uso de 2% (B2) de mistura de biodiesel no óleo diesel oriundo do petróleo e, desde janeiro de 2008, o biodiesel puro (B100) passou, obrigatoriamente, a ser adicionado ao diesel. Entre janeiro e junho de 2008, a mistura de biodiesel puro (B100) foi de 2% em volume, denominando-se B2. No período de julho de 2008 a junho de 2009, a mistura foi de 3% (B3) e, entre julho e dezembro de 2009, essa percentagem foi de 4% (B4). A partir de 01/01/2010, o biodiesel passou a ser adicionado ao óleo diesel na proporção de 5% em volume (B5), antecipando a meta original do programa nacional do biodiesel (PNPB) para o ano de 2013, conforme ilustrado na Figura 2.3.

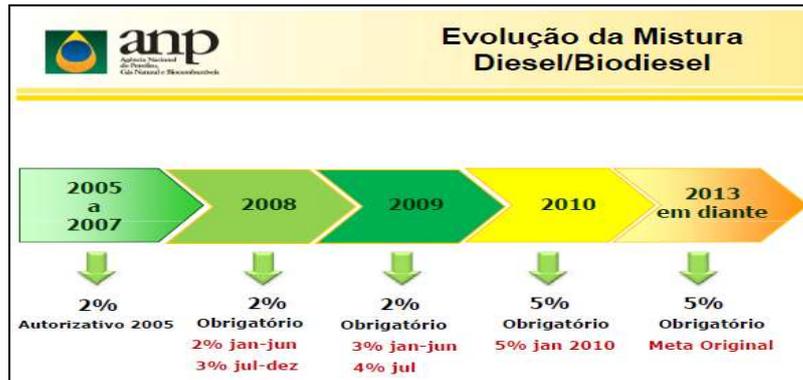


Figura 2.3 - Evolução da mistura diesel/biodiesel no Brasil.
Fonte: ANP (2010)

O setor produtivo de biodiesel brasileiro continua em processo de crescimento. No cenário energético global, o Brasil aparece como o terceiro maior produtor mundial de biodiesel, atrás apenas de França e Alemanha (Anuário Análise Energia, 2011). A Agência Internacional de Energia (IEA) estima que a produção mundial de biodiesel duplicou em 2010 e o Brasil foi responsável por 22,5%. Especificamente no biodiesel, a Europa ainda é líder absoluta e representa aproximadamente 90% do consumo e produção do produto no mundo.

A produção nacional do biodiesel no período de 2005 a 2012 é fornecida pela ANP e disponibiliza todas as informações atualizadas mensalmente em barril equivalente de petróleo (bep) (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 - Produção nacional de biodiesel puro - B100 (bep).

Mês	Ano							
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Janeiro	-	6.822	108.538	487.121	573.196	935.326	1.182.061	1.224.432
Fevereiro	-	6.618	107.421	489.027	508.943	1.129.546	1.121.513	1.361.467
Março	49	10.942	143.608	403.984	837.354	1.358.567	1.481.100	1.401.211
Abril	83	11.327	119.095	408.235	669.025	1.172.985	1.271.218	1.086.511
Maio	163	16.352	164.974	482.137	657.636	1.286.110	1.398.750	1.246.713
Junho	145	41.175	172.290	651.952	895.385	1.300.138	1.469.097	1.271.582
Julho	46	21.131	169.501	683.796	980.507	1.315.959	1.585.347	1.364.383
Agosto	362	32.365	278.875	694.887	1.059.994	1.466.476	1.572.895	1.614.079
Setembro	13	42.729	291.909	839.047	1.018.453	1.395.601	1.484.315	1.600.227
Outubro	215	54.441	340.093	804.529	994.806	1.268.133	1.509.143	1.594.984
Novembro	1.785	101.662	357.805	748.684	1.054.323	1.318.712	1.504.726	1.556.314
Dezembro	1.809	92.185	310.956	710.864	954.375	1.191.759	1.375.824	1.554.037
Total	44.670	437.749	2.565.064	7.404.263	10.203.997	15.139.312	16.955.989	17239.715

Fonte: ANP (2013)

2.1.2 Óleo diesel

O óleo diesel é um combustível fóssil derivado do petróleo. Seu composto químico é formado principalmente por hidrocarbonetos (átomos de hidrogênio e carbono). Além do carbono e do hidrogênio, possui, também, outros componentes, como o nitrogênio e o enxofre. Apresenta-se em forma de líquido amarelado viscoso, límpido, pouco volátil, de cheiro forte e marcante e com nível de toxidade mediano.

O óleo diesel é produzido a partir do refino do petróleo através do processo de destilação, podendo fazer parte da mistura que o compõe os seguintes elementos: nafta pesada, querosene, diesel leve e diesel pesado.

Como combustível, o diesel contém uma grande variedade de hidrocarbonetos individuais, com pontos de ebulição que variam de 180°C a 370°C. A faixa de ebulição afeta vários parâmetros importantes para a determinação das características operacionais do combustível (Martins, 2011).

A viscosidade é outro elemento importante para definir as características do óleo diesel. Essa propriedade termofísica é definida como uma medida da resistência oferecida pelo fluido ao escoamento. Seu controle visa permitir uma boa atomização do óleo e preservar sua característica lubrificante. A viscosidade cinemática é a relação entre a viscosidade absoluta e a massa específica, também definida como tempo de escoamento de um fluido através de um tubo capilar, com dimensões padronizadas sob ação da força da gravidade. A viscosidade especificada para o óleo diesel é a cinemática e tem como unidade centistokes ($\text{cSt}=\text{cm}^2/\text{s}$ no sistema CGS) (Brunetti, 2012).

Teor de cinzas, corrosividade ao cobre e índice de cetano são alguns dos elementos que constam nas especificações definidas pela ANP, conforme representado na Tabela 2.4. Entre os elementos citados, o índice de cetano tem significativa importância no bom funcionamento do motor a diesel. Esse índice representa a facilidade do combustível em autoinflamar-se, influencia para melhorar a partida a frio, reduz significativamente o ruído do motor e facilita a autoignição sob diferentes condições de temperatura e pressão. Normalmente, as especificações do índice de cetano no mundo variam entre 40 e 55. Valores acima desse limite fazem com que o atraso de ignição seja reduzido, mas não terão influência significativa na eficiência global do motor (Brunetti, 2012; Martins, 2011).

No Brasil, devido ao uso elevado de óleo diesel no sistema de transporte, esse combustível é produzido de modo a atender aos diversos requisitos de sua utilização em motores e tem algumas características controladas para o desempenho adequado dos veículos, com emissões de acordo com as normas estabelecidas pela ANP. Segundo o MME (2008), o consumo de óleo diesel no Brasil pode ser dividido em três setores: o de transportes, representando 79% do total consumido; o agropecuário, com 14%, e o de transformação, que utiliza o produto na geração de energia elétrica e corresponde a 4% do consumo de diesel.

O resultado da combustão do óleo diesel libera para a atmosfera uma grande quantidade de gases poluentes responsáveis pelo efeito estufa. Entre esses gases, que também prejudicam a saúde humana, pode-se citar o monóxido de carbono, o óxido de nitrogênio e o enxofre.

Tabela 2.4 - Especificações do óleo diesel no Brasil.

Características	Valores Especificados			
	S10	S50	S500	S1800
Água e sedimentação, % vol. máx.	0,05	0,05	0,05	0,05
Cinzas, % massa, máx.	0,10	0,10	0,10	0,10
Cor ASTM, máx.	3	3,0	3,0	3,0
Corrosividade ao cobre (3h a 50 °C)máx.	1	1	1	1
Destilação, 50% recuperados, °C mín./máx. 85% evaporados, °C máx.	245/295	245/310	245/310 360	245/310 370
Enxofre, % massa máx.	10	50	500	1800
Índice de cetanos calculado, min.	48	46	42	42
Teor de biodiesel, % volume	5	5	5	5
Massa específica a 20°C, kg/m ³	820 a 850	820 a 850	820 a 865	820 a 880
Resíduo de carbono Ramsbottom, Determinado nos 10% finais da destilação, % massa máx.	0,25	0,25	0,25	0,25
Viscosidade a 40 °C, mm ² /s	2,5 a 4,5	2,0 a 5,0	2,0 a 5,0	2,0 a 5,0

Fonte: adaptado da ANP (2013) resolução anp nº 65, de 9.12.2011.

2.1.3 Gás natural

O gás natural é incolor e inodoro em sua forma pura. No entanto, é combustível e, quando queimado, libera uma grande quantidade de energia. Mas, ao contrário de outros combustíveis fósseis, o gás natural emite baixos níveis de poluentes no ar.

Do ponto de vista químico, o gás natural é constituído por uma mistura de gases inorgânicos e hidrocarbonetos saturados que ocorre no estado gasoso, à temperatura e pressão ambiente. A composição do gás natural depende dos fatores envolvidos nos campos de gás, processo de produção, coleta, acondicionamento e transporte. O metano é o principal componente, mas também pode conter outros hidrocarbonetos, tais como etano, propano, butano, pentano, hexano, heptano e octano, bem como traços de impurezas gasosas e não combustíveis (Pedersen e Christensen, 2007; Speight, 2002). A comparação típica de gás natural no Brasil é dada por: metano (CH₄) 70-90%; etano (C₂H₆); propano C₃H₈; butano (C₄H₁₀) 0-20%; dióxido de carbono (CO₂) 0-8%; Oxigênio (O₂) 0-0,2%; nitrogênio (N₂) 0-5%; ácido sulfídrico (H₂S) 0-5% e traços de gases raros (Ar, He, Ne, Xe). Algumas vezes, surgem traços de metano pesados, água, ácido clorídrico e metanol.

O gás natural é a mistura de hidrocarboneto que existe na fase gasosa ou em solução no óleo, nas condições de reservatório, e que permanece no estado nas condições atmosféricas de pressão e temperatura. Resultante da decomposição da matéria orgânica durante milhões de anos, é encontrado no subsolo, em rochas porosas isoladas do meio ambiente por uma camada impermeável. Em suas primeiras etapas de decomposição, essa matéria orgânica de origem animal produz o petróleo e, em seus últimos estágios de degradação, o gás natural. Por isso, é comum a descoberta do gás natural tanto associado ao petróleo, quanto em campos isolados (gás natural não associado) (Vaz et al., 2008).

A exploração do gás natural no Brasil começou timidamente nos anos 1940, com descobertas de gás associado a petróleo na Bahia. Inicialmente, a produção atendeu apenas às indústrias do Recôncavo Baiano. Após alguns anos, a exploração e a produção estenderam-se também às bacias de Sergipe e Alagoas. O grande salto das reservas ocorreu nos anos 1980, com a descoberta na Bacia de Campos. Finalmente, o início de operação do gasoduto Bolívia/Brasil, em 1999, com capacidade para transportar 30 milhões de m³ por dia, aumentou significativamente a oferta do gás natural no País. Com um total de 2.593 quilômetros de extensão, o gasoduto parte da Bolívia e chega a Porto Alegre (RS), passando por cinco Estados brasileiros (Mato Grosso do Sul, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul) (ANP, 2010).

A participação do gás natural na matriz energética brasileira aumentou significativamente a partir da criação da Lei nº 9.478, de 06 de agosto de 1997 (Lei do Petróleo). A demanda também aumentou, principalmente após o aumento do volume das reservas de gás de origem nacional (Bacia de campos, Santos e Urucu) e da ampliação da rede de gasodutos (Vaz et al., 2008).

De acordo com o boletim mensal de acompanhamento da indústria de gás natural do Ministério de Minas e Energia, de março de 2013, o Brasil apresentou uma produção de 70,6 milhões de metros cúbicos por dia de gás natural. Subtraindo o consumo nas unidades de exploração e produção (E&P), absorção nas unidades produtoras de gás natural (UPGNs), reinjeção, queimas e perdas, a produção da exploração e produção foi de 42,9 milhões de m³/dia. Considerando as perdas em transporte, armazenamento e ajustes, esse valor é reduzido para 39,7 milhões de m³/dia.

De acordo com o mesmo boletim, o Brasil importou da Bolívia 35,9 milhões de m³/dia, incluindo o gás natural liquefeito (GNL). Considerando as perdas em transporte na importação, esse valor é reduzido para 35,1 milhões de m³/dia. Assim, a oferta total de gás natural disponível ao mercado brasileiro em 2012 foi de 74,8 milhões de m³/dia, conforme representado na Figura 2.4.

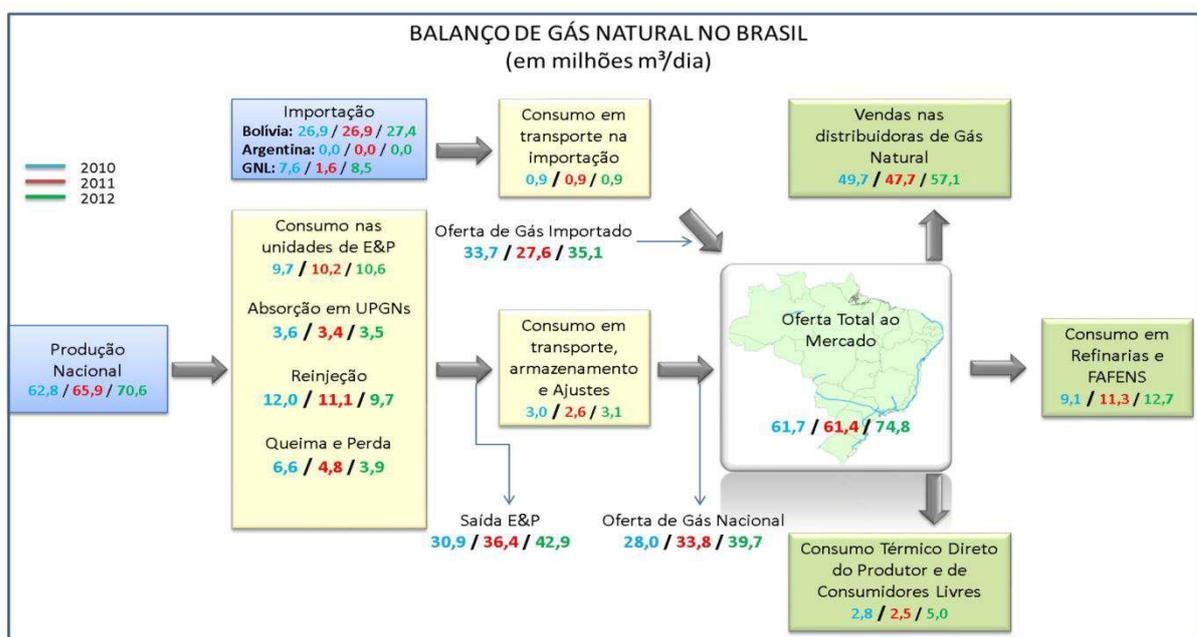


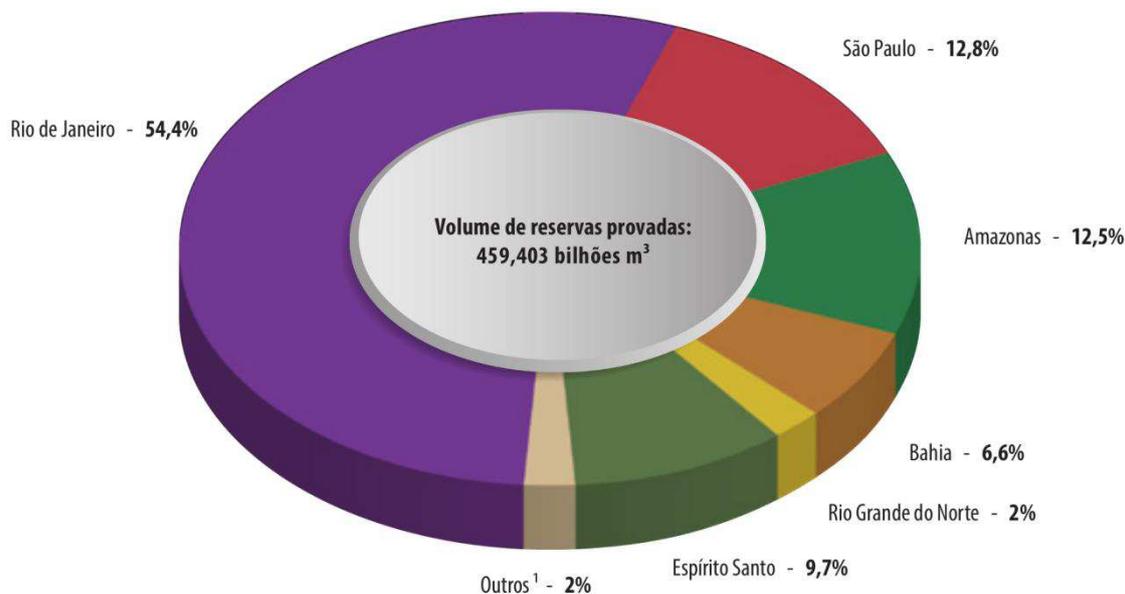
Figura 2.4 - Produção e importação de gás natural no Brasil.

Fonte: MME, (2013)

A versatilidade é a principal característica do gás natural. Essa é uma fonte de energia que pode ser utilizada tanto na geração de energia elétrica, quanto em motores de combustão do setor de transportes, na produção de vapor, calor e refrigeração. Por isso, a aplicação é possível em todos os setores da economia: indústria, comércio, serviços e residências.

O Estado do Rio de Janeiro detém a maior reserva de gás natural do País, seguido pelos Estados de São Paulo e Amazonas, conforme pode ser visto na Figura 2.5. Espírito Santo, Bahia e Rio Grande do Norte também possuem reservas importantes, que contribuem de forma significativa com a matriz energética do Brasil.

A ANP considera reservas provadas como sendo aquelas que, com base na análise de dados geológicos e de engenharia, se estima recuperar comercialmente com elevado grau de certeza.



¹Inclui os Estados de Alagoas, Ceará, Paraná, Santa Catarina e Sergipe

Figura 2.5 - Distribuição percentual das reservas de gás natural por Estado brasileiro.

Fonte: MME (2013)

2.1.3.1 Composição físico-química do gás natural

A portaria N° 104 da ANP, emitida em 8 de junho de 2002, fornece a composição típica do gás natural (GN), as propriedades e as características do gás natural comercial representadas nas Tabela 2.5 a Fonte: ANP (2002)

Tabela 2.7.

Tabela 2.5 - Composição típica do gás natural no Brasil.

Elementos	Gás natural associado	Gás natural não associado	Gás Processado
Metano	81,57	85,48	88,56
Etano	9,17	8,26	9,17
Propano	5,13	3,06	0,42
I-Butano	0,94	0,47	-
N-Butano	1,45	0,85	-
I-Pentano	0,26	0,20	-
N-Pentano	0,30	0,24	-
Hexano	0,15	0,21	-
Heptano e superiores	0,12	0,06	-
Nitrogênio	0,52	0,53	1,20
Dióxido de carbono	0,39	0,64	0,65
Total	100 %	100 %	100 %

Fonte: ANP (2002)

Tabela 2.6 - Características do gás natural comercial Brasileiro.

Características	Unidade	Limites por região			Métodos de Ensaio
		Norte	Nordeste	Sul, Sudeste e Centro Oeste	
Poder calorífico superior	kJ/ m ³	34000 a 38400	35000 a 42500	35000 a 42500	D 3588
Índice de Wobbe	kJ/m ³	40500 a 45000	40500 a 52500	40500 a 52500	ASTM D 3588
Metano, mínimo	% vol.	68,0	86,0	86,0	D 1945
Etano, máx.	% vol.	12,0	10,0	10,0	
Propano, máx.	% vol	3,0	3,0	3,0	
Butano e mais pesados, máx.	% vol	1,5	1,5	15	
Oxigênio, máx.	% vol	0,8	0,5	0,5	
Inertes (N ₂ + CO ₂), máx.	% vol.	18,0	5,0	40	
Nitrogênio	% vol.	Anotar	2,0	2,0	
Enxofre Total, máx.	mg/m ³	70	70	70	D 5504
Gás Sulfídrico (HS), máx.	mg/m ³	10,0	15,0	10,0	D 5504
Ponto de orvalho da água a 1atm, máx.	°C	-39	-39	-39	D 5454

Fonte: ANP (2002)

Tabela 2.7 - Propriedades do gás natural.

Propriedade	Valor
PCI (kcal/m ³)	9916
PCS (kcal/m ³)	10941
Densidade (kg/m ³)	0,71

Fonte: ANP (2002)

2.2 Combustão

2.2.1 Aspectos gerais

A combustão é um processo químico básico que libera energia a partir da queima de um combustível com o ar. Para que a combustão ocorra, faz-se necessário que combustível, oxigênio e calor estejam presentes juntos. A combustão é a reação química de uma determinada substância com o oxigênio.

O processo de combustão é iniciado por aquecimento do combustível acima da sua temperatura de ignição, na presença de oxigênio ou ar. Sob a influência do calor, as ligações químicas do combustível são quebradas. Se ocorrer uma combustão completa, os elementos combustíveis (C, H, e S) reagem com o conteúdo de oxigênio do ar para formar CO₂, H₂O e SO₂. Se não está presente oxigênio suficiente, ou a mistura de combustível e ar é insuficiente, os gases de queima são parcialmente arrefecidos abaixo da temperatura de ignição e o processo de combustão permanece incompleto. Os gases de combustão, em seguida, ainda contêm componentes combustíveis, principalmente monóxido de carbono (CO), o carbono não queimado (C) e os vários hidrocarbonetos (C_xH_y) (Dermibras, 2008).

No processo de combustão, quando ocorre a reação química, as ligações no interior das moléculas são quebradas e os átomos e os elétrons dos reagentes são reorganizados para formar os produtos. Considera-se uma combustão completa quando todo o carbono presente no combustível é queimado e forma dióxido de carbono, todo o hidrogênio é queimado e forma água, todo o enxofre é queimado e forma dióxido de enxofre e todos os elementos são completamente oxidados. A combustão é considerada incompleta se as condições citadas não forem atendidas (Moran e Shapiro, 2008).

Nos motores de combustão interna, a reação típica do processo de combustão tem as seguintes características:



O dióxido de carbono (CO₂) é um gás incolor, inodoro, gás não venenoso que resulta da queima de combustíveis fósseis e é um constituinte normal do ar ambiente. O CO₂ não

prejudica diretamente a saúde humana, mas é um “gás de efeito estufa”, que prende o calor da Terra e contribui potencialmente com o aquecimento global.

O monóxido de carbono (CO) é um gás tóxico, incolor e inodoro produzido por combustão incompleta. Um dos principais poluentes do ar, ele é emitido em grandes quantidades pelo escape dos veículos que utilizam como combustível o diesel proveniente do petróleo. CO é emitido diretamente a partir da saída do escape dos veículos. É mais provável ocorrer combustão incompleta na baixa relação ar-combustível. Essas condições são comuns durante a partida do veículo, quando o abastecimento de ar é limitado, quando os carros não são ajustados corretamente e em alturas em que o ar “fino” reduz eficazmente a quantidade de oxigênio disponível para a combustão. Dois terços das emissões de CO são provenientes de fontes de transporte, com a maior contribuição vindo de veículos pesados de estrada (caminhões). Em áreas urbanas, a contribuição de CO para a poluição provém de automóveis e pode exceder 90%.

Sob as condições de alta pressão e temperatura em um motor, átomos de oxigênio e nitrogênio reagem com o ar para formar diferentes óxidos de nitrogênio, normalmente conhecidos como NO_x . Os óxidos de nitrogênio, como os hidrocarbonetos, são precursores da formação de ozônio e também contribuem para a formação de chuva ácida.

Hidrocarbonetos (HC) resultam de emissões quando as moléculas de combustível no motor queimam apenas parcialmente. Alguns compostos de HC são os principais poluentes atmosféricos e podem ser participantes ativos no processo fotoquímico ou afetar a saúde.

HCs reagem na presença de óxidos de nitrogênio e luz solar para formar ozônio ao nível do solo, um componente importante da poluição. Ozônio irrita os olhos, danifica os pulmões e agrava os problemas respiratórios. É o mais difundido e intratável problema da poluição do ar urbano. Certo número de hidrocarbonetos do escape são também tóxicos, com o potencial de causar câncer. Poluentes de hidrocarbonetos também escapam para o ar através de evaporação de combustíveis e perdas por evaporação, e podem ser responsáveis pela maioria da poluição total dos HCs a partir de modelos dos carros atuais, em dias quentes, quando os níveis de ozônio são mais elevados.

Óxidos de enxofre (SO_x) são gases incolores pungentes, formados principalmente pela combustão de combustíveis fósseis que contêm enxofre, especialmente carvão e óleo. Considerados um dos principais poluentes atmosféricos, os SO_x podem ter impacto negativo na saúde humana e danificar a vegetação.

Materiais particulados (MP) são minúsculas partículas sólidas ou líquidas de fuligem, poeira, fumaça, vapores e aerossóis. O tamanho das partículas, 10 microns (ou menos), lhes permite ser introduzidas facilmente nos pulmões, através do ar, onde podem ser depositadas, resultando em efeitos adversos para a saúde. Esses materiais também fazem com que a visibilidade seja reduzida e são constituintes de poluente do ar.

A quantidade de calor liberado quando um mol de um hidrocarboneto é queimado para formar CO₂ e água é chamada calor da combustão. Combustão com formação de CO₂ e água é uma característica dos compostos orgânicos; sob condições especiais, é utilizada para determinar o teor de carbono e hidrogênio (Demirbas, 2008). Durante a combustão do combustível, parte deste subdivide-se em parte volátil e resíduo sólido. Durante o aquecimento, evapora-se juntamente com uma parte do carbono na forma de hidrocarbonetos, gases combustíveis e CO, liberados por degradação térmica do combustível.

2.2.2 Entalpia de formação

A entalpia de formação de um composto químico é a variação da entalpia da reação de formação desse composto a partir dos elementos que o compõem em um estado de referência e pode ser compreendida como a energia liberada ou absorvida pela reação de formação desses compostos.

Moran e Shapiro (2008) definem entalpia de formação como a entalpia de um composto em um estado-padrão, é simbolizada por \bar{h}_f^0 . Ainda segundo os autores, a entalpia de formação é a energia liberada ou absorvida quando um composto é formado a partir de seus elementos, estando os componentes à temperatura (T_{ref}) e pressão (p_{ref}) de referência. A entalpia de formação é, normalmente, determinada pela aplicação de procedimentos de termodinâmica estatística por meio de dados obtidos em espectroscopia.

Para melhor entendimento da definição de entalpia de formação, considere o sistema representado na Figura 2.6, no qual o carbono e o oxigênio são introduzidos no sistema nas mesmas temperatura e pressão de referência, operando em regime permanente para formar o dióxido de carbono nas mesmas temperatura e pressão. O dióxido de carbono é formado a partir do carbono e do oxigênio, conforme a equação 2.1.



Para que o dióxido de carbono termine a reação com a mesma temperatura do carbono e do oxigênio, a reação deverá ser exotérmica, onde haverá uma transferência de calor do sistema para a vizinhança.

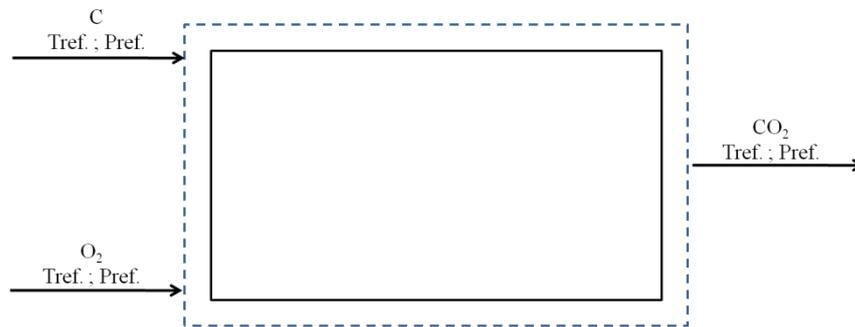


Figura 2.6 - Sistema representando o conceito de entalpia de formação.

Considerando-se que não haja trabalho (\dot{W}_{vc}) e que efeitos das energias cinética e potencial sejam desprezíveis, a taxa de transferência de calor e o fluxo das entalpias de entrada e saída estão relacionados pelo balanço de massa da taxa de energia, conforme a equação 2.2.

$$\dot{Q}_{vc} + \dot{m}_c h_c + \dot{m}_{O_2} h_{O_2} = \dot{m}_{CO_2} h_{CO_2} \quad (2.2)$$

onde \dot{m} e h são, respectivamente, a vazão mássica e a entalpia específica. Para entalpias em base molar, o balanço da taxa de energia pode ser escrito da seguinte forma:

$$0 = \dot{Q}_{vc} + \dot{n}_C \bar{h}_C + \dot{n}_{O_2} \bar{h}_{O_2} - \dot{n}_{CO_2} \bar{h}_{CO_2} \quad (2.3)$$

onde \dot{n} e \bar{h} são, respectivamente, a vazão molar e a entalpia por mol. Desenvolvendo a equação 2.3 para determinar a entalpia específica do dióxido de carbono e verificando a equação 2.1, percebe-se que todas as equações molares são iguais. Pode-se, assim, reescrever a equação da seguinte forma:

$$\bar{h}_{\text{CO}_2} = \frac{\dot{Q}_{\text{vc}}}{\dot{n}_{\text{CO}_2}} + \frac{\dot{n}_{\text{C}}}{\dot{n}_{\text{CO}_2}} \bar{h}_{\text{C}} + \frac{\dot{n}_{\text{O}_2}}{\dot{n}_{\text{CO}_2}} \bar{h}_{\text{O}_2} = \frac{\dot{Q}_{\text{vc}}}{\dot{n}_{\text{CO}_2}} + \bar{h}_{\text{C}} + \bar{h}_{\text{O}_2} \quad (2.4)$$

Tendo em vista que o carbono e o oxigênio são elementos estáveis no estado-padrão, então $\bar{h}_{\text{C}} + \bar{h}_{\text{O}_2} = 0$; logo, a equação 2.4 pode ser escrita assim:

$$\bar{h}_{\text{CO}_2} = \frac{\dot{Q}_{\text{vc}}}{\dot{n}_{\text{CO}_2}} \quad (2.5)$$

Desta forma, o valor designado para a entalpia específica do dióxido de carbono no estado-padrão, a entalpia de formação, é igual à transferência de calor, por mol de CO_2 , entre o sistema e sua vizinhança. Se a transferência de calor fosse medida precisamente, seria encontrado $-393,520$ kJ/kmol de dióxido de carbono formado durante o processo.

A entalpia específica de um composto em um estado qualquer que não seja o estado-padrão é determinada através da soma da variação da entalpia específica $\Delta\bar{h}$ entre o estado-padrão de interesse para a entalpia de formação.

$$\bar{h}(T, p) = \bar{h}_f^0 + \left[\bar{h}(T, p) - \bar{h}(T_{\text{ref}}, p_{\text{ref}}) \right] = \bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h} \quad (2.6)$$

2.2.3 Entalpia de combustão

Moran e Shapiro (2008) definem entalpia de combustão como sendo a diferença entre a entalpia dos produtos e a entalpia dos reagentes quando ocorre uma combustão completa a uma dada temperatura e pressão, conforme representado na equação 2.7, onde n representa o número de mols dos reagentes e dos produtos por mol de combustível. Se a entalpia de combustão for expressa em base de unidade de massa de combustível, será denominada \bar{h}_{RP} .

$$\bar{h}_{RP} = H_P - H_R = \sum_P n_s (\bar{h}_f^o + \Delta h)_s - \sum_R n_e (\bar{h}_f^o + \Delta h)_e = \sum_P n_s \bar{h}_s - \sum_P n_e \bar{h}_e \quad (2.7)$$

2.4 Temperatura adiabática de chama

A temperatura adiabática de chama ocorre em um sistema adiabático, sem ocorrer trabalho. As energias cinética e potencial são consideradas desprezíveis. Nessas condições, essa temperatura é considerada a temperatura final de combustão de uma mistura estequiométrica, sem considerar as perdas de calor, ou seja, é a temperatura mais elevada que pode atingir um processo de combustão.

O excesso de ar pode ser utilizado para controlar a temperatura adiabática de chama, principalmente para equipamentos que têm fatores limitantes de temperatura (turbinas a vapor, por exemplo).

A temperatura adiabática de chama também tem grande influência nas emissões de NO_x . Quanto maior a temperatura adiabática de chama, maior será a produção de emissões desse poluente (Martins, 2011).

As misturas pobres podem reduzir essas temperaturas ou, quando se utiliza a recirculação dos gases de escape (EGR – Exhaust gas recirculation), originam-se temperaturas de chama mais baixa; por outro lado, quanto maior for a temperatura adiabática de chama, maior será o rendimento do motor (Martins, 2011).

2.3 Motores de combustão interna

2.3.1 Informações gerais

A geração de energia pode ser realizada de diversas formas, utilizando diferentes tipos de combustíveis (óleo diesel, gasolina, biodiesel, gasolina, hidrogênio, metano etc.). No entanto, se nos referirmos à produção de energia através das máquinas térmicas, pode-se dizer que estas podem operar de duas formas: ciclo aberto ou ciclo fechado.

A forma como a fonte de energia é fornecida ao equipamento durante cada ciclo de operação permite classificá-lo como máquina térmica de combustão interna ou externa. As máquinas térmicas são equipamentos que possibilitam transformar calor em trabalho.

O motor de combustão interna é classificado como uma máquina térmica que converte energia química de um combustível em energia mecânica. A energia química do combustível converte-se primeiramente em energia térmica, através da combustão, devido à queima entre o combustível e o ar, no interior do motor, sendo, em seguida, convertida em mecânica. Normalmente, essa energia é disponibilizada na forma de rotação do eixo de saída do motor.

Geralmente, os motores de combustão interna são classificados em duas categorias quanto à queima do combustível: motores de ignição por centelha (ciclo Otto) e motores de ignição por compressão (ciclo Diesel).

Nos motores de ignição por centelha, a mistura de ar/combustível é comprimida até que a temperatura obtida nessa compressão fique abaixo do ponto de ignição. Assim, sob essas condições, a mistura recebe uma centelha da vela de ignição, que provoca a queima da mistura ar/combustível em um instante pré-determinado por um sistema de controle de ignição.

Nos motores de ignição por compressão, o ar é comprimido a pressões e temperaturas nas quais o combustível, que facilmente entra em ignição, explode espontaneamente quando injetado e queima progressivamente depois da ignição (Moran e Shapiro, 2008).

Os motores mais utilizados nos automóveis, tanto a gasolina quanto a diesel, são os motores de quatro tempos, ou seja, realizam o ciclo em quatro cursos, onde o ciclo é equivalente a duas voltas (720°) na árvore de manivelas. São motores de baixo custo de fabricação, com rendimento em processo de evolução contínua, ainda com índices de poluentes considerados não satisfatórios. Novas tecnologias têm contribuído, a cada dia, para aumentar a potência, utilizando a mesma cilindrada, e reduzir o nível dos gases poluentes.

A Figura 2.7 apresenta um esquema de motor de combustão interna, operando em um ciclo de quatro tempos, quais sejam: admissão, compressão, explosão e descarga. Os quatro tempos do motor ocorrem dentro do limite do cilindro que está compreendido entre o ponto morto superior e o ponto morto inferior. A este limite entre os pontos mortos, chamamos de cilindrada, que corresponde ao volume varrido pelo pistão no seu deslocamento do PMS até o PMI. Esse processo de produção de trabalho tem início no ponto morto superior, com a válvula de admissão aberta e o pistão se deslocando até o ponto morto inferior, realizando

admissão de ar no motor diesel. Ao chegar ao PMI, fecha-se a válvula de admissão e o pistão se desloca do PMI ao PMS, realizando a compressão do ar que foi admitido. Ao se aproximar do PMS, uma certa quantidade de óleo diesel é pulverizada na massa de ar aquecida, ocorrendo a combustão. Por força da combustão, o pistão agora se desloca do PMS ao PMI, no que se chama de tempo motor, ou seja: neste deslocamento, o motor produz trabalho. Ao chegar ao PMI, abre-se a válvula de escapamento e o pistão se desloca para o PMS, descarregando a mistura queimada. Neste momento, a válvula de admissão se abre e tem início um novo ciclo. Em um motor de combustão interna de quatro tempos, o pistão executa quatro cursos distintos dentro do cilindro para cada duas rotações da árvore de manivelas. A Figura 2.8 fornece um diagrama pressão-deslocamento tal qual poderia ser visto em um osciloscópio.

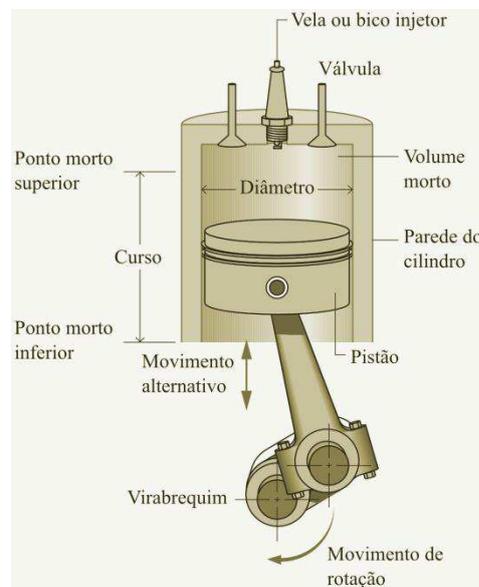


Figura 2.7 - Conjunto pistão-cilindro de um motor de combustão interna.

Fonte: Moran e Shapiro (2008)

A potência máxima que um motor pode fornecer é limitada pela quantidade de combustível que pode ser queimado eficientemente no cilindro. A queima do combustível é, por sua vez, limitada pela quantidade de ar que pode ser admitida no cilindro por cada ciclo.

Se o ar introduzido é comprimido a uma pressão maior que a ambiente antes de entrar no cilindro, será possível ter uma maior massa de ar no mesmo volume e, portanto, maior

quantidade de combustível poderá ser queimada. Com a contribuição desses fatores e permanecendo constante a potência de atrito, tem-se, então, um aumento da potência gerada. Esse é o propósito fundamental da sobre-alimentação do motor (Schmidt, 1960). Este processo continua ainda hoje sendo bastante empregado, utilizando-se dos turbo-compressores e “super-charger” para realizar a operação.

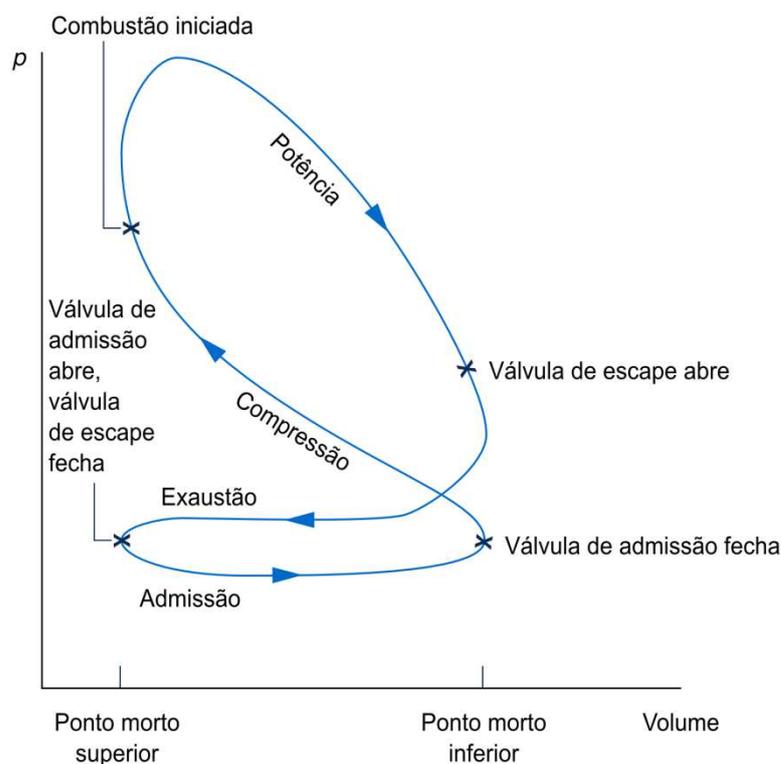


Figura 2.8 - Diagrama pressão-deslocamento para um motor de combustão interna alternativo.

Fonte: Adaptado de Moran e Shapiro (2008)

Partindo-se de uma cilindrada fixa, a única forma de aumentar a massa de ar é aumentar sua densidade, o que poderá ocorrer pressurizando-se o ar antes de este ser introduzido ao cilindro, durante a admissão. Essa pressurização é realizada pelo turbo-compressor. Nos motores do ciclo Diesel, será pressurizado apenas ar e, nos motores do ciclo Otto, será pressurizada uma mistura ar+combustível. É importante lembrar que, após o processo de compressão, e antes deste ar ou mistura ar+combustível serem introduzidos no motor, sejam submetidos ao processo de resfriamento, que viabilizará a utilização de sobre-alimentação.

Um parâmetro que serve como forma de comparar dois motores é a pressão média efetiva (p_{me}), que nada mais é que a pressão hipotética constante, existente no interior do cilindro, capaz de desenvolver uma determinada potência. Pode ser definida como:

$$p_{me} = \frac{\text{trabalho líquido para um ciclo}}{\text{volume deslocado}} \quad (2.4)$$

2.3.2 Motores diesel dual

A crise energética que o mundo enfrenta devido ao preço do petróleo tem estimulado o uso de combustíveis alternativos para minimizar a emissão de gases tóxicos, que causam grandes danos à saúde humana e contribuem para o aumento do efeito estufa. Muitas pesquisas têm sido feitas ao longo dos últimos anos, com o objetivo de encontrar combustíveis alternativos para reduzir o nível de poluição na Terra. Desde então, a busca por fontes renováveis de energia tem sido intensa.

As pesquisas que vêm acontecendo desde 1980 têm apresentado o gás natural e o biodiesel como fontes alternativas de energia, que podem contribuir para atender à demanda energética de países de todo o mundo. Os estudos mostram também que o uso de biodiesel é muito eficaz na redução dos gases poluentes de escape. Quanto à matriz energética brasileira, ambos, tanto o biodiesel quanto o gás natural, têm importância significativa, especialmente após a crise causada pela escassez de energia elétrica que ocorreu no Brasil em 2001.

Motores térmicos são, geralmente, divididos em duas categorias: os motores de ignição por compressão e os de ignição por centelha. Em motores de ignição por compressão (motores diesel), o ar é comprimido a pressões e temperaturas nas quais o combustível líquido injetado queima progressivamente após a ignição. Quando, simultaneamente, mais de um combustível é usado em motores diesel, estes são chamados motores a combustível dual.

Motores a combustível dual apresentam bons e diferentes atributos: a) operam com mais de uma fonte de combustível; b) têm ganhado popularidade, porque reduzem a quantidade de diesel utilizado como combustível; c) reduzem as emissões de poluentes, proporcionando, assim, a melhoria da qualidade do ar; d) não exigem modificação nos motores diesel (ou exigem conversão relativamente simples quando for o caso para operar no

modo dual; e) mantêm a potência original (no modo dual ou com diesel puro); f) Diesel como combustível piloto proporciona lubrificação das válvulas e anéis, quando combinado com gás natural. Por causa dessas vantagens, o combustível dual para motores diesel está se tornando popular em várias partes do mundo.

Costa (2012) realizou estudo experimental utilizando diesel e gás natural, com taxa de substituição em torno de 85%, e relatou a viabilidade econômica do uso de motores diesel operando no modo dual.

Atabani et al. (2012) relataram uma extensa e abrangente revisão sobre o uso do biodiesel como fonte alternativa de energia e suas características. Foram apresentadas e discutidas informações sobre os métodos de obtenção, tecnologias de produção, propriedades físicas e químicas, vantagens e desvantagens e viabilidade econômica do biodiesel. Os autores concluem que o biodiesel pode ser mais eficaz se usado como complemento para outras fontes de energia e recomendam mais pesquisas e desenvolvimento tecnológicos relacionados ao biodiesel.

Lacour et al. (2012) realizaram um estudo relacionado ao sistema de produção de biogás. Tópicos sobre emissões de poluentes, demanda de energia e produção são apresentados e discutidos, a fim de produzir metano para uso em motores dual. De acordo com os autores, para cargas elevadas, a eficiência do combustível dual é, em geral, maior do que a eficiência para combustível diesel, enquanto para cargas baixas, a eficiência de combustível dual é inferior, devido à dificuldade de controlar a combustão do gás. A eficiência do motor a combustível dual variou de 17,5% a 28,5%, enquanto a eficiência do motor diesel variou de 19,0% a 26,5%. A taxa de substituição foi de cerca de 80% de diesel substituído por metano, em um trator com motor de 110 kW de potência nominal.

Fazal et al. (2011) reportam uma revisão relacionada à viabilidade do uso do biodiesel em automóveis. Foram apresentadas informações sobre a compatibilidade de material (desgaste e corrosão), desempenho do motor, emissões de poluentes e durabilidade do motor. Os autores relataram que o uso do biodiesel como combustível reduziu as emissões, porém aumentou o atrito das partes móveis, a sujeira no bico injetor e provocou entupimento de filtro. Por causa de fatores como auto-oxidação, natureza higroscópica, maior condutividade

elétrica, polaridade e propriedades de solvência, a utilização de biodiesel em motores diesel pode provocar corrosão de metais e degradação dos elastômeros. Por outro lado, a maior concentração de oxigênio no biodiesel melhora a lubricidade e a combustão e reduz as emissões, ao mesmo tempo em que aumenta ligeiramente as emissões de NO_x.

Xue et al. (2011) apresentaram uma revisão sobre o uso de biodiesel em motores diesel com suas respectivas performances e emissões. Foram demonstrados e analisados fatores como potência, durabilidade e economia do motor, emissões regulamentadas (NO_x, CO, HC e CO₂) e não regulamentadas (emissões de formaldeído, acetaldeído, benzeno, tolueno, xileno, etc). Segundo os autores, o uso do biodiesel poderá reduzir a potência do motor, mas esse fator pode ser normalmente aceitável, tendo em vista que a economia de biodiesel é afetada pelo tipo de motor e pelas condições operacionais (carga, velocidade, tempo de injeção, pressão de injeção, etc). Eles também relataram que o consumo de combustível e as emissões de NO_x aumentam quando o biodiesel é utilizado em motores diesel em lugar motores de diesel mineral.

As emissões de escape e o desempenho do motor dependem, em grande parte, de combustão, turbulência do ar, qualidade da mistura ar-combustível, pressão nos bicos injetores, início real de combustão e muitos outros fatores que tornam os resultados dos testes diferentes de um motor para outro. Além disso, podem variar, dependendo da qualidade e da origem de combustível, bem como dos parâmetros de funcionamento do motor, como a velocidade, a carga, as características de concepção dos motores, etc. (Fazal et al., 2011a).

No (2011) apresentou um estudo de revisão sobre os óleos vegetais não comestíveis (jatropha, karanja, mahua e óleos de linhaça) e seus derivados (puros, misturas, misturas de biodiesel) para serem usados como combustíveis líquidos alternativos em motores de ignição por compressão. De acordo com o autor, o biodiesel e suas misturas geralmente causam um aumento das emissões de NO_x e uma diminuição da HC, CO e PM em comparação com o combustível diesel. Foi relatado que um motor diesel sem qualquer modificação opera com sucesso com uma mistura de 20% óleo vegetal e 80% de combustível diesel, sem danificar suas peças.

Misra e Murthy (2011) relataram, em uma revisão, diferentes aditivos utilizados para melhorar as propriedades de fluxo a frio do biodiesel, desempenho do motor e suas emissões durante o uso de aditivo mesclado com o biodiesel e suas misturas. De acordo com os autores: a) as propriedades do biodiesel escoando a baixa temperatura são menos favoráveis do que o combustível diesel, mas, quando misturado com aditivos, como o querosene, etanol, metanol, e óleo de laranja, o desempenho deste combustível é melhorado, e b) etanol parece ser um bom aditivo quando a potência produzida é comparada à do motor diesel em operação. E este tem uma série de vantagens sobre o biodiesel em relação às emissões de poluentes CO, HC e NO_x.

As emissões de escape e o desempenho do motor dependem, em grande parte, da combustão, da turbulência do ar, da qualidade da mistura ar-combustível, da pressão nos bicos injetores, do início real de combustão e de muitos outros fatores que tornam os resultados dos testes diferentes de um motor para outro. Além disso, podem variar, dependendo da qualidade e da origem do combustível, bem como dos parâmetros de funcionamento do motor, como a velocidade, a carga, as características de concepção dos motores, etc. (Fazal et al., 2011).

Misra e Murthy (2010) realizaram uma revisão sobre o uso de óleos vegetais em motor de ignição por compressão. Segundo os autores, o estudo de muitos pesquisadores com óleos vegetais em misturas com pequena porcentagem de diesel, quando utilizado em motores diesel em baixa potência, tem mostrado grande potencial no que diz respeito ao desempenho térmico, bem como às emissões de escape. Os autores relataram que os principais problemas associados à utilização direta de óleos vegetais em motores de ignição por compressão são os seguintes: diluição do óleo lubrificante, depósitos de carbono, desgaste do revestimento do motor e falha do bico de injeção.

Papagiannakis et al. (2010a) e Papagiannakis et al. (2010b) apresentam estudos sobre os efeitos dos parâmetros do motor (relação ar-combustível total e temperatura de entrada de ar) sobre o desempenho e as emissões motores diesel dual (gás natural e diesel). De acordo com os autores, o aumento da temperatura do ar de entrada pode ser uma solução promissora para melhorar a eficiência do motor e a redução das emissões de CO. O uso do gás natural como um suplemento para o combustível diesel líquido permite controlar tanto o NO, quanto

as emissões de fuligem em motores diesel de injeção direta, exigindo apenas pequenas modificações da estrutura do motor.

Sidibé et al. (2010) apresentam uma revisão da literatura sobre o uso do óleo vegetal bruto filtrado como combustível em motores diesel. Informaram detalhes e discutiram sobre o tipo, a qualidade, características físicas e químicas e parâmetros de produção desses combustíveis. De acordo com esses autores, as principais diferenças no desempenho entre o uso desse óleo vegetal e o do óleo diesel são: queda na potência, de aproximadamente 10%, e depósitos na câmara de combustão e nos motores de injeção direta. A pesquisa revelou, ainda, que para o uso correto do óleo vegetal diretamente nos motores diesel é melhor realizar adaptação ou modificação no motor ou no interior de sua câmara de combustão (modificação pistão).

Gupta et al. (2010) relataram e discutiram comentários sobre os biocombustíveis para o uso em turbina a gás. Biodiesel, bio-etanol, bio-metanol, óleo de pirólise, biogás, gás sintético (dimetil éter) e hidrogênio, de acordo com os autores, com base nas propriedades e disponibilidade, os diferentes biocombustíveis podem ser usados na turbina de gás para geração de energia. Com base nas emissões de poluentes, os autores recomendam o uso do hidrogênio puro em turbina a gás devido às emissões zero de carbono e baixas emissões.

Sahoo et al. (2009) apresentam uma revisão relacionada à investigação realizada por vários cientistas sobre o efeito de parâmetros de projeto e operação do motor (carga, velocidade, taxa de compressão, tempo de injeção de combustível piloto introduzido no motor, condições do coletor de admissão) e o tipo de combustível gasoso sobre o desempenho do motor diesel dual (gás-diesel). Foi apresentado comentário sobre desempenho, combustão e emissão de diferentes características de motores usando combustível dual, que utilizam gás natural, biogás, metano, gás liquefeito de petróleo, propano, etc. Os autores revelam que a eficiência térmica dos motores que usam o combustível dual aumenta tanto com a maior potência do motor, quanto com o avanço do tempo de injeção ou com aumento da quantidade de combustível piloto.

Murugesan et al. (2009) apresentaram um estudo de revisão sobre as perspectivas e oportunidades do uso de biodiesel como combustível em motores diesel. Os autores

apresentaram as vantagens e as desvantagens da utilização desse combustível em motores diesel. De acordo com eles, o uso do biodiesel em motores diesel convencional resulta na redução substancial de hidrocarbonetos não queimados, monóxido de carbono, emissões de partículas poluentes e óxido de nitrogênio. Os autores ainda apresentaram e discutiram a sustentabilidade do tempo de injeção nos motores diesel e a operação com misturas de biodiesel e relataram que a mistura B20 é a melhor alternativa de combustível para motor diesel operando com biodiesel.

Carlucci et al. (2008) relatam uma pesquisa experimental e análise de combustão de um motor de injeção direta utilizando diesel e gás natural. Nesta pesquisa, foi analisado o efeito do gás natural comprimido (metano), da pressão de injeção do combustível diesel e da quantidade do combustível injetado durante a injeção sobre o desenvolvimento e desempenho do motor de combustão (emissões e consumo de combustível). Verificou-se que a análise da taxa de liberação de calor não é suficiente para explicar o efeito de cada um dos parâmetros de injeção sobre as emissões poluentes.

Shahid e Jamal (2008) apresentam uma revisão da literatura sobre o uso do biodiesel em motores de ignição por compressão. De acordo com os autores, as experiências com o biodiesel bruto como combustível não mostraram resultados satisfatórios. Os pesquisadores recomendam o uso de biodiesel misturado ao diesel, a fim de reduzir o problema de injeção, fuligem e lubrificação nos anéis dos pistões. Por outro lado, os autores relatam que as propriedades lubrificantes do biodiesel são melhores que a do diesel e podem ajudar a aumentar a vida útil do motor. Além disso, esse combustível é favorável ao meio ambiente e produz emissões muito menos poluentes (NO_x , HC e zero SO_x) quando comparadas ao combustível diesel. Shahid e Jamal recomendam, ainda, o uso do biodiesel puro (B100) em área urbana.

Kegl (2008) apresentou pesquisa que discute a influência do biodiesel (óleo de canola) sobre a injeção, pulverização e características do motor diesel. O foco é a redução das emissões prejudiciais em comparação ao uso de diesel mineral como combustível em motores diesel. As propriedades térmicas e físicas, tais como viscosidade, densidade, tensão superficial e velocidade do som são determinadas e comparadas com as do diesel mineral. Os resultados indicam que, ao utilizar o biodiesel, as emissões nocivas (NO_x , CO, HC e fumaça) podem ser

reduzidas, aproximadamente, em 25%, 25%, 30% e 50%, respectivamente, sob condição de otimização do tempo de injeção da bomba.

Nabi et al. (2006) apresentam uma pesquisa teórica e experimental sobre as emissões de poluentes, utilizando diesel puro e misturas diesel-biodiesel em um motor diesel de quatro tempos, naturalmente aspirado de injeção direta. Segundo esses autores, em comparação com o combustível diesel convencional, quando são utilizadas misturas diesel-biodiesel, obtém-se emissões de monóxido de carbono mais baixas, incluindo fumaça e emissões NO_x mais elevadas. Com a aplicação da técnica EGR, as emissões de NO_x diminuíram para ambos os combustíveis.

Por causa de suas características importantes relatadas na literatura, o gás natural e o biodiesel estão sendo utilizados como combustíveis alternativos em motores diesel. No entanto, a combustão do gás natural é caracterizada por um longo tempo de atraso na ignição e esse elemento não pode ser utilizado diretamente como combustível para um motor de combustão interna a diesel. Assim, algum tipo de ajuda na ignição é necessário (Mbarawa et al., 2001).

A vantagem do motor diesel dual reside no fato de que ele utiliza a diferença de inflamabilidade dos dois combustíveis. A presença do combustível gasoso influencia ambos os processos de pré-ignição e pós-ignição de uma forma complexa, dependendo, principalmente, do combustível utilizado, da sua concentração e das condições de funcionamento (Karim, 1980).

O desempenho do combustível dual em motores diesel tem sido investigado em muitas pesquisas com resultados promissores. Esses estudos foram realizados para comparar o desempenho do motor, características de combustão e emissões quando gás natural e diesel puro ou biodiesel misturados são utilizados em vez do combustível diesel.

A partir dos trabalhos relatados, verificou-se que diferentes pesquisas têm sido desenvolvidas e estudos recentes têm apresentado resultados que demonstram a viabilidade do uso da mistura de diesel (ou ainda biodiesel) e gás natural, como combustível para motores diesel. Esses fatores têm contribuído para os estudos desenvolvidos utilizando os três tipos de combustíveis: diesel, biodiesel e gás natural simultaneamente, de forma a avaliar sua

potencialidade na geração de energia elétrica, bem como para reduzir as emissões de poluentes na atmosfera.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Biodiesel

Os experimentos foram realizados utilizando biodiesel de algodão fornecido pela Cetene (Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste), empresa sediada na cidade de Recife-PE, sendo o biodiesel fabricado na unidade de produção, na cidade de Caetés-PE. O biodiesel utilizado pela empresa é obtido por meio do processo de transesterificação pela rota metanol.

A avaliação da qualidade do biodiesel foi desenvolvida segundo critérios normativos da ANP. No entanto, as normas da ABNT e da ASTM também foram utilizadas, sem que se fugisse às exigências da ANP.

Utilizaram-se como referência para este trabalho os resultados obtidos das caracterizações físico-químicas do biodiesel de algodão e da pesquisa realizada por Dantas (2007), desenvolvida nas rotas metílicas e etílicas que estão representadas na Tabela 3.1. Os resultados encontram-se em limites padrões das condições recomendadas pela Resolução da ANP nº 4, de 02 de fevereiro de 2010.

Considerou-se a seguinte fórmula química para o biodiesel: $C_{18,74}H_{34,43}O_2$.

Tabela 3.1- Parâmetros físico-químicos do biodiesel de algodão, rota metálica e etílica.

Parâmetros	Biodiesel de algodão rota metálica	Biodiesel de algodão rota etílica	Limites ANP
Índice de acidez(mgKOH/g)	0,033	0,79	0,80
Índice de iodo (g/100g)	105,38	99,92	Anotar
Teor de umidade (%)	0,05	0,049	0,05
Glicerina livre (%)	0,019	0,020	0,020
Glicerina total (%)	0,36	0,035	0,038
Densidade 20°C (g/cm ³)	0,855	0,876	Anotar
Teor de enxofre (%)	0,001	0,001	Anotar
Ponto de fulgor (mín.) °C	167	160	100
Corrosividade ao cobre	1	1	1

Fonte: Dantas (2007)

3.1.2 Óleo diesel

O diesel utilizado nos experimentos deste trabalho foi obtido nos postos de combustíveis da região próxima à UFCG, situados em Campina Grande-PB, tendo sido transportado e armazenado em depósitos de 200 litros, mantidos à temperatura e pressão ambiente.

De acordo com Medeiros et al. (2002), o diesel, no Estado da Paraíba, tem 0,28 % de enxofre em massa. Sendo assim, para fins do estudo desenvolvido, considerou-se que o diesel tem a composição química dada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Composição do diesel em base mássica.

Componente	% em massa
$C_{12}H_{26}$	99,72
S	0,28

Fonte: Medeiros et al. (2002)

Para transformar as percentagens mássicas em kmol/kg de diesel, procedeu-se utilizando coluna a coluna, como ilustrado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Composição do diesel em fração volumétrica.

Componente	Fração em massa kg/kg de mistura	Massa molecular kg/kmol	kmol/kg de mistura	Fração molar kmol / kmol de mistura	Fração volumétrica (%)
C ₁₂ H ₂₆	0,9972	170	0,0058658	0,9853022	98,53
S	0,0028	32	0,0000875	0,0146977	1,47
Total	1		0,0059533	1	100

3.1.3 Gás natural

O gás natural, de forma semelhante ao combustível diesel, foi adquirido em postos da cidade de Campina Grande-PB e transportado para o laboratório em um conjunto de 10 cilindros dispostos em uma carroça/reboque, permanecendo na mesma durante todo o experimento. Cada cilindro tem capacidade para armazenar 26 Nm³ na pressão de 22000 kPa e temperatura ambiente. O gás utilizado nos ensaios apresentou a composição química mostrada na Tabela 3.4 e as propriedades físico-químicas fornecidas na Tabela 3.5.

Tabela 3.4 - Composição do gás natural do gasoduto Nordeste.

Componentes	% em volume
Metano	89,42
Etano	7,24
Propano	0,16
Butano	0,18
Hexano (superiores)	0,061
Nitrogênio	1,27
Dióxido de Carbono	1,66
O ₂	0,08
H ₂ S	0,10 mg/m ³
S	0,2 mg/m ³
Inertes (% Vol)	2,230

Fonte: PBGás (2013)

Tabela 3.5 - Propriedades do gás natural do gasoduto Nordeste.

Propriedades	
Índice de Wobe (MJ/m ³)	48,778
Densidade Relativa	0,63
PCS (MJ/m ³)	38,286

Fonte: PBGás (2013)

3.2 Metodologia

3.2.1 Experimental

3.2.1.1 Análises dos combustíveis diesel e biodiesel

A determinação dos resultados das análises dos combustíveis biodiesel e diesel foi realizada pelo laboratório Qualitex Engenharia e Serviços Ltda., de Maceió-AL, credenciado pela ANP.

3.2.1.2 Composição do combustível utilizado

Os experimentos foram realizados com uma composição de combustível de aproximadamente 85% de gás natural, 15% da mistura diesel e biodiesel. Na composição da mistura líquida, o biodiesel teve uma participação que variou de 10% (B10) a 90% (B90) em volume. Realizou-se também um experimento utilizando 85% de gás natural e biodiesel puro (B100).

Conforme Resolução ANP n° 07/2008, desde 1° de janeiro de 2010, o biodiesel passou a ser adicionado ao óleo diesel na proporção de 5% em volume (B5), assim, para calcular as diferentes misturas de diesel/biodiesel de B10 a B90, tornou-se necessário desenvolver um modelo matemático para determinar a quantidade de biodiesel a ser adicionado ao combustível diesel e, assim, obter a mistura desejada. A equação proposta é dada por:

$$\Delta Vb = \frac{\frac{Vb(\%)}{100} (Vb^{\circ} + Vd^{\circ}) - Vb^{\circ}}{1 - \frac{Vb(\%)}{100}} \quad (3.1)$$

onde Δv_b é o volume de biodiesel a ser adicionado na atual mistura, para se obter a nova mistura; $v_b(\%)$ é o volume de biodiesel diesel desejado na nova mistura; v_b° é o volume de biodiesel da atual mistura e v_d° é o volume de diesel da atual mistura.

3.2.1.3 Testes experimentais

Utilizando-se a equação (3.1), foi determinado o volume de biodiesel a ser adicionado em cada mistura diesel/biodiesel (B10 a B90). As amostras foram preparadas e o primeiro

experimento foi realizado com a mistura B10. Coletou-se, antes de iniciar cada experimento, uma amostra de 1 litro de mistura (diesel/biodiesel), para análises posteriores. Para a realização do experimento, ligou-se o motor e esperou-se um determinado tempo (aproximadamente 25 minutos) até que este atingisse a temperatura de aquecimento ideal, ou seja, até a abertura da válvula termostática, para, em seguida, iniciar o experimento. Deu-se atenção especial à mudança entre um experimento e outro (B10 e B20, por exemplo), para evitar a contaminação entre amostras ou misturas. Depois de concluído um experimento e ao iniciar o seguinte, eram coletados aproximadamente 2,5 litros de combustível da amostra para garantir que o circuito de combustível ficasse totalmente limpo da amostra anterior.

a) O sistema eletro-mecânico (motor-gerador)

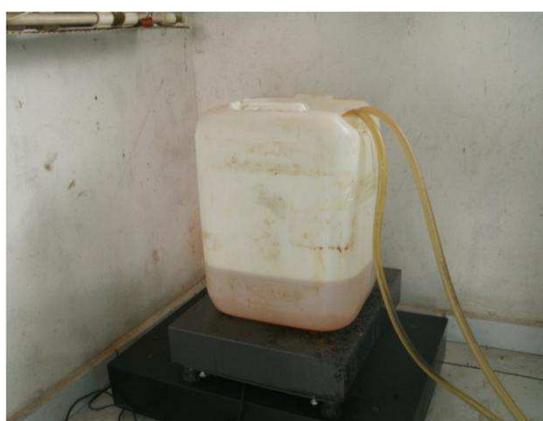
Para a realização dos experimentos, foi utilizada a estrutura existente no Laboratório de Termogeração Elétrica da UFCG, no qual está instalado um sistema eletro-mecânico composto de um motor diesel Cummins modelo 6CTA 8.3 litros, com uma potência mecânica de 188 kW e que trabalha a uma rotação de 1800 rpm, acoplado a um gerador elétrico marca Onan Genset de 150 kW. O laboratório possui, em sua estrutura, um banco de carga resistiva, da marca Alfa Ohmic, com capacidade de 150 kW. Porém, a energia elétrica produzida pelo gerador durante os experimentos foi alimentada na rede da UFCG, pois esse sistema também está interligado com a rede de energia elétrica da Universidade Federal de Campina Grande. O conjunto motor-gerador é instrumentado com medidores de vazão de diesel, gás e ar, termopares e sensores de pressão em diversos pontos de interesse com o objetivo de obter os dados experimentais. Todas as informações obtidas pela referida instrumentação acima são realizadas em tempo real e processadas por um sistema de aquisição de dados cujo software de controle foi desenvolvido em ambiente Matlab pelo Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG. A Figura 3.1 ilustra o sistema de termogeração elétrica usado nos experimentos.



Figura 3.1 - Sistema de Termogeração Elétrica da UFCG.

b) Sistema de medição de combustível (biodiesel/diesel)

Utilizou-se, para realizar a medição de consumo de combustível, uma balança eletrônica de precisão da marca Welmy, modelo W-100/2, com capacidade de medição para 100 kg, divisões de 20 gramas, pesagem mínima de 1 kg, plataforma com dimensões de 390 x 340 mm e pés reguláveis. Essa balança possui uma saída serial que possibilita a sua interligação ao sistema de aquisição de dados. A seguir, são apresentados, na Figura 3.2, a balança e o sistema de controle.



a)



b)

Figura 3.2 - a) balança e b) sistema de leitura.

c) O sistema de aquisição e armazenamento de dados

O sistema de aquisição de dados é composto por um equipamento computacional, projetado, desenvolvido e construído por pesquisadores do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE/UFCG). O sistema recebe os sinais dos sensores de temperatura, vazão e pressão, dentre outros nele instalados, e realiza, inicialmente, um pré-processamento desses sinais. Após esse procedimento, envia as informações para o software de controle instalado em um computador onde são armazenadas e, posteriormente, realizadas as análises dos dados em softwares específicos para este fim (Figura 3.3).

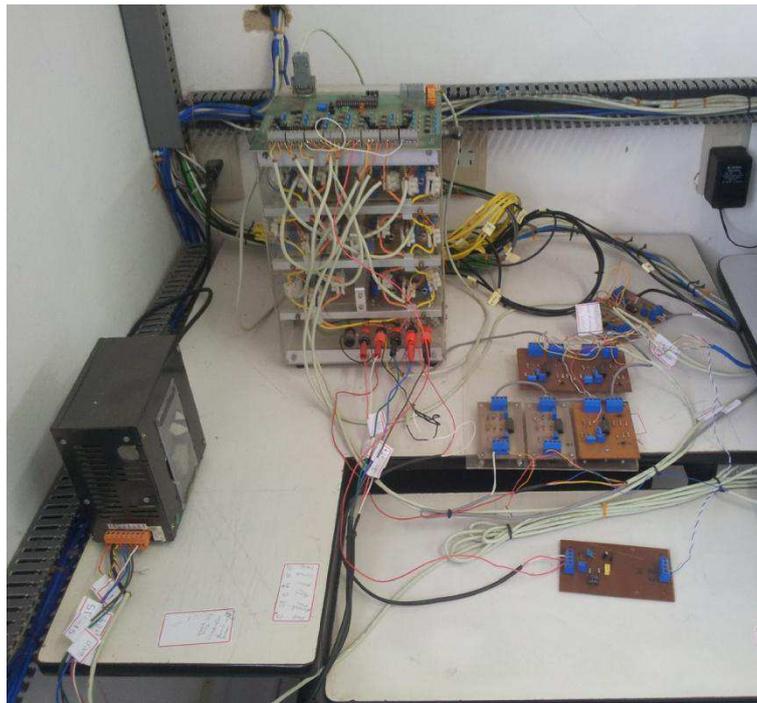


Figura 3.3 - Sistema de aquisição de dados.

O armazenamento e os softwares de controle do sistema de aquisição de dados ficam instalados em um microcomputador Pentium 4 que tem como função processar e armazenar todas as informações coletadas em tempo real, além de gerenciar o controle do kit gás, do sistema do banco de cargas e da planilha auxiliar desenvolvida em Excel, dentre outros. A Figura 3.4 ilustra a GUI de saída com os principais dados do programa em Matlab desenvolvido para gerenciar o sistema de aquisição de dados.

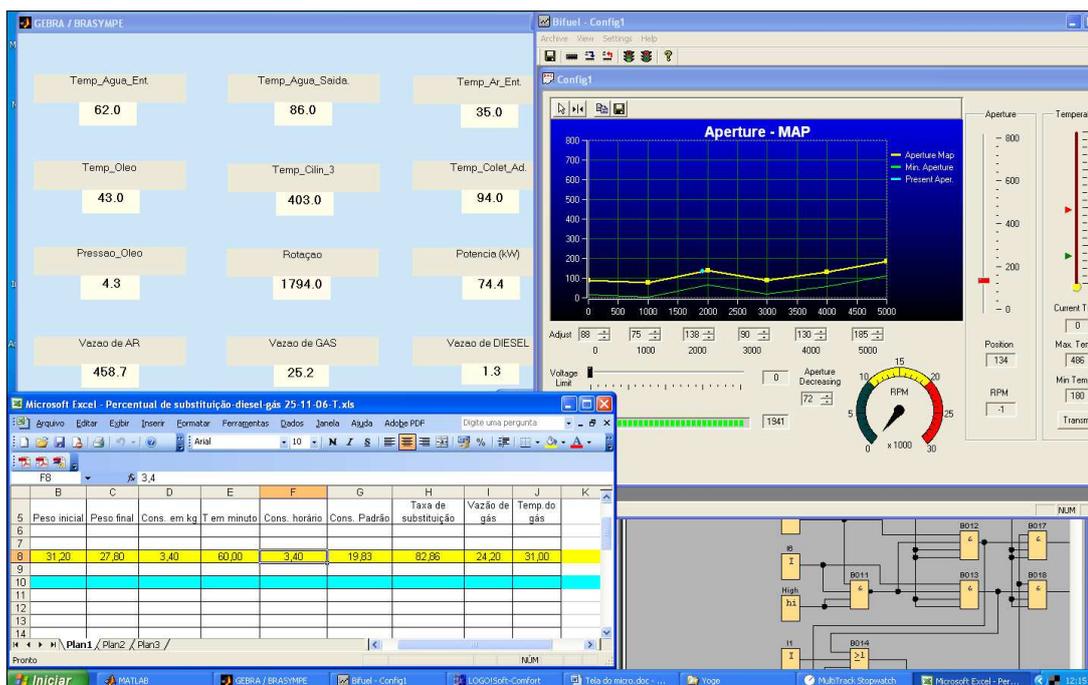


Figura 3.4 - Interface gráfica do sistema de armazenamento de dados em operação com o sistema de aquisição de dados, o kit gás, a planilha auxiliar e o banco de cargas.

d) Sistema de medição de temperatura e pressão no motor

Da Figura 3.5 até a Figura 3.12 ilustram-se os sistemas de medição de temperatura, vazão e pressão no motor. Na Figura 3.5, vê-se o coletor de escapamento do motor onde foram instalados 6 termopares do tipo K, um a um estrategicamente posicionados na saída de cada um dos 6 cilindros do motor, dos quais 4 podem ser observados. Esses termopares têm a função de quantificar as temperaturas naqueles pontos específicos e, a partir destas informações, pôde-se realizar as análises necessárias com relação à energia e exergia do motor, bem como o comportamento dos gases de exaustão. Com esses sinais elétricos gerados pelos termopares e convertidos em valores de temperatura pelo software de controle, torna-se mais fácil a identificação de desequilíbrio entre os cilindros.

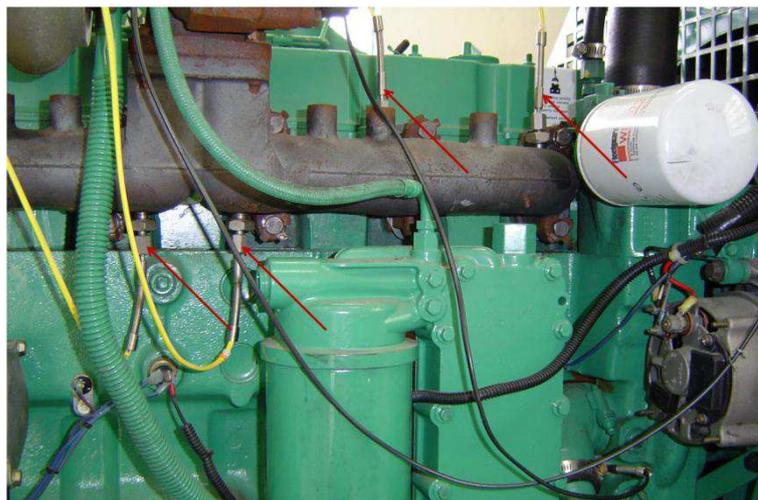


Figura 3.5 - Termopares instalados no coletor de escapamento.

Fonte: Costa (2007)

Os termopares do Tipo K apresentam as seguintes características: cromel-alumel com faixa de medição de -50°C a 1300°C , utilizados para medição da temperatura dos gases de exaustão. A precisão desses tipos de termopares é de 1%.

A Figura 3.6 apresenta um transdutor de pressão, marca Hytronic, modelo TP (piezoresistivo), que opera nas faixas de pressão absoluta de 0 a 5×10^7 Pa, tendo como sinal de saída 10 mV/V (TP) e temperatura do fluido variando de -40°C a 135°C (piezo), utilizado para registrar as variações de pressão do ar na entrada do motor. Neste ponto, também está instalado um termopar do tipo J, para registro da temperatura do ar de admissão.

Os termopares do Tipo J apresentam as seguintes características: são de ferro-constantan com faixa de medição de 78°C a 230°C e foram utilizados para medições de temperaturas do ar de admissão, do óleo lubrificante, do combustível, da água de refrigeração do motor.

Na Figura 3.7, tem-se instalado um transdutor no duto de admissão de ar e/ou mistura, que está encarregado de monitorar a pressão na admissão dos cilindros. Este transdutor foi conectado ao motor através de uma mangueira utilizada em sistemas de freio automotivos, que funciona como um elemento de antivibração capaz de absorver as vibrações oriundas do funcionamento do motor, evitando, assim, interferências indesejadas nos sinais do transdutor.

No mesmo coletor, com o intuito de monitorar também a temperatura, foi feita a instalação de um termopar J. Por último, pode-se observar a instalação de um termopar na linha de entrada da bomba de alimentação primária do motor, com a finalidade de monitorar a temperatura do óleo combustível.



Figura 3.6 - Sensores de medição de pressão e temperatura do ar na entrada do motor.



Figura 3.7 - Transdutor de pressão no coletor de admissão, termopares no coletor de admissão e na linha de óleo combustível.

Na Figura 3.8, ilustra-se um transdutor de pressão instalado na galeria de distribuição de óleo lubrificante. De maneira análoga ao anterior, esse transdutor também foi conectado ao

motor através de uma mangueira utilizada em sistemas de freio automotivos, que funciona como um elemento de antivibração capaz de absorver as vibrações oriundas do funcionamento do motor, evitando, assim, interferências indesejadas nos sinais do transdutor. O objetivo é monitorar a pressão de óleo dentro de valores capazes de atender às necessidades de lubrificação do motor.



Figura 3.8 - Transdutor para medição da pressão do óleo lubrificante na galeria.

As informações obtidas por este transdutor, associadas à temperatura do óleo lubrificante no cárter do motor, obtida por um termopar do tipo J, instalado através do tubo guia da vareta de óleo do motor, determinam um acompanhamento satisfatório do sistema de lubrificação, permitindo que o motor opere sem sofrer danos causados pela falta de óleo lubrificante ou pelo excesso de temperatura deste óleo, conforme pode ser visto na Figura 3.9

-

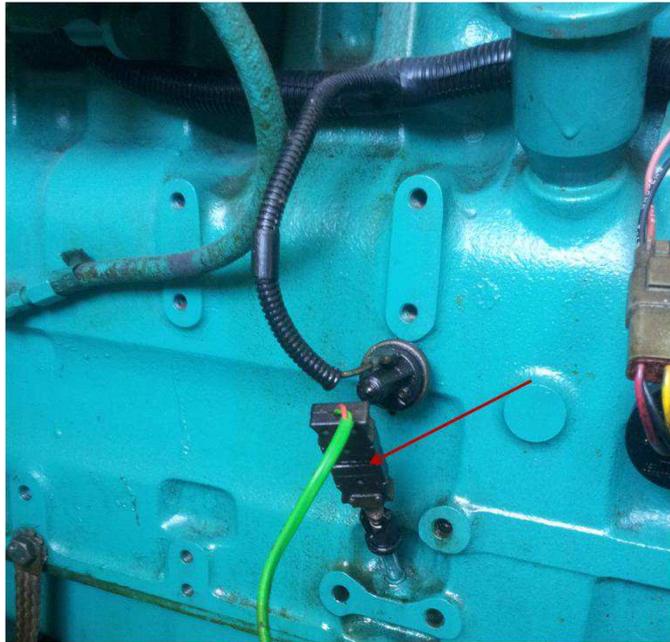


Figura 3.9 - Termopar instalado no tubo guia da vareta de óleo do motor, para medição da temperatura do óleo lubrificante no interior do Carter do motor.

A Figura 3.10 e a Figura 3.11 mostram os pontos de medição da temperatura da água na saída e entrada do motor, respectivamente. Essas medições contribuem para um controle preciso sobre o sistema de arrefecimento do motor, permitindo que ele trabalhe com segurança e seja detectado um possível superaquecimento.



Figura 3.10 - Termopar instalado para medição da temperatura da água na saída do motor.

Além disso, é possível calcular a quantidade de calor retirada pelo sistema, se for conhecida a vazão de água do sistema de refrigeração. Na Figura 3.10, vê-se o ponto de medição da temperatura da água de saída do motor para o radiador, enquanto na Figura 3.11, vê-se o ponto de medição da temperatura da água de entrada no motor.



Figura 3.11 - Termopar instalado para medição da temperatura da água na entrada do motor.

Na Figura 3.12, vê-se a instalação do sistema de medição da condição atmosférica local, composto de um transdutor de pressão e dois termopares do tipo J, que têm o objetivo de medir a pressão atmosférica local, e as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido, respectivamente. De posse desses valores, é possível determinar a umidade relativa do ar no ambiente onde esses equipamentos encontram-se instalados.

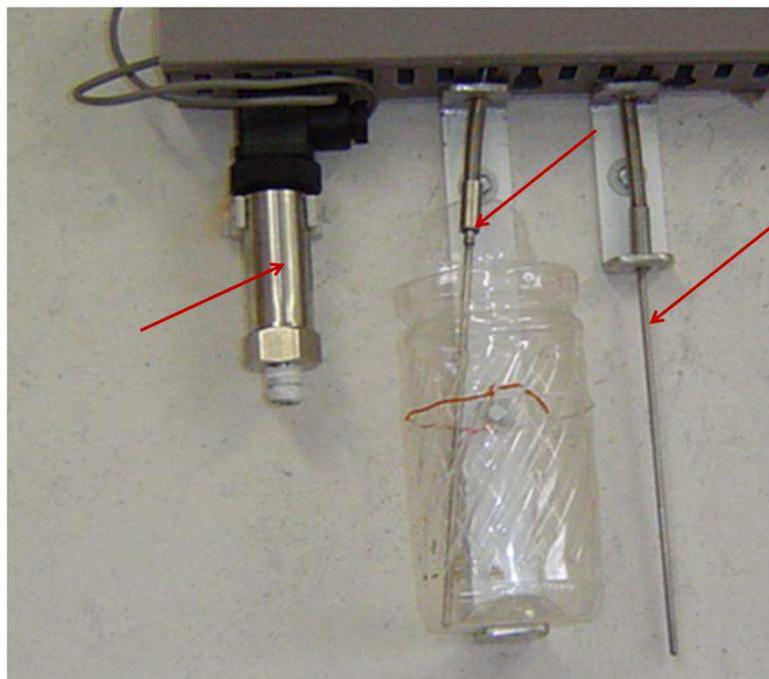


Figura 3.12 - Sistema de medição da condição atmosférica local.

e) Sistema de medição de vazão de ar

Conforme descrição do fabricante, o medidor de vazão é do tipo turbina. Consiste em um corpo e um rotor, montado em seu interior, cuja velocidade angular é diretamente proporcional à velocidade do fluido que está sendo medido. Um sensor de configuração magnética ou indutiva é montado no corpo do medidor de maneira a captar a passagem das aletas do motor, gerando um trem de pulsos de característica senoidal. Estes pulsos são, na sequência, enviados para uma unidade pré-amplificadora ou um conversor para que resultem em sinal de saída (pulsos quadrados) de alta impedância ou sinais analógicos.

O medidor de vazão de ar existente no mercado tinha sua capacidade máxima inferior à quantidade de ar aspirada pelo motor. Costa (2007) realizou uma adaptação, onde se acoplou uma tubulação de ar paralela à existente, a fim de suprir a vazão instalada do medidor de vazão de forma que as necessidades do motor fossem atendidas.

A capacidade de vazão do sistema auxiliar é idêntica àquela apresentada pela tubulação onde o medidor de vazão está instalado. Para isso, este sistema adicional (que contém uma válvula de regulação de vazão tipo borboleta) foi calibrado com manômetros diferenciais e regulação da válvula de controle de fluxo, de forma que os resultados de perda

de carga fossem idênticos nas duas linhas de aspiração de ar do motor. Um segundo ensaio de verificação da calibração foi feito com o uso do próprio medidor de vazão quando fechada a linha de ar auxiliar e o motor em baixo regime de carga; observou-se que essa medição era o dobro do valor medido com ambas as linhas abertas, o que comprova a calibração feita com o sistema de perda de carga.

A Tabela 3.6 apresenta as características técnicas do medidor de vazão fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3.6 - Especificações técnicas do medidor de vazão marca Nykon Dwyler.

Precisão para gases	1%
Repetibilidade	0,05%
Pressão máxima de operação	3×10^7 Pa
Temperatura máxima de operação	180°C
Vazão máxima de ar	735 m ³ /h
Vazão máxima de gás	44 m ³ /h

Fonte: <http://www.dwyler.com.br/medidores-de-vazao>

A Figura 3.13 ilustra o medidor de vazão de ar instalado na tubulação de entrada de ar do motor.



Figura 3.13 - Medidor de vazão de ar.

f) Sistema de medição da vazão do gás natural

Na Figura 3.14, observa-se a instalação do medidor de vazão e temperatura do GNV utilizado na alimentação do motor. Como se pode observar, é uma instalação simples, com as mesmas especificações do medidor de vazão de ar, mudando apenas a sua capacidade de vazão. O medidor de vazão de gás está instalado na linha de alimentação que vem do redutor de pressão, passando pelo kit gás e indo até o motor.

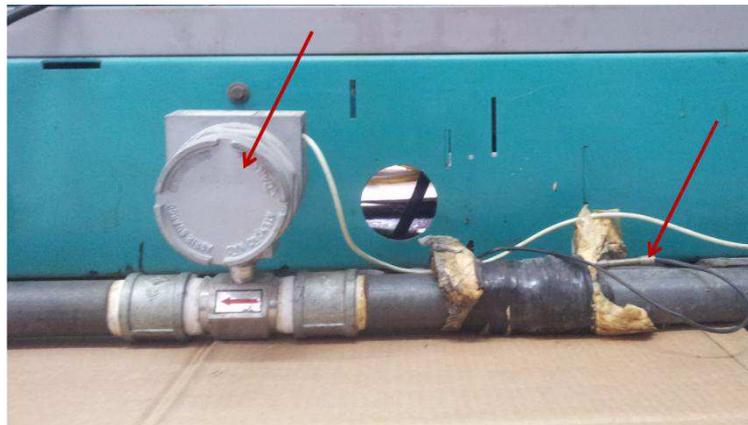


Figura 3.14 - Medidores de vazão e temperatura do GNV.

g) Sistema de armazenagem de gás natural

O sistema de armazenagem de gás natural é composto por um conjunto de 10 cilindros com 26 m³ cada um, totalizando uma capacidade máxima de 260 m³ de GNV, suficiente para a realização de um dia de experimento em plena carga. Para a realização de um novo experimento, o sistema deverá ser reabastecido. Para o reabastecimento, o reboque com os cilindros é engatado em um veículo que o leva até o posto de abastecimento, onde os cilindros são abastecidos, retornando, em seguida, para o laboratório.

A Figura 3.15 ilustra o conjunto dos 10 cilindros acondicionados sobre um reboque, construído essencialmente para esse fim, bem como suas conexões de interligações feitas em tubos de aço e o cabeçote confeccionado em aço inoxidável, com a válvula de abastecimento e o registro para controle de saída do gás. Todo o sistema foi montado seguindo as normas de segurança especificadas para o armazenamento, a locomoção e a distribuição de GNV (Gás Natural Veicular).



Figura 3.15 - Reboque com os 10 cilindros do sistema de armazenagem de gás.

A unidade redutora de pressão encontra-se instalada no interior da sala de ensaios, onde está localizado o grupo gerador, composto por berço, alternador e motor. A conexão do sistema de armazenamento de gás ao sistema de redução de pressão é feita por uma mangueira flexível especial, semelhante à que é utilizada nos postos de abastecimento, sendo engatada com rosca fixa ao sistema de redução de pressão e por um engate rápido no cabeçote do sistema de armazenamento.

O sistema de redução de pressão foi construído com dois kits de válvulas interligadas em paralelo para se conseguir a vazão de gás necessária à alimentação do motor, tendo em vista que apenas uma era insuficiente. Esse sistema é composto por duas válvulas redutoras de pressão em cinco níveis ou degraus, sistema de troca térmica (GNV e água quente em contrafluxo), válvula de feche rápido e manômetros.

O sistema de troca térmica tem sua temperatura ajustada de forma manual, através do acionamento de uma válvula agulha por onde flui a água quente do motor para o sistema. O conjunto é apresentado na Figura 3.16. O GNV entra a uma pressão de aproximadamente 220 bar nas válvulas reguladoras de pressão e vazão que atuam em vários degraus de redução, até que a pressão de entrada seja reduzida a aproximadamente 0,02 bar na saída do sistema de redução de pressão, ou seja, na segunda câmara de expansão, que serve para minimizar a variação do fluxo de gás entre os cilindros e o sistema que alimenta o motor. O gás sai do

sistema de redução de pressão, passa pela válvula de feche rápido, continua pela válvula de controle de alimentação para o kit gás e vai até o motor.



Figura 3.16 - Sistema de redução de pressão do GNV.

h) Unidade de controle de mistura ar-gás para o motor (kit gás eletrônico)

Esse sistema controla o fluxo de gás para o motor em função de parâmetros como a temperatura dos gases de escapamento e a pressão no coletor de admissão. É constituído de uma central eletrônica, que recebe as informações de temperatura e pressão e, em função destas, envia sinal para a válvula controladora de fluxo, que dosa a mistura ar-gás natural fornecida ao motor, por intermédio do deslocamento de um disco em cima de um furo, através de um motor de passo que controla a vazão do gás fornecida ao motor em função dos parâmetros analisados. A Figura 3.17 mostra o sistema montado, onde se destacam a central eletrônica, a válvula controladora do fluxo de GNV para o motor, a eletroválvula que promove a abertura e o fechamento da alimentação do gás para o kit, bem como um registro para regulagem do limite máximo de Caudal, responsável pelo limite máximo de gás disponibilizado ao kit.

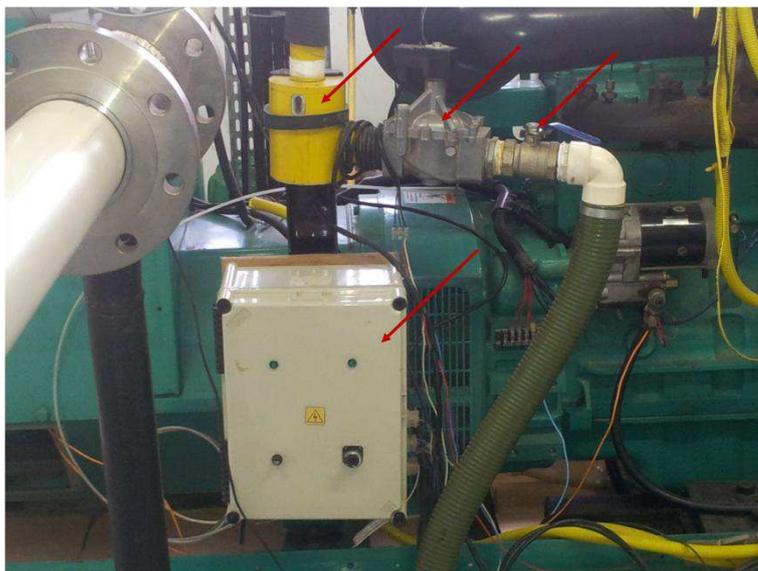


Figura 3.17 - Controle de mistura ar-gás para o motor (kit gás).

i) Sistema de análise dos gases de escape

Com o objetivo de se avaliar a emissão de poluentes do motor operando em condições previamente estabelecidas, foi adquirido um analisador de gases fabricado por Kane International Limited, modelo Kane 940, com as especificações técnicas mostradas na Tabela 3.9, juntamente com uma sonda para coleta de gases no sistema de descarga do motor em tempo real. A Figura 3.18 mostra a unidade de análise e armazenamento dos dados de gases de combustão.



Figura 3.18 - Analisador de gases.

Na Figura 3.19, vê-se a sonda do analisador de gases, que se encontra instalada na tubulação de escapamento do motor, onde os gases são captados para análise. As especificações técnicas do analisador estão representadas a seguir, na Tabela 3.7.



Figura 3.19 - Sonda do analisador de gases instalada.

Tabela 3.7- Especificações técnicas do analisador de gases.

Parâmetro	Escala	Resolução	Precisão
Temperatura	0-600°C	1,0°C	$\pm 2,0^\circ\text{C} \pm 0.3\%$ Valor medido
CO	0 - 10.000 ppm	1 ppm	± 20 ppm <400 ppm $\pm 5\%$ da leitura <5000 ppm ppm $\pm 10\%$ da leitura >2000 ppm
CO ₂	0 - 99,9%	0,1%	$\pm 0,3\%$ Valor medido
NO	0 - 5.000 ppm	1 ppm	± 5 ppm < 100 ppm $\pm 5\%$ da leitura > 100 ppm
NO ₂	0 - 1.000 ppm	1 ppm	± 5 ppm < 100 ppm $\pm 5\%$ da leitura > 500 ppm
SO ₂	0 - 5.000 ppm	1 ppm	± 5 ppm < 100 ppm $\pm 5\%$ da leitura > 100 ppm
Pressão	± 150 mbar	0,01 mbar	$\pm 0,2\%$ fundo da escala
Perdas	0 - 99,9%	0,1%	$\pm 1\%$ da Leitura
Eficiência de queima	0 - 99,9%	0,1%	$\pm 1\%$ da Leitura
Excesso de Ar	0 - 2885%	0,1%	$\pm 0,2\%$ da Leitura
Índice de Toxidade	0 - 99,9%	0,01%	$\pm 0,01\%$ da Leitura
Oxigênio	0 - 21%	0,1%	$\pm 0,2\%$ da Leitura

Fonte: <http://www.kane.co.uk>

3.2.3 Modelagem matemática

3.2.3.1 Considerações sobre o problema analisado

Considerou-se, na análise deste sistema, que o combustível entra no motor operando em regime permanente com uma vazão mássica de combustível (\dot{m}_c) e é misturado com uma quantidade de ar (\dot{m}_a). Tanto o ar quanto o combustível têm variações de energia cinética e potencial desprezíveis. O combustível entra no motor à temperatura (T_c) e à pressão (P_c), enquanto o ar entra no motor com a temperatura T_a e à pressão P_a . A mistura queima completamente e os produtos da combustão deixam o motor à temperatura (T_p) e à pressão (P_p) com o fluxo de massa. O motor desenvolve uma potência (\dot{W}) e transfere uma quantidade de calor (\dot{Q}) para o ambiente. Todas as trocas de energia entre o óleo/água com a carcaça do motor e o ar com o turbocompressor e o aftercooler estão contidas internamente no volume de controle que envolve o motor; portanto, seus efeitos estão contidos no (\dot{Q}).

A modelagem apresentada neste trabalho usou como referência as pesquisas desenvolvidas por Costa et al. (2012), Costa (2007), Canakci et al. (2006) e Kotas (1985). A Figura 3.20 ilustra esquematicamente o problema a ser resolvido.

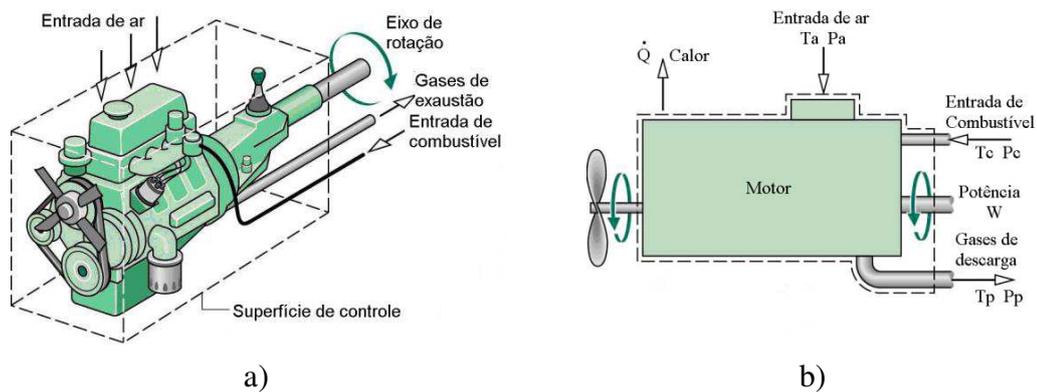


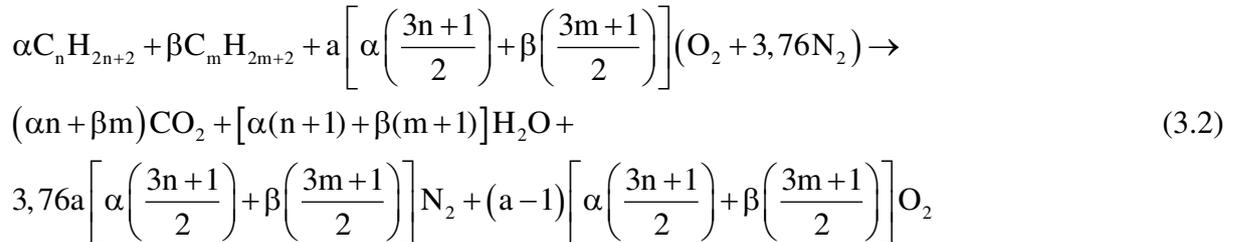
Figura 3.20 - Esquema do motor analisado.

Fonte: Moran e Shapiro (2008).

3.2.3.2 A mistura ar-combustível

Para determinar a razão ar-combustível (AC), considere a seguinte equação da combustão completa de dois hidrocarbonetos CH_{2n+2} e C_mH_{2m+2} , com α e β moles,

respectivamente, e com \underline{a} de ar teórico. Nesta análise, supõe-se o N_2 inerte e o ar totalmente seco (umidade absoluta = 0 kg de água / kg de ar seco). Sendo assim, pode-se escrever:



A razão ar-combustível em base mássica é dada por:

$$AC = \overline{AC} \frac{M_{ar}}{M_c} \quad (3.3)$$

onde M_{ar} é a massa molecular do ar, M_c é a massa molecular do combustível e \overline{AC} é a razão ar-combustível na base molar, que representa o número de moles do ar dividido pelo número de moles do combustível.

3.2.3.3 Análise energética de um motor de combustão interna operando com as misturas de diesel/biodiesel e gás natural

➤ Equação para a massa (balanço estequiométrico)

O volume de controle pode ser compreendido como uma região do espaço ou imaginária, na qual há fluxo de massa. Região delimitada, previamente definida, por uma fronteira que envolve o volume de controle que é denominada superfície de controle. O tamanho e a forma do volume de controle são definidos de modo que sejam os mais convenientes para o estudo do problema em análise. A superfície pode ser fixa ou móvel; entretanto, deve ser determinada em relação a algum sistema de coordenadas.

A massa, assim como o calor e trabalho, pode atravessar a superfície de controle. A massa contida no volume de controle, bem como suas propriedades, pode variar no tempo. Neste caso, a lei da conservação da massa relacionada a um volume de controle em regime permanente pode ser escrita como segue:

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \quad (3.4)$$

que pode ser escrita para um motor dual que funciona com diesel, biodiesel e gás como:

$$\dot{m}_{db} + \dot{m}_g + \dot{m}_{ar} = \dot{m}_p \quad (3.5)$$

Onde \dot{m}_{db} é o fluxo de massa da mistura (diesel e biodiesel); \dot{m}_g é o fluxo de massa de gás; \dot{m}_{ar} é o fluxo de massa de ar; \dot{m}_p é o fluxo de massa de produto ou, ainda, em termos do número de moles, pode-se escrever a equação 3.4 como segue:

$$\sum_i M_e \dot{n}_e = \sum_i M_s \dot{n}_s \quad n_{ps} \quad (3.6)$$

Partindo-se da equação (3.5) e após algumas manipulações algébricas, chega-se à seguinte equação química:

$$\begin{aligned} & n_{db} \left(y_{C_{12}H_{26}} C_{12}H_{26} + y_s S + y_{C_{18,74}H_{34,43}O_2} C_{18,74}H_{34,43}O_2 \right)_{db} + \\ & + n_g (y_{CH_4} CH_4 + y_{C_2H_6} C_2H_6 + y_{C_3H_8} C_3H_8 + y_{C_4H_{10}} C_4H_{10} + \\ & + y_{N_2} N_2 + y_{CO_2} CO_2 + y_{O_2} O_2)_g + n_{O_2} (O_2 + 3,76N_2 + 7,655wH_2O) = \\ & = n_{ps} (y_{CO_2} CO_2 + y_{CO} CO + y_{N_2} N_2 + y_{NO_2} NO_2 + y_{SO_2} SO_2 + \\ & + y_{CH_4} CH_4 + y_{O_2} O_2)_p + n_{H_2O} H_2O \end{aligned} \quad (3.7)$$

onde n_{db} , n_g , n_{O_2} , n_{ps} e n_{H_2O} são os números de moles da mistura diesel/biodiesel, gás, oxigênio, produtos secos e vapor de água. Vale salientar que o biodiesel foi considerado um componente do diesel para fins de simplificação da modelagem, uma vez que foi misturado ao diesel de forma bastante homogênea.

A composição química dos combustíveis (frações molares) usados neste trabalho está reportada nas Tabelas 3.2, 3.3 e 3.4. Os combustíveis são queimados, fornecendo produtos de combustão cuja composição a seco em base molar é obtida pelo analisador de gases (y_{CO_2} , y_{CO} , y_{NO} , y_{NO_2} , y_{O_2} , y_{CH} e y_{SO_2}). A fração molar do N_2 foi obtida por diferença, como segue:

$$y_{N_2} = \left(1 - \sum_{i=7}^7 y_i \right) \quad (3.8)$$

Na equação (3.7), n_{ps} e n_g foram calculados a partir dos fluxos mássicos do diesel/biodiesel e gás, determinados a partir da vazão volumétrica destes combustíveis, obtidos experimentalmente.

O número de moles de um componente ou mistura é dado por:

$$n = \frac{m}{M} \quad (3.9)$$

Para uma substância (ou mistura) constituída de vários componentes, a massa molecular é dada por:

$$M = \sum_i y_i M_i \quad (3.10)$$

onde y_i e M_i são as frações molares e a massa molecular de cada componente da mistura.

A umidade absoluta relaciona-se com a umidade relativa do ar como segue:

$$w = 0,622 \left[\frac{\phi P_{vs}}{P - \phi P_{vs}} \right] \quad (3.11)$$

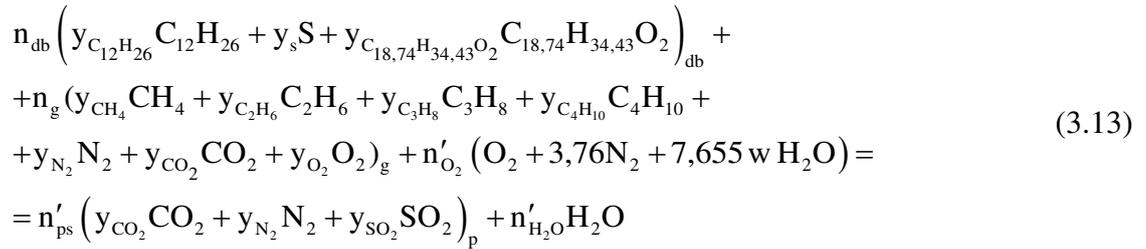
onde P_{vs} é a pressão de vapor saturado a uma dada temperatura (que pode ser obtida através de equações matemáticas ou de tabelas termodinâmicas, reportadas na literatura) e ϕ é a umidade relativa.

Os demais parâmetros contidos na equação (3.7) são obtidos realizando-se o balanço de massa entre os reagentes e produtos.

Neste trabalho, a razão/combustível foi determinada como segue:

$$AC = \frac{\dot{m}_{ar}}{\dot{m}_c} \quad (3.12)$$

Para se ter conhecimento do excesso de ar, considera-se a equação para a combustão completa da mistura combustível com a quantidade de ar teórica, como segue:



Partindo-se da equação (3.13) balanceada, determina-se a razão ar/combustível teórica (\overline{AC}'). Relacionando-a com (\overline{AC}) obtido da equação (3.7), também balanceada, obtém-se o excesso de ar conforme apresentado na equação seguinte:

$$\% \text{ excesso de ar} = \left[\frac{\overline{AC}}{\overline{AC}'} - 1 \right] \times 100 \tag{3.14}$$

Já que a água é formada na queima dos combustíveis hidrocarbonados, a fração molar do vapor d'água nos produtos gasosos da combustão pode ser significativa. Se os produtos gasosos da combustão forem resfriados a uma pressão de mistura constante, a temperatura de ponto de orvalho pode ser atingida quando a água começa a se condensar. Como a água depositada no coletor de descarga, silencioso e outras partes metálicas pode causar corrosão, o conhecimento da temperatura de ponto de orvalho é importante. Desse modo, de acordo com a equação química balanceada, a fração molar do vapor d'água y_{vp} é:

$$y_{vp} = \frac{n_{H_2O}}{n_{ps} \left(\sum_j y_j \right)_{\text{Produtos secos}} + n_{H_2O}} = \frac{n_{H_2O}}{n_p} \tag{3.15}$$

onde n_p é o número de moles total.

Por outro lado, a pressão parcial do vapor d'água nos produtos da combustão é dada por:

$$P_{vp} = y_{vp} P_p \tag{3.16}$$

Daí, conhecendo-se P_{vp} , obtém-se T_p a partir das tabelas termodinâmicas. A temperatura T_p é a temperatura de saturação a uma pressão P_{vp} , que também é a temperatura de ponto de orvalho.

➤ Equação da energia

De acordo com a equação da expressão geral da primeira lei da termodinâmica, o balanço de energia para o sistema reagente em regime permanente quando as energias cinética e potencial são consideradas desprezíveis, a equação pode ser escrita da seguinte forma:

$$\dot{Q}_{vc} + \sum \dot{m}_e h_e = \sum \dot{m}_s h_s + \dot{W}_{vc} \quad (3.17)$$

que pode ser escrita para o motor dual como:

$$\dot{Q} + \dot{H}_d + \dot{H}_g + \dot{H}_{ar\ úmido} = \dot{H}_p + \dot{W} \quad (3.18)$$

onde: $\dot{H} = \dot{m}h$

Considerando-se o balanço de energia com base na combinação das equações (3.10) e (3.18), obtêm-se as entalpias expressas por mol de combustível da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \dot{Q} + \dot{n}_d \left(\sum y_i M_i h_i \right)_d + \dot{n}_g \left(\sum y_i M_i h_i \right)_g + \left(\sum y_i M_i h_i \right)_{ar\ úmido} = \\ = \dot{n}_p \left(\sum y_i M_i h_i \right)_{produtos\ secos} + \left(\sum y_i M_i h_i \right)_{vapor\ de\ água} + \dot{W} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Numa forma mais detalhada, a equação (3.19) será:

$$\begin{aligned} \dot{Q} + \dot{n}_d (y_{C_{12}H_{26}} M_{C_{12}H_{26}} h_{C_{12}H_{26}} + y_s M_s h_s + \\ + y_{C_{18,74}H_{34,43}O_2} C_{18,74}H_{34,43}O_2 h_{C_{18,74}H_{34,43}O_2})_{diesel} + \\ + \dot{n}_g (y_{CH_4} M_{CH_4} h_{CH_4} + y_{C_2H_6} M_{C_2H_6} h_{C_2H_6} + y_{C_3H_8} M_{C_3H_8} h_{C_3H_8} \\ + y_{C_4H_{10}} M_{C_4H_{10}} h_{C_4H_{10}} + y_{N_2} M_{N_2} h_{N_2} + y_{CO_2} M_{CO_2} h_{CO_2} + y_{O_2} M_{O_2} h_{O_2})_{gás} + \\ + \dot{n}_{O_2} (M_{O_2} h_{O_2} + 3,76 M_{N_2} h_{N_2} + 7,655 w M_{H_2O} h_{H_2O})_{ar\ úmido} = \\ = \dot{n}_p (y_{CO_2} M_{CO_2} h_{CO_2} + y_{CO} M_{CO} h_{CO} + y_{N_2} M_{N_2} h_{N_2} + \\ + y_{NO} M_{NO} h_{NO} + y_{NO_2} M_{NO_2} h_{NO_2} + y_{SO_2} M_{SO_2} h_{SO_2} + y_{CH_4} M_{CH_4} h_{CH_4} + \\ + y_{O_2} M_{O_2} h_{O_2})_{produtos\ secos} + \left(\dot{n}_{H_2O} M_{H_2O} h_{H_2O} \right)_{vapor\ d'água} + \dot{W} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Na base molar, pode-se escrever a equação (3.19) como segue:

$$\begin{aligned} \dot{Q} + \dot{n}_d \left(\sum_{i=1}^{\hat{i}} y_i \bar{h}_i \right)_d + \dot{n}_g \left(\sum_{j=1}^{\hat{j}} y_j \bar{h}_j \right)_g + \dot{n}_{O_2} \left[\bar{h}_{O_2} + 3,76 \bar{h}_{N_2} + 7,655 w \bar{h}_{H_2O} \right] = \\ \dot{n}_p \left(\sum_{k=1}^{\hat{k}} y_k \bar{h}_k \right)_{\text{Produtos secos}} + \dot{n}_{H_2O} \bar{h}_{H_2O} + \dot{W} \end{aligned} \quad (3.21)$$

A entalpia específica de um composto em um estado que não o estado-padrão é determinada pela variação de entalpia específica ($\bar{\Delta h}$) entre o estado-padrão e o estado de interesse mais a entalpia de formação, conforme mostra a equação (3.22).

$$\bar{h} = \bar{h}_f^o + \bar{\Delta h} \quad (3.22)$$

Nesta equação, a entalpia \bar{h}_f^o está associada à formação do composto a partir de seus elementos e $\bar{\Delta h}$ está relacionada a uma variação de estado em uma composição constante.

A entalpia de formação é obtida a partir de tabelas termodinâmicas ou softwares apropriados; já $\bar{\Delta h}$ pode ser determinado a partir das entalpias dos componentes obtidas diretamente das tabelas ou softwares ou da definição de calor específico, como segue:

$$\bar{\Delta h} = \int_{T_{ref}}^T \bar{c}_p \Delta T \quad (3.23)$$

onde $\bar{c}_p = M c_p$

As seguintes equações para o calor específico à pressão constante de vários gases perfeitos são conhecidas (Van Wyley e Sonntag, 1976; Incropera e DeWitt, 2002; Naterer, 2003):

$$N_2 \quad \bar{c}_p = 39,060 - 512,79\theta^{-1,5} + 1072,7\theta^{-2} - 820,40\theta^{-3} \quad \text{kJ/kmol K} \quad (3.24a)$$

$$O_2 \quad \bar{c}_p = 37,432 + 0,02010\theta^{1,5} - 178,57\theta^{-1,5} + 236,88\theta^{-2} \quad \text{kJ/kmol K} \quad (3.24b)$$

kJ/kmol K

$$\text{CO} \quad \bar{c}_p = 69,145 - 0,704630^{0,75} - 200,770^{-0,5} + 176,760^{-0,75} \text{ kJ/kmol K} \quad (3.24c)$$

$$\text{H}_2\text{O} \quad \bar{c}_p = 143,05 - 183,540^{0,25} + 82,7510^{0,5} - 3,69890 \text{ kJ/kmol K} \quad (3.24d)$$

$$\text{CO}_2 \quad \bar{c}_p = -3,7357 + 30,5290^{0,5} - 4,10340 + 0,0241980^2 \text{ kJ/kmol K} \quad (3.24e)$$

$$\text{CH}_4 \quad \bar{c}_p = -672,87 + 439,740^{0,25} - 24,8750^{0,75} + 323,880^{-0,5} \text{ kJ/kmol K} \quad (3.24f)$$

$$\text{C}_2\text{H}_6 \quad \bar{c}_p = -6,895 + 17,260 - 0,6402\theta^2 + 0,00728\theta^3 \text{ kJ/kmol K} \quad (3.24g)$$

$$\text{C}_3\text{H}_8 \quad \bar{c}_p = -4,042 + 30,460 - 1,5710^2 + 0,031170^3 \text{ kJ/kmol K} \quad (3.24h)$$

$$\text{C}_4\text{H}_{10} \quad \bar{c}_p = 3,954 + 37,120 - 1,8330^2 + 0,034980^3 \text{ kJ/kmol K} \quad (3.24i)$$

$$\text{NO} \quad \bar{c}_p = 59,283 - 1,70960^{0,5} - 70,6130^{-0,5} + 74,8890^{-1,5} \text{ kJ/kmol K} \quad (3.24j)$$

$$\text{NO}_2 \quad \bar{c}_p = 46,045 + 216,100^{-0,5} - 363,660^{-0,75} + 232,55000^{-2} \text{ kJ/kmol K} \quad (3.24k)$$

$$\text{C}_{12}\text{H}_{26} \quad c_p = 2,21 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \Rightarrow \bar{c}_p = c_p M_{\text{C}_{12}\text{H}_{26}} = 2,21 \times 170,328 = 373,42 \text{ kJ/kmol K} \quad (3.24l)$$

$$\text{S} \quad c_p = 0,708 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \Rightarrow \bar{c}_p = c_p M_s = 22,65 \text{ kJ/kmol K} \quad (3.24m)$$

$$\text{SO}_2 \quad \bar{c}_p = (3,267 + \frac{5,324}{10^3} T + \frac{0,685}{10^6} T^2 - \frac{5,281}{10^9} T^3 + \frac{2,559}{10^{12}} T^4) R \text{ kJ/kmol} \quad (3.24n)$$

$$\text{C}_{18,74}\text{H}_{34,43}\text{O}_2 \quad c_p = 2,08 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \Rightarrow \bar{c}_p = c_p M_{\text{C}_{18,74}\text{H}_{34,73}\text{O}_2} = 2,075 \times 291,77 = 606,88 \text{ kJ/kmol} \quad (3.24o)$$

onde $R = 8,314 \text{ kJ/kmolK}$ e θ é $T/100$.

Para o biodiesel, considerou-se o valor do calor específico (c_p) igual a 2,075, dada a dificuldade de sua disponibilidade na literatura, como sendo a média aritmética do menor e do maior valor entre os óleos mais leves e pesados encontrados na literatura, que são 1,95 e 2,20 kJ/kg°C, respectivamente. Essas informações foram obtidas da certificação digital nº 0210215/CA da PUC-Rio.

A Tabela 3.8 apresenta os valores da entalpia de formação dos reagentes e produtos.

Tabela 3.8 - Valores de entalpia de formação dos reagentes e produtos da combustão.

Componente	Entalpia de formação \bar{h}_f° (kJ/kmol)
CH ₄	-74850
C ₂ H ₆	-84680
C ₃ H ₈	-103850
C ₄ H ₁₀	-126150
C ₁₂ H ₂₆	-352540
C _{18,74} H _{34,43} O ₂	-636770,4
CO	-110530
CO ₂	-393520
H ₂ O(g)	-241820
N ₂	0
O ₂	0
S	0
NO	90592
NO ₂	33723
SO ₂	-296922

Fonte: Moran e Shapiro (2008); Van Wylen e Sontag (1993); Canakci et al. (2006)

A eficiência energética do motor em análise é obtida como segue:

$$\eta_t = \frac{\dot{W}}{\dot{n}_d \left[\sum_{i=1}^{\hat{n}} (y_i M_i PCI_i) \right]_d + \dot{n}_g \left[\sum_{j=1}^{\hat{m}} (y_j M_j PCI_j) \right]_g} \quad (3.25)$$

A eficiência de um processo de combustão é definida como a razão entre a quantidade de calor liberada durante a combustão e o poder calorífico do combustível queimado. Ela é dada por:

$$\eta_c = \frac{|\dot{Q}| + |\dot{W}|}{\dot{n}_d \left[\sum_{i=1}^{\hat{i}} (y_i M_i \text{PCI}_i) \right]_d + \dot{n}_g \left[\sum_{j=1}^{\hat{j}} (y_j M_j \text{PCI}_j) \right]_g} \quad (3.26)$$

O poder calorífico inferior dos combustíveis utilizados (diesel/biodiesel e gás natural) foi determinado por:

$$\text{PCI}_{\text{gás ou diesel}} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{\hat{i}} y_i \text{PCI}_i}{\sum_{i=1}^{\hat{i}} y_i} \right) \quad (3.27)$$

onde o índice i refere-se ao componente do combustível (gás ou diesel) e \hat{i} , ao número de componentes. A Tabela 3.9 apresenta os valores dos PCIs de vários componentes presentes nos combustíveis.

Tabela 3.9 - Poder calorífico inferior de alguns componentes a 25°C e 1 atm.

Componente	PCI (kJ/kg)
CH ₄	50020,00
C ₂ H ₆	47480,00
C ₃ H ₈	46360,00
C ₄ H ₁₀	45720,00
C ₁₂ H ₂₆	44143,18
C _{18,74} H _{34,43} O ₂	37388,00
CO ₂	0
N ₂	0
O ₂	0
S	9259,00

Fonte: Moran e Shapiro (2000); Canakci et al.(2006)

➤ Equações de exergia

Em muitas aplicações, o meio de trabalho consiste em uma mistura de gases ideais, por exemplo, combustíveis gasosos, produtos da combustão, etc. Quando um combustível hidrocarbonado C_aH_b ou outra substância é um componente de uma mistura de gases ideais no estado-padrão (T₀, P₀) e o coeficiente de atividade igual à unidade, o combustível hidrocarbonado ou substância está no estado (T₀, y_i P₀). Nesse caso, a exergia química do combustível ou substância é dada por:

$$\bar{x}_i^{qui}(T_0, y_i, P_0) = \bar{x}_i(T_0, P_0) + \bar{R}T_0 \ln(\mu_i y_i) \quad \text{com } \mu_i = 1 \quad (3.28)$$

onde y_i é a fração molar do componente i de combustível hidrocarbonado na mistura.

Para uma ampla gama de aplicações de engenharia, a conveniência de utilizar valores padronizados geralmente compensa a pequena falta de precisão que tal procedimento pode trazer. Particularmente, o efeito de pequenas variações nos valores de T_0 e P_0 em torno de seus valores padrões podem ser desprezados.

Para o diesel (duodecano e enxofre), considerou-se:

$$\bar{x}_i^{qui} = \bar{x}_i^o \quad (3.29)$$

A Tabela 3.10 apresenta os valores da exergia química para cada um dos componentes do gás natural e do diesel, bem como dos gases de exaustão.

Nas condições ambientais, a exergia termodinâmica é nula. Então, a exergia total para um combustível é justamente a exergia química dada por:

$$X_{\text{biodiesel, diesel ou gás}}^{qui} = \frac{\bar{x}_{\text{biodiesel, diesel ou gás}}^{qui}}{M_{\text{biodiesel, diesel ou gás}}} = \left[\sum_{i=1}^n y_i \bar{x}_i^{qui} \right] M_{\text{biodiesel, diesel ou gás}} \quad (3.30)$$

Tabela 3.10 - Exergia química padrão dos componentes dos combustíveis e gases de exaustão a $T_0=298$ K e $P_0=1$ atm.

Componente	Exergia química padrão \bar{x}^o (kJ/kmol)
CH ₄	836510
C ₂ H ₆	1504360
C ₃ H ₈	2163190
C ₄ H ₁₀	2818930
N ₂	720
CO ₂	20140
O ₂	3970
C ₁₂ H ₂₆	8059340
S	598850
CO	275430
NO	89040
NO ₂	56220
SO ₂	303500
H ₂ O	3120

Fonte: Kotas (1985)

O desempenho de dispositivos cujo propósito é a realização de trabalho pode ser avaliado como a razão do trabalho real desenvolvido pelo trabalho máximo teórico. Essa razão é um tipo de eficiência exergética (eficiência pela Segunda Lei da Termodinâmica). A relativamente baixa eficiência exergética apresentada por muitos dispositivos produtores de potência sugere a possibilidade de maneiras termodinamicamente mais econômicas da utilização de combustível para a produção de potência. No entanto, esforços nessa direção devem ser abrandados por imperativos econômicos que governam as aplicações práticas de todos os dispositivos. O compromisso entre redução do consumo de combustível e custos adicionais necessários para atingir tais reduções deve ser cuidadosamente pensado.

Para obtenção da eficiência exergética de um motor, um balanço de exergia deve ser utilizado. Em regime permanente, a taxa pela qual a exergia entra no motor é igual à taxa pela qual a exergia sai acrescentada da taxa pela qual a exergia é destruída no interior do motor. O ar para combustão entra na condição ambiente e, conseqüentemente, com um valor nulo de exergia; apenas o combustível fornece exergia ao motor. A exergia sai do motor acompanhando o calor e o trabalho, com os gases da combustão. Se a potência do motor é tomada como o produto do motor e as transferências de calor, juntamente com os gases produzidos na saída, são vistas como perdas, uma expressão para a eficiência exergética, ε , que mede o quanto de exergia na entrada do motor, é convertida em produtos da forma:

$$\varepsilon = \frac{\dot{W}_{vc}}{\dot{X}_c} \quad (3.31)$$

onde \dot{X}_c significa a taxa pela qual a exergia entra com o combustível e é dada por:

$$\dot{X}_c = \dot{n}_{db} \left(\sum_{i=1}^{\hat{i}} y_i \bar{x}_i \right)_{db} + \dot{n}_g \left(\sum_{j=1}^{\hat{j}} y_j \bar{x}_j \right)_g \quad (3.32)$$

Dispositivos projetados para realizar trabalho utilizando um processo de combustão como motor de combustão interna invariavelmente possuem irreversibilidades e perdas associadas às suas operações. Conseqüentemente, dispositivos reais produzem trabalho, que é apenas uma fração do valor máximo teórico que poderia ser obtido em circunstâncias idealizadas.

Para determinação da exergia química dos gases de exaustão, utilizam-se as equações 3.28 e 3.30 e a fração molar dos componentes obtidos experimentalmente.

As exergias química, térmica e total dos gases de exaustão, exergia do calor e exergia destruída são dadas por:

$$\dot{X}_{\text{quim}} = \dot{n}_p \sum_{i=1}^{\hat{i}} y_i \bar{x}_i + \dot{n}_{\text{H}_2\text{O}} \bar{x}_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{quim}} \quad (3.33)$$

$$\dot{X}_{\text{Term}} = \dot{n}_p \sum_{k=1}^{\hat{k}} y_k M_k [(h_{\hat{k}} - h_{k0}) - T_0 (s_{\hat{k}} - s_{k0})] + \dot{n}_{\text{H}_2\text{O}} [(h_{\text{H}_2\text{O}} - h_{\text{H}_2\text{O}0}) - T_0 (s_{\text{H}_2\text{O}} - s_{\text{H}_2\text{O}0})] \quad (3.34)$$

$$\dot{X}_{\text{gases}} = \dot{X}_{\text{term}} + \dot{X}_{\text{quim}} \quad (3.35)$$

$$\dot{X}_{\text{calor}} = (1 - T_0/T_m) \dot{Q} \quad (3.36)$$

$$\dot{X}_{\text{trabalho}} = \dot{W} \quad (3.37)$$

$$\dot{X}_{\text{destruída}} = \dot{X}_{\text{total}} - \dot{X}_{\text{gases}} - \dot{X}_{\text{trabalho}} - \dot{X}_{\text{calor}} \quad (3.38)$$

Nestas equações, as entropias são obtidas na pressão parcial de cada um dos componentes na mistura. Considerou-se, ainda, $T_m = 313,15 \text{ K}$.

➤ Equações para emissão de poluentes

A taxa de emissão de poluentes [i] por unidade de potência gerada é dada por:

$$\text{Taxa de emissão [i]} = \frac{\hat{y}_i \dot{m}_p}{\dot{W}} \quad (\text{g / kWh}) \quad (3.39)$$

onde $\dot{m}_p = (\dot{m}_{\text{ar}} + \dot{m}_{\text{g}} + \dot{m}_{\text{d}})$ é a massa dos produtos da combustão e \hat{y}_i é a fração molar do componente i em base mássica.

Para obter-se \hat{y}_i em base mássica, utilizou-se a seguinte equação:

$$\hat{y}_i = \frac{y_i M_i}{\sum_{i=1}^n y_i M_i} \quad (3.40)$$

onde y_i é a fração molar do componente i .

Cada um desses procedimentos de cálculo engloba equações algébricas sem maiores complexidades, que podem ser implementadas em softwares específicos para resolução de problemas termodinâmicos. Devido à sua simplicidade e flexibilidade para este fim, optou-se pelo uso do software EES (Engineering Equation Solver). O EES é um software capaz de executar solução numérica de conjunto de equações algébricas, equações diferenciais e integrais e é também capaz de realizar regressão linear e não linear, entre outras operações. Ele possui pacotes de funções usadas em termodinâmica, com propriedades psicrométricas de utilidade para engenharia, tabelas de vapor e de propriedades de diversos fluidos, tais como amônia, metano e dióxido de carbono, entre outros.

O software Grapher, poderosa ferramenta para execução de gráficos em 2D e 3D, com a flexibilidade de se poder fazer ajuste de curvas de dados experimentais, também foi utilizado para produzir os gráficos a partir dos dados experimentais e dos teóricos, auxiliando nas discussões e conclusões do trabalho.

Definido o modelo e para otimizar o processo de análise, foi desenvolvido um código computacional no ambiente EES, para simular os efeitos de várias variáveis de entrada, tais como fluxos mássicos de combustível e ar, temperatura e potência produzida, no desempenho do motor e na perda de calor para a vizinhança.

A Figura 3.21 apresenta um fluxograma do código matemático desenvolvido.

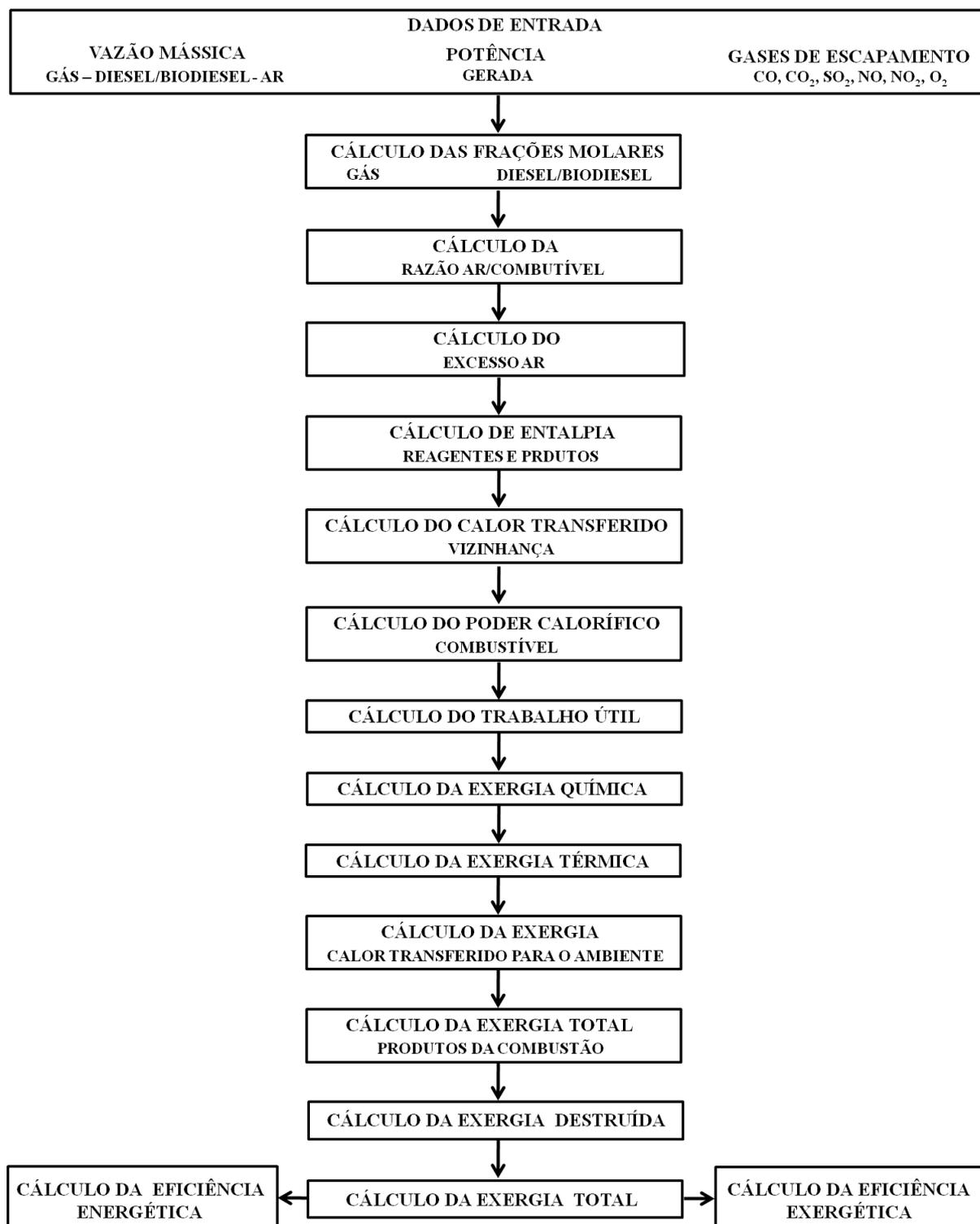


Figura 3.21 - Fluxograma do código computacional desenvolvido.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados Experimentais

4.1.1 Análise dos combustíveis B5 e B100

Os resultados das análises realizadas com os combustíveis biodiesel puro (B100) e diesel comercial (B5) encontram-se nos apêndices e são apresentados nas Tabela 4.1 e Tabela 4.2, respectivamente.

Tabela 4.1 - Resultado das análises do combustível biodiesel puro (B100) de algodão.

Biodiesel puro (B100)					
Ensaio	Unidade	Resultado	Especificação	Limite de quantificação	Método
Massa Específica (T Ambiente, 30°C)	kg/m ³	875	--	800	NBR7148
Massa Específica a 20°C	kg/m ³	881,4	850 - 900	807	NBR7148
50% Destilado	°C	301	--	35	NBR9619
85% Destilado	°C	320	--	35	NBR9619
Destilação ponto final	°C	327	--	35	NBR9619
Ponto de fulgor	°C	>110	Mín. 100,0	28	NBR14598
Enxofre total	mg/kg	< 25	Max. 50	25	NBR6577
Cinzas	% massa/massa	< 0,02	0,020	0,02	NBR6294

Fonte: Qualitex Engenharia e Serviços Ltda.

Tabela 4.2 - Resultado das análises do combustível diesel padrão (B5).

Ensaio	Unidade	Resultado	Especificação	Limite de quantificação	Método
Massa Específica (T. Ambiente, 30°C)	kg/m ³	833,5	--	800	NBR7148
Massa Específica a 20°C	kg/m ³	840,2	820 - 880	807	NBR7148
50% Destilado	°C	284	245 - 310	35	NBR9619
85% Destilado	°C	343	Máx. 370	35	NBR9619
Destilação ponto final	°C	367	--	35	NBR9619
Ponto de fulgor	°C	49	Mín. 38,0	28	ASTM65/ NBR7974
Enxofre total	mg/kg	560	Max. 2000	25	ASTM429 4
Cinzas	%massa/ massa	0,05	Max. 0,010	0,02	NBR9842

Fonte: Qualitex Engenharia e Serviços Ltda.

Os resultados das análises determinadas pelo laboratório Qualitex Engenharia e Serviços Ltda., tanto do diesel quanto do biodiesel, encontram-se dentro dos padrões exigidos pela ANP.

As emissões resultantes da combustão dos motores diesel, tais como materiais particulados, os óxidos de nitrogênio, o dióxido de enxofre e o dióxido de carbono afetam diretamente o meio ambiente, provocando mudanças climáticas, e as condições de vida do ser humano, propiciando o surgimento de doenças nos sistemas respiratório e nervoso, além de problemas de pele. Os experimentos realizados representam alto custo, necessitam de muito tempo para execução e são, de certa forma, complexos. Os resultados determinados das emissões, do consumo de combustível e gás, da vazão de ar, da performance, da temperatura e da pressão do motor operando apenas com combustível diesel e no modo dual são apresentados e discutidos.

4.1.2 Análise de consumo e custo específicos dos combustíveis

a) Análise do consumo específico

Foram realizados experimentos com combustível diesel, tal qual é distribuído pelos postos de combustíveis para uso direto em veículos pesados ou utilitários, definido aqui como

Diesel Padrão (B5). Os resultados dos experimentos servirão para posterior comparação das emissões, quando o motor operar com esse combustível e no modo dual.

Vários testes foram realizados em dias diferentes e verificou-se que os resultados apresentaram-se coerentes com a literatura pesquisada (Costa, 2007; Mansour, 2001).

A Figura 4.1 representa o comportamento do consumo específico do diesel padrão (B5) quando o motor operou com potências que variaram de 40 a 120 kW, com intervalo de 20 kW entre uma potência e outra.

O consumo específico foi calculado dividindo-se o consumo horário de diesel (B5) pela potência. Os resultados encontrados foram compatíveis com os relatados na literatura, ou seja, elevado consumo nas baixas potências, tendendo a se estabilizar em torno de 240 g/kWh.

Segundo a pesquisa desenvolvida por Costa (2007), para baixas potências tem-se um elevado consumo; em alta potência, esse valor ficou em torno de 230 g/kWh.

A potência representada no eixo horizontal corresponde à potência elétrica instantânea gerada e injetada na rede elétrica da UFCG; portanto, incluem-se as perdas provenientes entre o gerador elétrico e o acoplamento mecânico.

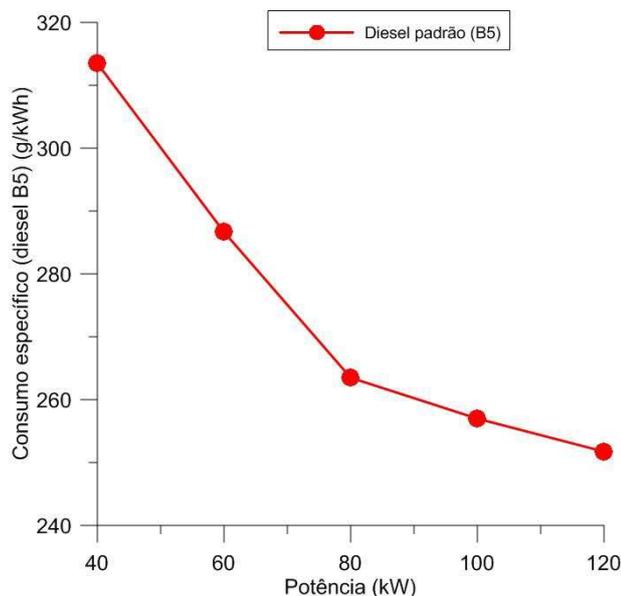


Figura 4.1 - Consumo específico do diesel comercial B5, em função da potência do motor a 1800 rpm.

Para determinar a massa do combustível, procedeu-se da seguinte forma: adotou-se um consumo de 300 gramas de combustível na potência de 40 kW, 400 gramas nas potências de 60 e 80 kW e 600 gramas nas potências de 100 e 120 kW. Num determinado instante em que o motor encontrava-se trabalhando e numa determinada potência (40 kW por exemplo), o cronômetro foi acionado e, após o motor consumir 300 gramas de combustível (por exemplo), este foi parado e verificou-se o tempo. Tendo-se a massa de combustível consumido e o tempo, foi determinado o consumo horário (kg/h) de combustível. Os resultados podem verificados no Apêndice A-5.

O consumo específico das misturas diesel/biodiesel foi calculado seguindo o mesmo procedimento do cálculo realizado para o diesel comercial B5 (apêndices A-1 a A-4). Conforme pode ser verificado na Figura 4.2, dentre as curvas apresentadas, a mistura que revelou melhor desempenho, ou seja, menor consumo específico, foi a B90.

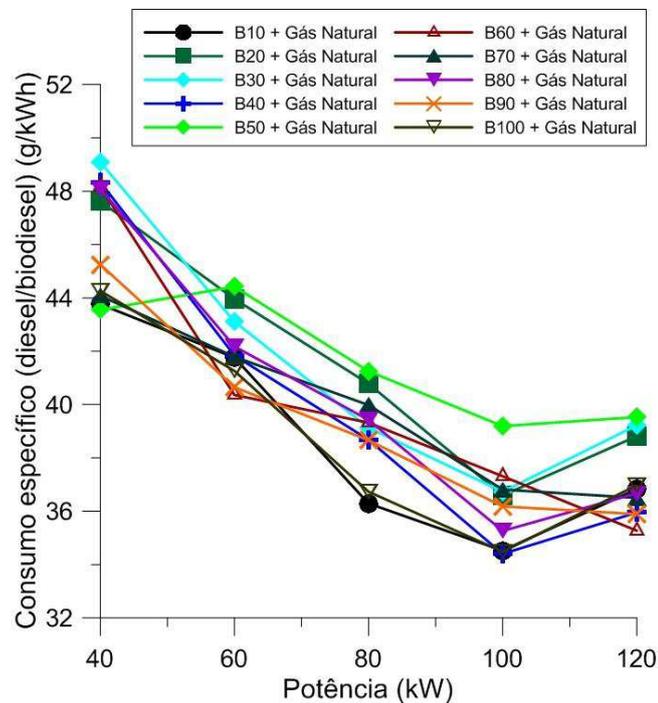


Figura 4.2 - Consumo específico das misturas diesel/biodiesel em função da potência do motor a 1800 rpm.

Apesar de, na potência de 40 kW, a mistura B90 apresentar um consumo específico inferior às misturas B20, B50 e B70, ao longo das potências intermediárias e nas maiores

potências (100 e 120 kW) apresentou melhor desempenho que as demais misturas, o que significa comportamento similar ao combustível diesel comercial B5, elevado na baixa potência e tendendo a um menor consumo específico na potência mais elevada.

A Figura 4.3 representa o consumo específico do gás natural, que, de forma semelhante aos demais consumos específicos diesel/biodiesel apresentados anteriormente, tanto para o combustível diesel quanto para as misturas, também apresentou comportamento semelhante, ou seja, elevado consumo específico em baixa potência, diminuindo esse consumo com o aumento da potência, tendendo a estabilizar nas potências elevadas.

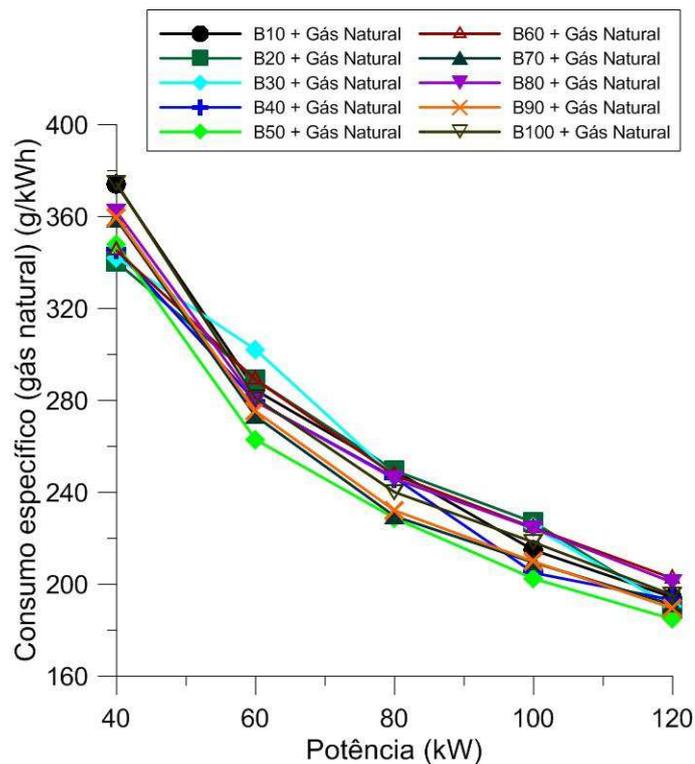


Figura 4.3 - Consumo específico do gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.

Encontra-se representado na Figura 4.4 o consumo específico das misturas diesel/biodiesel mais gás natural. Para efetuar o cálculo do consumo específico nesta situação, somou-se a massa da mistura diesel/biodiesel à massa do gás natural em gramas por hora e dividiu-se pelas respectivas potências (40 a 120 kW).

Conforme apresenta a figura, a mistura B50 + gás natural foi o combustível que melhor comportamento apresentou dentre todas as misturas, ou seja, menor consumo específico.

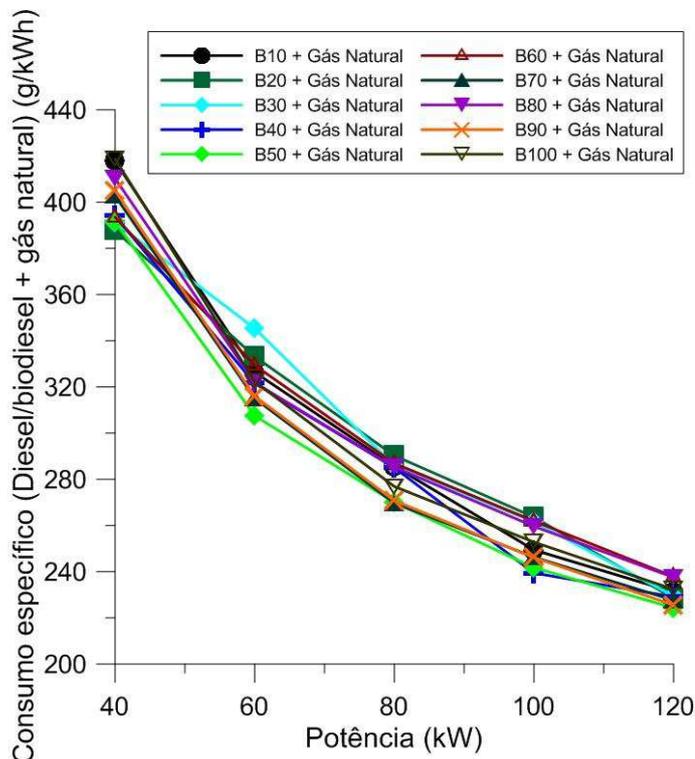


Figura 4.4 - Consumo específico da mistura combustível em função da potência do motor a 1800 rpm.

b) Análise do custo específico

Analisou-se o custo comparativo para recomendar o melhor combustível a ser utilizado em motores do ciclo diesel. A análise foi realizada para o consumo horário de combustível, no preço de R\$ 2,32/litro de diesel, R\$ 1,81/m³ de gás natural e R\$ 2,4391/litro de biodiesel, onde a cotação do dólar era de 1 US\$ = R\$ 2,0225, no dia 23/04/2013.

Verificou-se o custo da parcela de cada combustível (diesel, biodiesel e gás natural) em cada mistura de B10 a B100. O detalhamento dos cálculos está especificado no apêndice D1.

A Figura 4.5 mostra o custo específico em função da potência gerada, para diferentes misturas, comparado ao combustível original, diesel comercial B5. Como pode ser observado,

a geração termoelétrica utilizando motores diesel com dois combustíveis (líquido e gás) é perfeitamente viável. Nota-se que o custo da geração de energia elétrica com misturas diesel, biodiesel e gás natural apresenta maior economia que o diesel comercial B5, nas potências mais elevadas, a partir de 80 kW, chegando à máxima economia com o motor operando na potência de 120 kW.

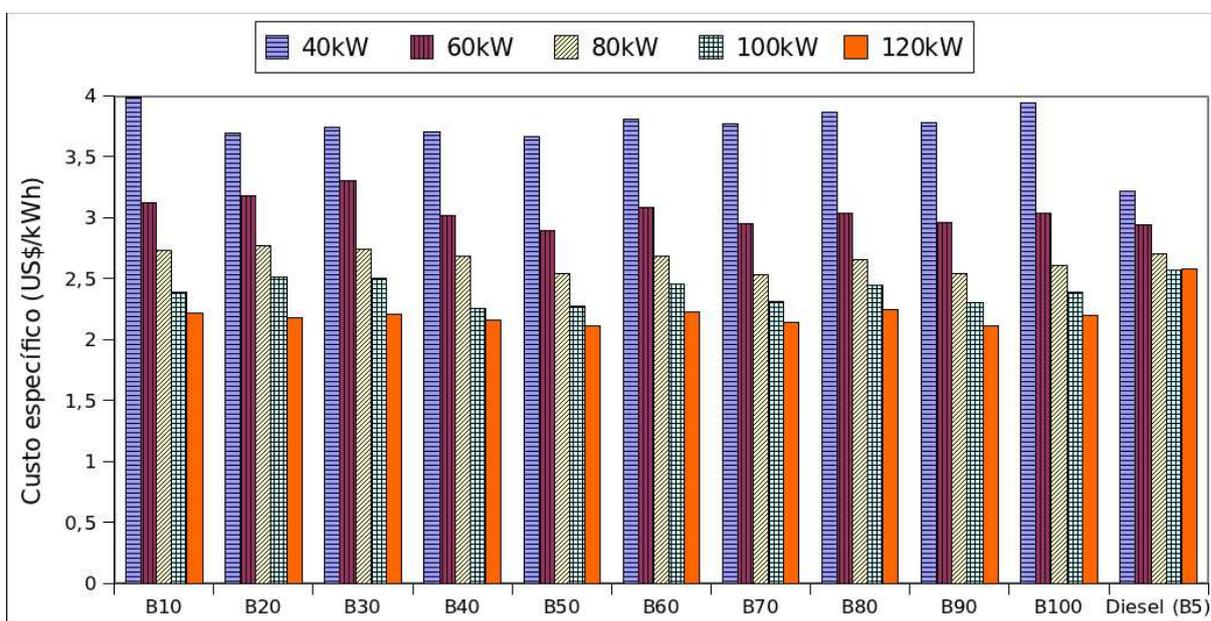


Figura 4.5 – Custo específico do combustível em função da potência do motor a 1800 rpm.

4.1.3 Análise do desempenho do motor

4.1.3.1 Variação da taxa de substituição

Quando um motor diesel opera com mais de um combustível, além do diesel, diz-se que esse motor está trabalhando no modo dual, assim a parcela do combustível diesel que é substituída pelo novo combustível é chamada de taxa de substituição.

Utilizou-se, durante o processo de execução dos experimentos, uma taxa de substituição de aproximadamente 85%. O combustível líquido empregado foi uma mistura de diesel e biodiesel, tendo a mistura líquida sofrido uma variação de B10 a B90 e um experimento tendo sido realizado com biodiesel puro (B100) e gás natural.

Segundo Costa et al. (2012), Costa (2007) e Uma et al.(2004), a taxa de substituição pode ser calculada da seguinte forma:

$$\text{Taxa de substituição (\%)} = (\dot{m}_d - \dot{m}_{db}) / \dot{m}_d \times 100$$

onde \dot{m}_d é a vazão mássica de diesel quando o motor opera com diesel puro e \dot{m}_{db} é a vazão mássica de diesel/biodiesel quando o motor opera de forma dual.

Foram obtidas curvas para taxas de substituição com as misturas de B10 e gás natural até B100 e gás natural, onde se buscou trabalhar com taxa de substituição o mais próximo possível de 85%, tanto pelo limite superior quanto inferior. As misturas intermediárias de biodiesel entre B10 e B100 variam em intervalos de 10 pontos percentuais. A Figura 4.6 representa o comportamento da taxa de substituição das misturas de B10 e gás natural a B100 e gás natural. Verifica-se, na Figura 4.6, que a maior taxa de substituição ocorreu na mistura B40, na potência de 40 kW, e a menor taxa de substituição foi obtida na mistura B30 e potência de 40 kW.

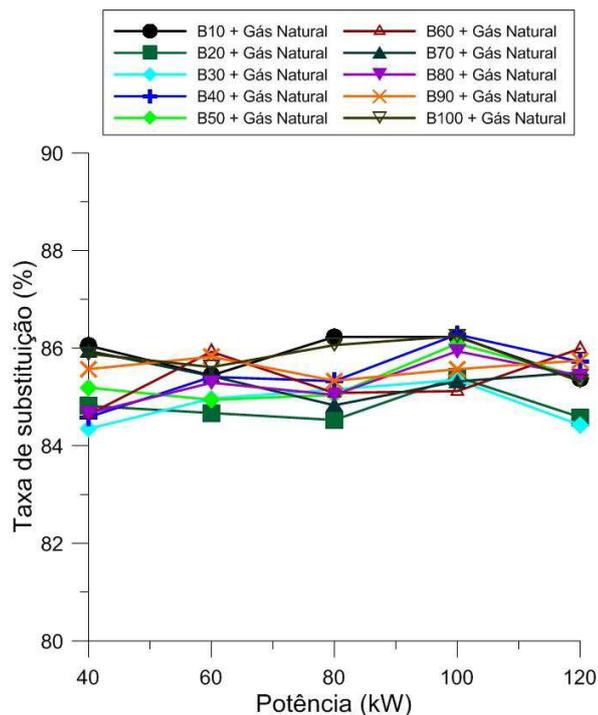


Figura 4.6 - Taxas de substituição de combustível diesel por gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.

4.1.3.2 Variação da rotação do motor em função da carga aplicada

A Figura 4.7 representa o comportamento da rotação do motor operando com um controlador eletrônico de rotação ou governador. Como o motor trabalha acoplado a um gerador e este, por sua vez, injeta a energia gerada na rede elétrica da UFCG, faz-se necessário que essa variação de rotação seja a mínima possível, tendo em vista que a energia elétrica gerada se dá a uma frequência de 60 Hz. Esses tipos de controladores destinam-se ao controle e à estabilização da rotação do motor. Assim, as alterações das variações de carga são corrigidas e minimizadas automaticamente. Em virtude da atuação do controlador sobre o sistema, já se esperava uma variação de mínima rotação nos resultados obtidos.

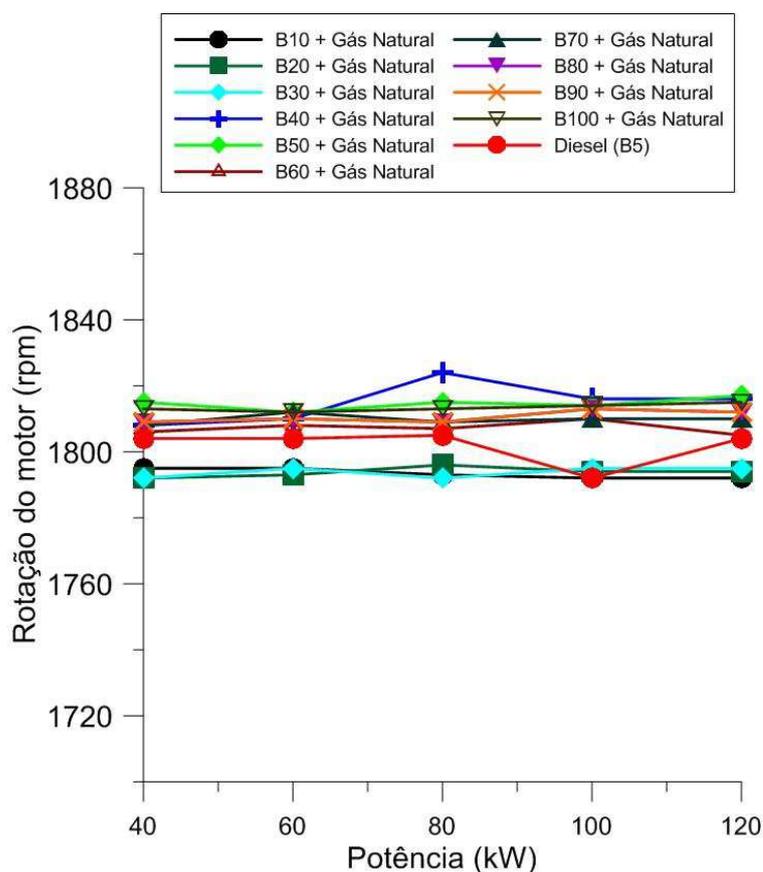


Figura 4.7 - Rotação do motor para diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural, em função da potência a 1800 rpm.

Verificou-se que, entre o intervalo trabalhado das potências de 40 e 120 kW, a maior variação de rotação em relação ao referencial de 1800 rpm foi 24 rpm para a mistura B40, na potência de 80 kW, e a menor foi de 8 rpm para a mistura B10, na potência de 120 kW, conforme representado na Figura 4.7.

4.1.3.3 Variação da vazão mássica em função da carga aplicada

a) Vazão mássica de ar em função da carga aplicada

Da Figura 4.8 até a Figura 4.11 estão mostrados os gráficos que representam o comportamento das vazões mássicas de ar de admissão do motor, gás natural, biodiesel e diesel, respectivamente. Pode-se observar que a massa de ar absorvida pelo motor teve vazão mínima de 820,07 kg/h para a mistura B60 e vazão máxima de 1163,68 kg/h para a mistura B50, enquanto para o diesel essa variação foi de 795,28 a 1284,67 kg/h, o que representa, aproximadamente, uma vez o volume de ar aspirado por um motor equivalente sem turbo compressor.

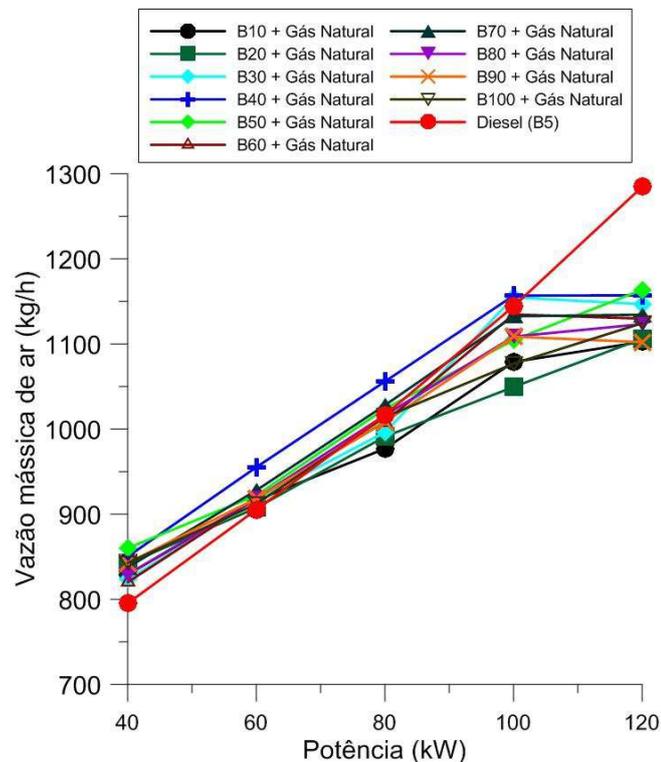


Figura 4.8 - Vazão mássica de ar para o diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.

Além disso, observa-se que a vazão mássica de ar aumenta com o aumento da potência do motor. Considerando que o compressor tem capacidade de suprir o motor com um excesso de ar considerável, tem-se, dessa forma, um melhor aproveitamento energético pelo motor, visto que o turbo compressor utiliza a energia dos gases de escapamento que seria descartada. Assim, a eficiência exergética do sistema é elevada.

Todo o procedimento para o cálculo da vazão mássica de ar para o diesel comercial B5 e as demais misturas está apresentado no apêndice C1.

b) Vazão mássica de gás natural em função da carga aplicada

As vazões de gás natural das misturas entre B10 e B100 basicamente apresentaram comportamentos similares, se analisadas nas mesmas potências, conforme podem ser verificadas as curvas das respectivas misturas.

Analisaram-se as variações das vazões mássicas de gás natural no intervalo das potências de 40 a 120 kW entre as misturas B10 a B100 e foi observado que todas as misturas apresentaram uma variação entre a máxima e a mínima vazão mássica, em torno de 11%. Portanto, conclui-se que isso contribui para um trabalho mais uniforme do motor, conforme pode ser verificado na Figura 4.9.

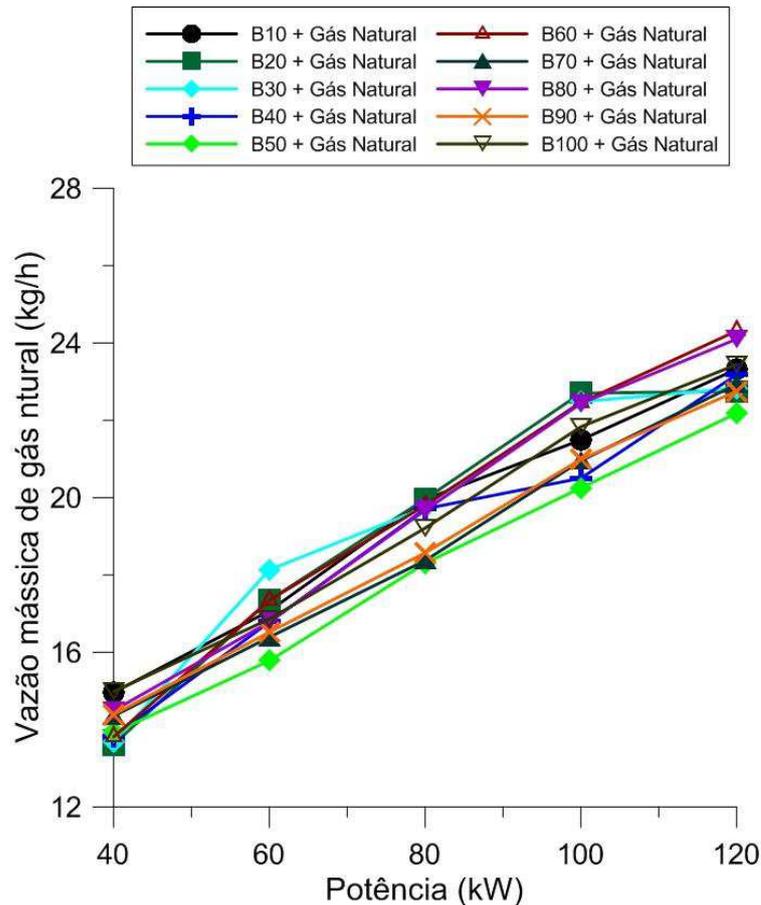


Figura 4.9 - Vazão mássica de gás natural para as misturas de biodiesel e gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.

c) Vazão mássica de biodiesel em função da carga aplicada

O consumo de biodiesel durante os experimentos teve uma regularidade muito boa. Na potência de 40 kW, a variação foi de 1,75 a 1,96 kg/h entre as misturas de B10 a B100, enquanto na potência de 120 kW a variação foi de 4,23 a 4,74 kg/h. Para as demais, nas potências entre 60 e 100 kW, essa variação ficou entre 1,81 e 4,31 kg/h, conforme pode ser verificado na Figura 4.10.

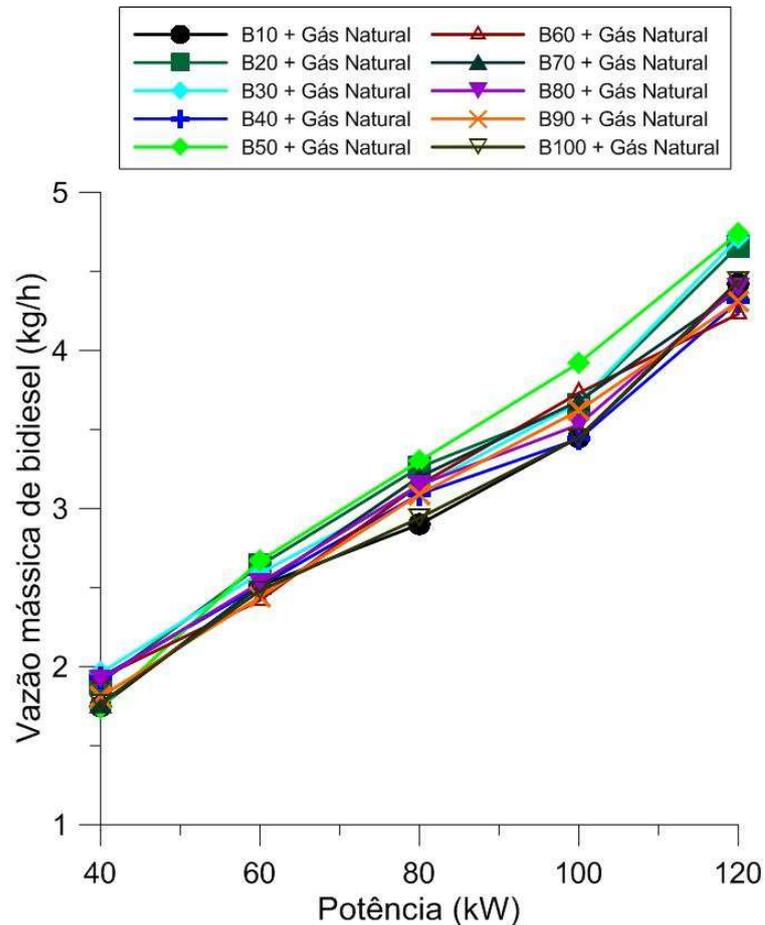


Figura 4.10 - Vazão mássica de biodiesel para as misturas de biodiesel e gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.

d) Vazão mássica de diesel comercial B5 em função da carga aplicada

A vazão mássica de diesel apresentou uma variação regular, quase linear, com o aumento da potência, ou seja, situação observada na literatura e que pode ser verificada em maior detalhe na Figura 4.11, variando de 12,51 a 29,59kg/h, quando a potência variou de 40 a 120 kW, respectivamente.

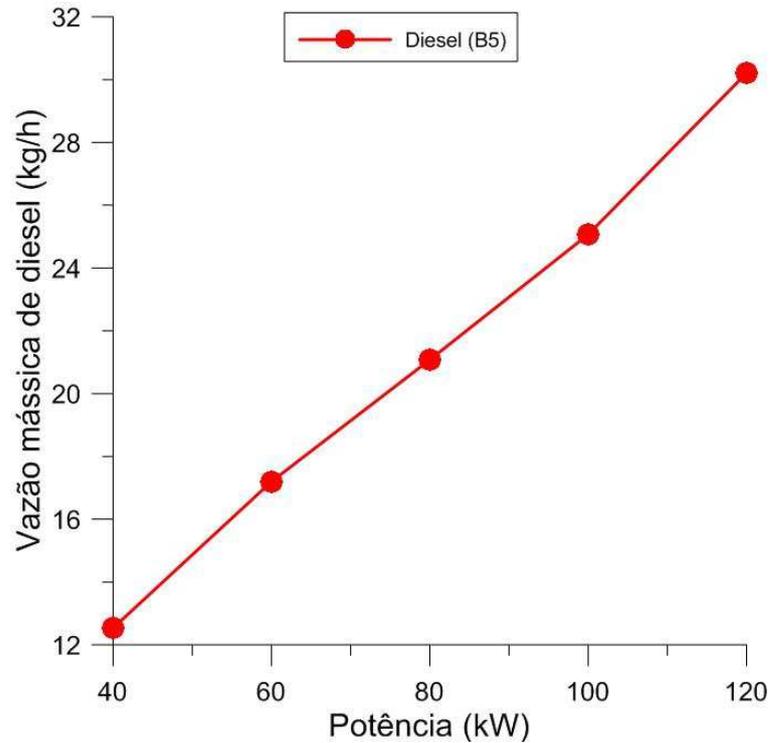


Figura 4.11 - Vazão mássica de diesel (B5) em função da potência do motor.

4.1.3.4) Variação da temperatura em função da carga aplicada ao motor

a) Temperatura da água na saída do motor

Segundo Brunetti (2012), a temperatura da água do motor deve ser mantida em torno de 90°C, em todos os regimes de trabalho. Manter o motor na temperatura ideal de funcionamento é tarefa realizada pela válvula termostática, situada entre a saída da água do motor no cabeçote e o radiador.

A operação do motor diesel no modo dual diminui a temperatura da água na saída do motor, principalmente nas potências mais elevadas, quando a vazão de gás é aumentada e sua temperatura é diminuída, tendo em vista que a temperatura do coletor diminui (Costa, 2007). A Figura 4.12 representa bem esta situação: vê-se que as misturas de biodiesel e gás natural apresentam temperaturas inferiores às do diesel comercial (B5) nas potências acima de 80 kW.

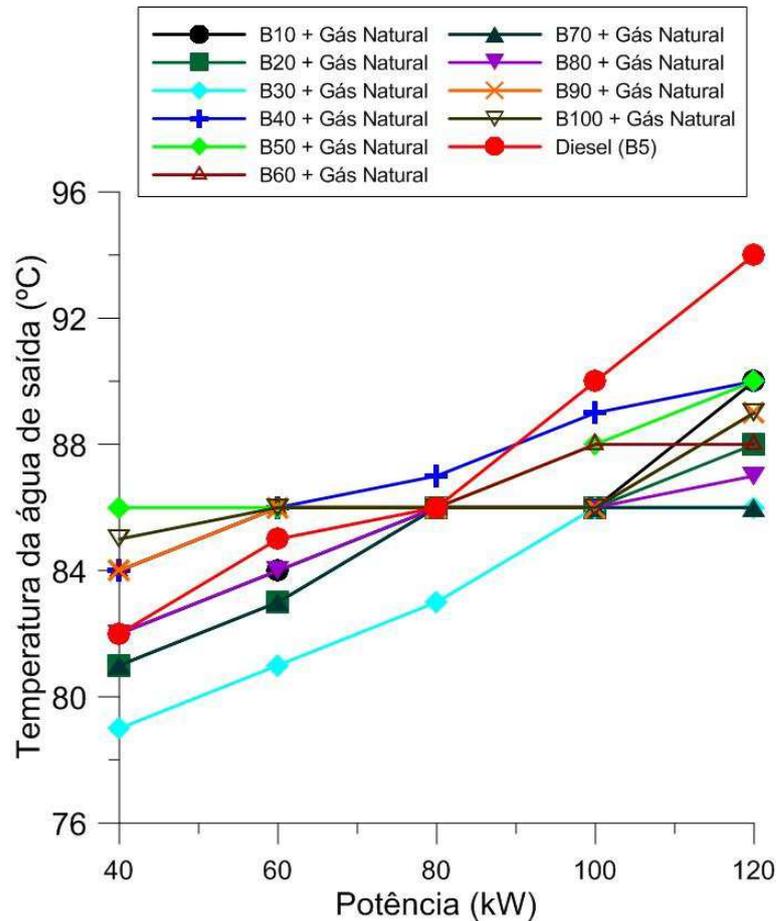


Figura 4.12 - Temperatura da água na saída do motor em função da potência do motor.

b) Temperatura do óleo lubrificante cárter do motor

A Figura 4.13 apresenta a temperatura do óleo lubrificante do motor para diesel comercial (B5) e as misturas de biodiesel e gás natural, nas potências variando de 40 a 120 kW. Observa-se que a mistura (B100 + GNV) apresenta as menores temperaturas em todas as potências do intervalo, o que significa a boa condição de operação do motor, enquanto as demais misturas de biodiesel e GNV apresentam temperaturas mais elevadas, mas não comprometem a boa condição de operação do motor.

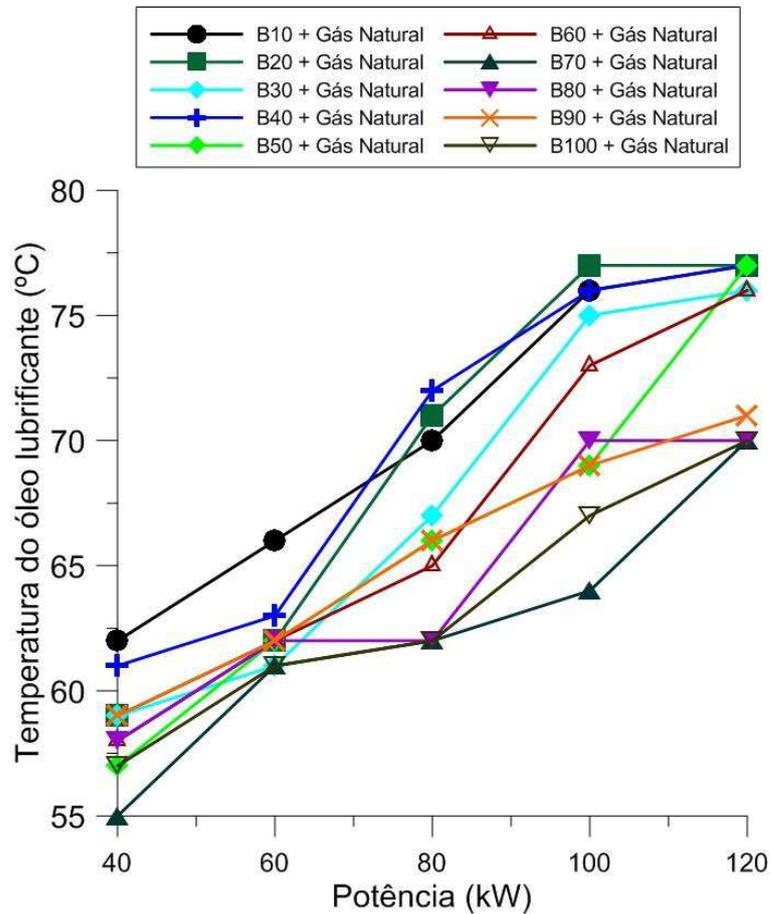


Figura 4.13 - Temperatura do óleo lubrificante em função da potência do motor a 1800 rpm.

c) Temperatura do ar de admissão do motor

Este sistema tem como função permitir e regular a admissão de ar no motor. Ar é de fundamental importância para o funcionamento do motor diesel, notadamente para a formação da mistura gasosa ar/combustível.

A Figura 4.14 representa o comportamento das misturas diesel comercial (B5) e das misturas (biodiesel + GNV) nas potências de 40 a 120 kW. Observa-se que algumas curvas já iniciam com temperatura elevada, mas tendem a se estabilizar nas potências mais elevadas. Deve-se esse fato à temperatura ambiente do dia ou do período da realização do experimento – à tarde, por exemplo.

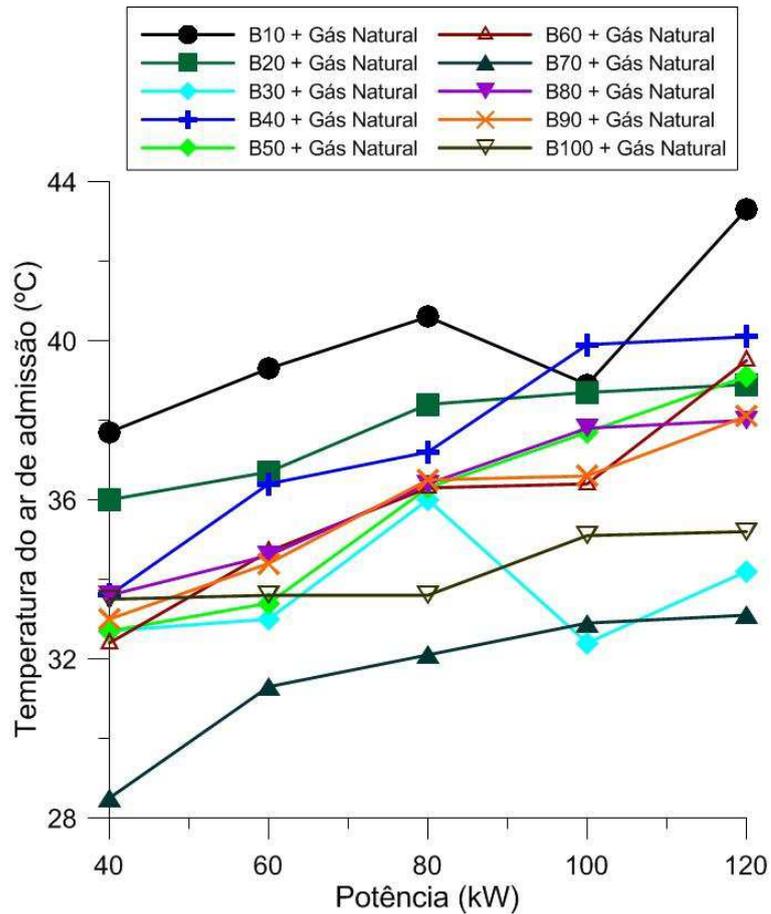


Figura 4.14 - Temperatura do ar de admissão do motor em função da potência do motor a 1800 rpm.

4.1.3.5 Pressão do ar de admissão

Na Figura 4.15 está representado o comportamento da pressão do ar de admissão para as misturas B10 a B100 e gás natural. Como se pode verificar, todas as misturas apresentam comportamentos similares, exceto para o diesel comercial B5 na potência de 120 kW, conforme mostra a figura.

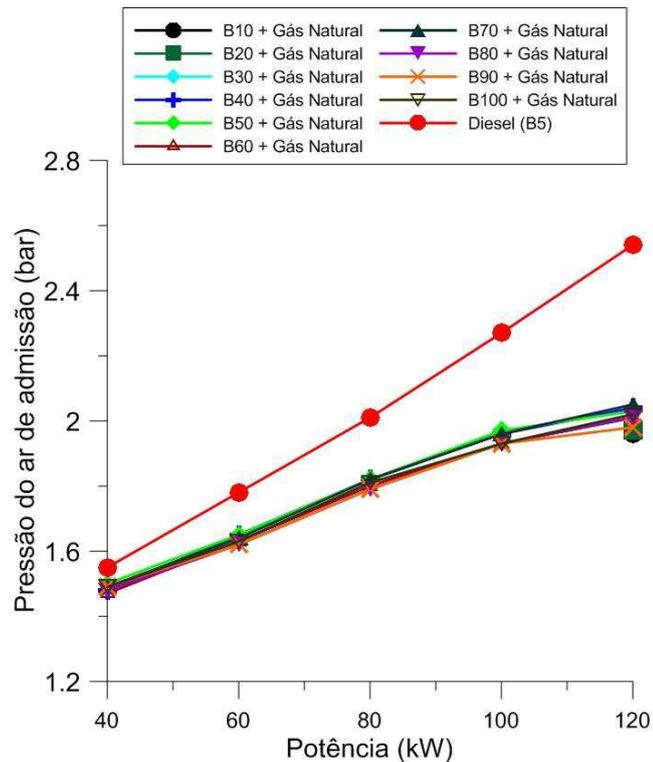


Figura 4.15 - Pressão do ar de admissão em função da potência do motor a 1800 rpm.

4.1.3.6 Eficiência de combustão

A eficiência de combustão mostrada na Figura 4.16 foi calculada pelo analisador de gás, conforme fórmula a seguir:

$$\eta_{\text{comb}} = 100\% - \text{DFGL}$$

onde $\text{DFGL} = 20,9 \times K_{1n} \times T_{\text{net}} / [K_2 \times (20,9 - \%O_2)]$, sendo T_{net} a temperatura líquida (diferença entre a temperatura de combustão e a temperatura de entrada no motor), $K_{1n} = 0,515$ e $K_2 = 15,51$, as constantes do analisador quando se utiliza óleo diesel como combustível, $K_{1n} = 0,393$ e $K_2 = 11,89$ quando se utiliza gás natural.

Verificou-se que a eficiência cresce com o aumento da potência. As misturas apresentam as mesmas características, inicialmente com qualidade inferior ao diesel; porém, na potência de 120 kW, as misturas passam a ter eficiências com qualidade superior à do diesel.

A Figura 4.16 representa a eficiência de combustão em função da potência.

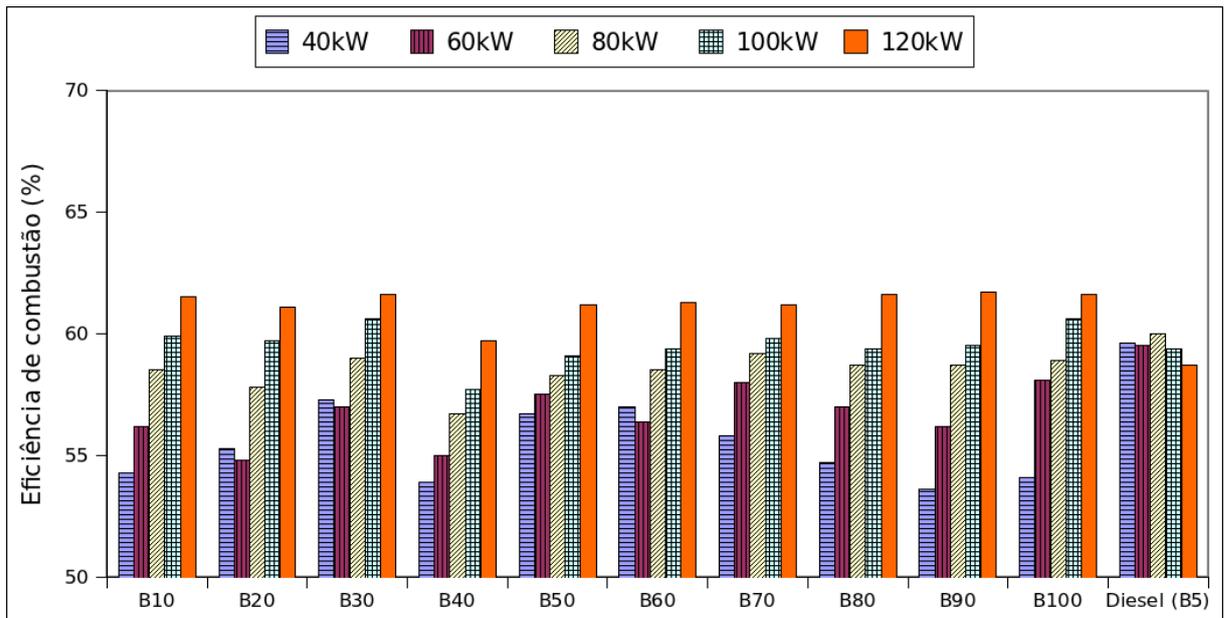


Figura 4.16 - Eficiência de combustão para os combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.

4.1.4 Análises da emissão de poluentes

a) Emissões de NO_x

Para analisar o desempenho de um motor do ciclo diesel operando com combustível dual foi utilizado um combustível composto de 85% de gás natural e 15% da mistura diesel e biodiesel. A mistura diesel/biodiesel variou de 10% a 100%, ou seja, de B10 a B100.

É senso comum entre os pesquisadores que uma das vantagens do biodiesel é a redução sensível das emissões de poluentes para a atmosfera, fato que não acontece com o óxido de nitrogênio.

Buscaram-se, na literatura, publicações entre 2005 e 2011 que informassem a respeito das emissões do NO_x provenientes do combustível biodiesel ou das misturas diesel/biodiesel quando utilizado em motores do ciclo diesel. Uma parcela considerável das bibliografias consultadas relataram que o uso do biodiesel causa um aumento nas emissões do NO_x (Xue et al., 2011; Zhu et al., 2010; Godiganur et al., 2010; Kim et al., 2010; Banapurmath et al., 2009; Hazar, 2009; Ozsezen et al., 2009; Karabektas, 2009; Lin et al., 2009; Sahoo et al., 2009;

Cheung et al., 2009; Wu et al., 2009; Ulusoy et al., 2009; Lin et al., 2009a; Bhale et al., 2009; Zheng et al., 2008; Ozgunay, 2007).

O NO_x é formado pela soma do óxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO_2). É um processo de formação complexa afetado por diferentes características do motor de combustão interna, tais como: projeto da câmara de combustão e sistema de alimentação de combustível e de ar (Sun, 2010).

Segundo Nabi (2009), normalmente as emissões do NO_x aumentam com o aumento do torque do motor. É um gás inerte até uma determinada temperatura (1100°C); acima desta, deixa de ser inerte e passa a participar da reação química da combustão. No final da combustão, a temperatura do gás no interior do cilindro fica em torno de 1500°C .

De acordo com Hazar (2009), a formação de NO_x nos motores de combustão interna geralmente acontece a altas temperaturas e depende, principalmente, da presença de O_2 e do tempo de exposição, rotação do motor, conteúdo, homogeneidade e da densidade da mistura na câmara de combustão, mas, fundamentalmente, da temperatura e de todos os fatores que contribuam para facilitar e acelerar a reação entre o oxigênio e o nitrogênio.

Segundo Benjumea (2011), um dos fatores que contribuem para aumentar o valor dos índices das emissões do óxido de nitrogênio é o grau de insaturação do biodiesel. Quanto maior o grau de insaturação, maior a redução da viscosidade e do número de cetano, o que tem como consequência pior qualidade do combustível.

Os pesquisadores Benjumea (2011), Refaat (2009) e Knothe (2005) relataram que o grau de insaturação de uma molécula de biodiesel é indicado pelo número de ligações duplas presentes em sua cadeia de ácidos graxos. Um maior número de ligações duplas representa um maior grau de insaturação.

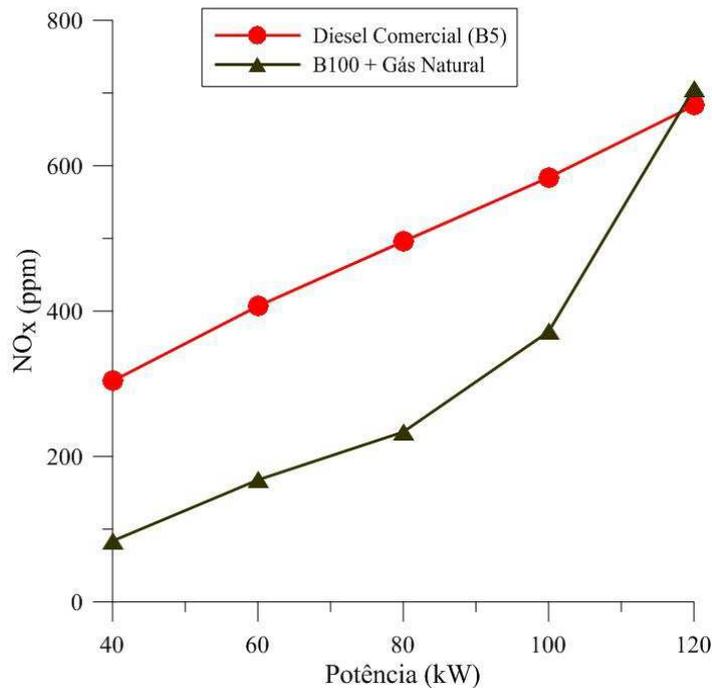


Figura 4.17 - Comparativo do NO_x para os combustíveis diesel comercial (B5) e B100 + gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.

As emissões de NO_x obtidas nos experimentos realizados no laboratório de termogeração da UFCG estão mostradas nas Figura 4.17 e Figura 4.18. Ao analisá-las, pode-se verificar:

- ✓ Em todas as misturas, as emissões do NO_x aumentaram com o aumento da potência, em acordo com a literatura;
- ✓ As emissões das misturas B30 e B50 mais gás natural apresentaram melhor comportamento em relação às demais misturas e, quando comparadas ao combustível diesel, essa diferença é ainda maior;
- ✓ As mistura B100 mais gás natural e diesel comercial (B5) equiparam-se na potência de 120 kW; porém, nas demais potências, a mistura apresentou melhores índices de emissões de NO_x quando comparada ao combustível diesel;
- ✓ Avaliaram-se as emissões do NO_x do diesel padrão comercial (B5) e da mistura do B100 mais gás natural e verificou-se que, apesar do relato de alguns pesquisadores de que o uso do biodiesel puro causa aumento nas emissões de

NO_x, percebeu-se, nos resultados obtidos nos experimentos do biodiesel puro mais o gás natural, que a combinação desses dois combustíveis reduz significativamente os índices dessas emissões. Isso significa que o gás teve uma contribuição importante na redução das emissões do NO_x.

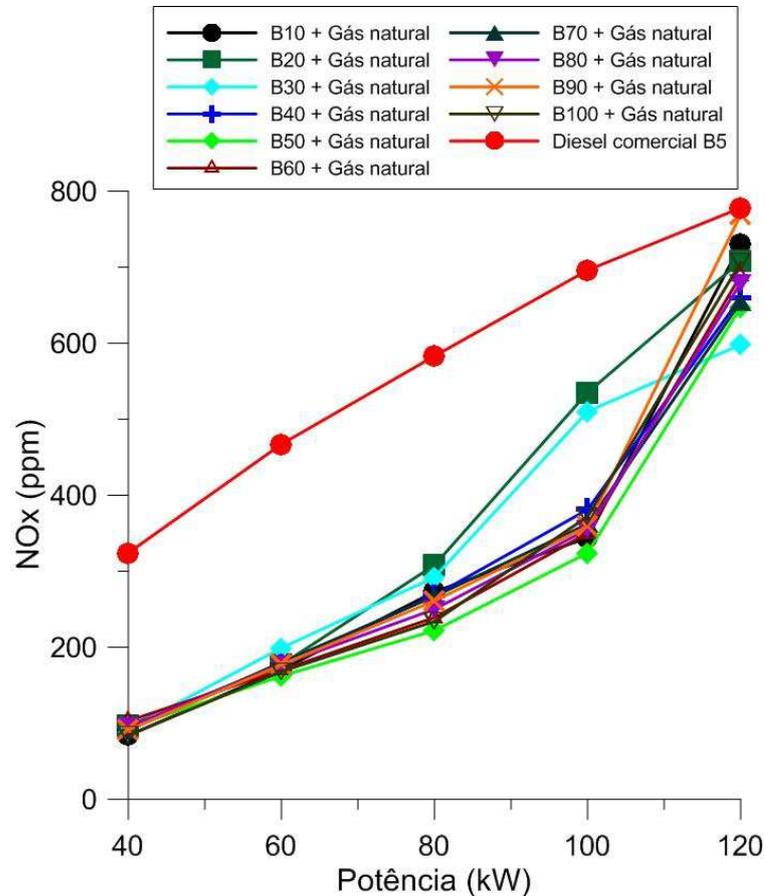


Figura 4.18 - Emissões de NO_x para os combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural em função da potência motor a 1800 rpm.

b) Emissões de NO

Na Figura 4.19, observa-se o aumento dos níveis das emissões de NO com o aumento da potência. Isso acontece devido a este composto ser dependente da temperatura na câmara de combustão. Em temperaturas elevadas, ocorre a seguinte formação de NO: ($N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$).

Todas as misturas diesel/biodiesel apresentaram emissões com comportamento de melhor qualidade que a do combustível diesel comercial (B5), exceto para a potência de 120 kW, onde as misturas B20 e B90 ultrapassaram os valores das emissões do diesel comercial (B5).

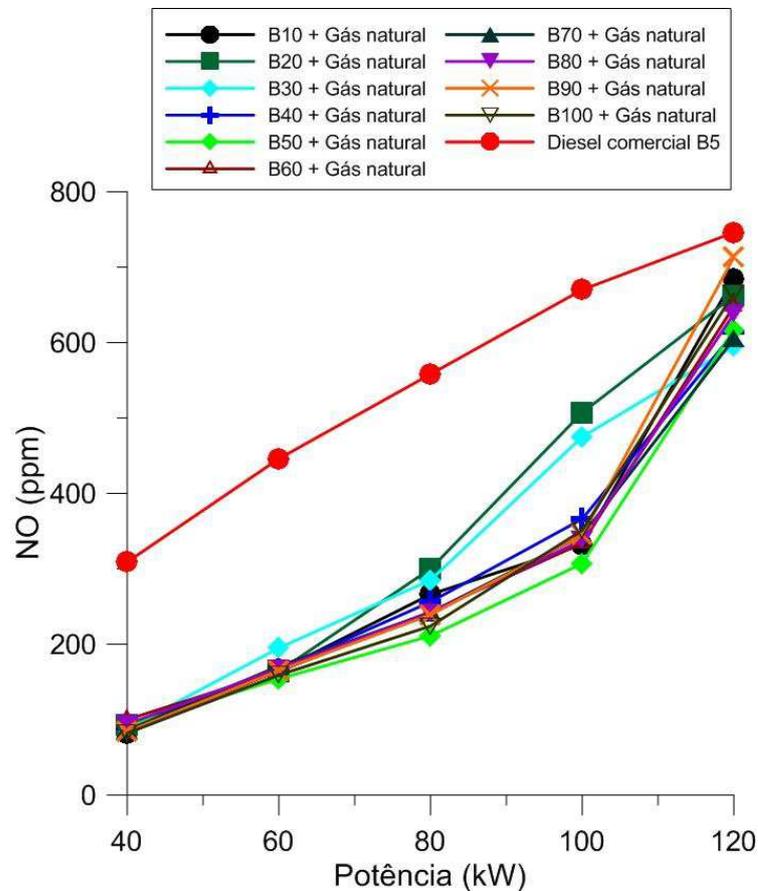


Figura 4.19 - Emissões de NO para os combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.

c) Emissões de CO

O monóxido de carbono (CO) é proveniente de uma combustão formada principalmente devido à combustão incompleta do combustível. Quando a combustão é completa, o CO é convertido em CO₂. Mistura rica, com menor quantidade de ar que a desejada na mistura ar/combustível contribui para que isso aconteça (Nabi et al., 2006).

De acordo com a literatura pesquisada, é tendência comum a redução das emissões de CO quando o diesel é substituído pelo biodiesel (Xue, 2011; Aydin et al., 2010; Hazar, 2009;

Ozsezen, 2009; Ghobadian et al., 2009). Os autores acima citados relataram fatos pelos quais as emissões de CO reduzem-se:

- ✓ Maior teor de oxigênio e menor relação carbono e hidrogênio no biodiesel quando comparado ao diesel;
- ✓ As emissões de CO reduzem-se na medida em que aumentam-se os percentuais de biodiesel na mistura;
- ✓ As emissões de CO para o biodiesel são afetadas pela qualidade da matéria-prima e outras propriedades, tais como o índice de cetano;
- ✓ A carga do motor tem um impacto significativo nas emissões de CO;
- ✓ Há uma conclusão unânime de que as emissões diminuem com o aumento da potência do motor.

A Figura 4.20 representa as emissões de CO em função da potência do motor a 1800 rpm.

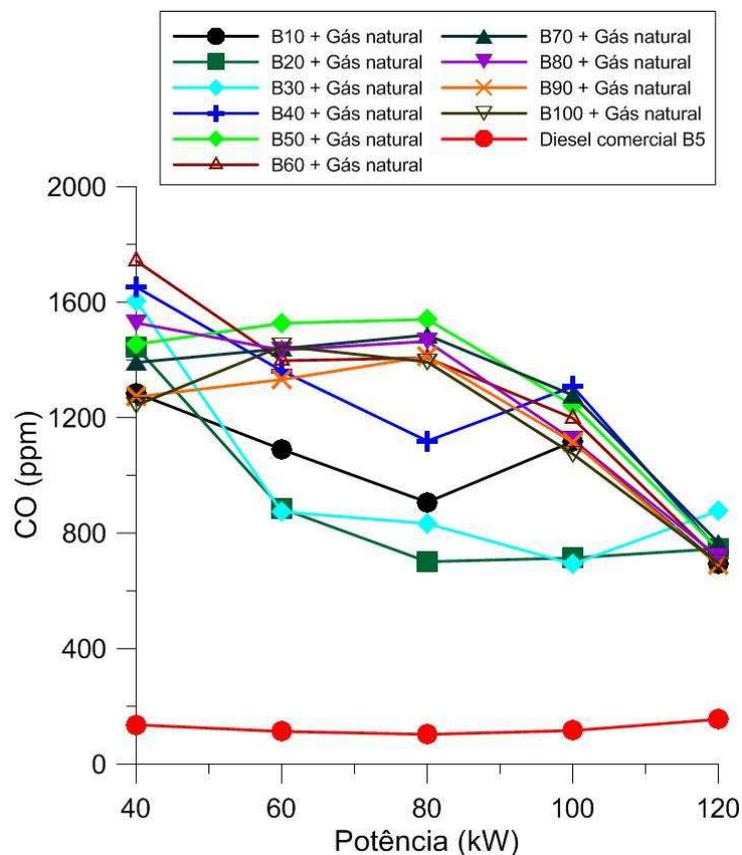


Figura 4.20 - Emissões de CO para os combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.

Como já mencionado anteriormente, as emissões de CO são resultantes de uma combustão incompleta. Assim, as emissões aqui apresentadas enquadram-se nessas condições, conforme verificado na Figura 4.20. As emissões representadas na Figura apresentam características de um motor operando com mistura rica (excesso de combustível), com níveis de emissões piores que a do combustível diesel. Justificam-se os resultados, tendo em vista que, no motor diesel, a quantidade de ar injetada é constante e o que varia é a quantidade de combustível.

d) Emissões de CO₂

O dióxido de carbono é apontado como a principal das emissões que contribuem negativamente com as alterações climáticas do planeta, resultando, principalmente, da queima de combustíveis fósseis nas indústrias e no sistema de transporte.

Devido à elevada taxa de emissões de CO₂ resultante da contribuição do tráfego pelo uso de combustível fóssil, alguns autores estudaram e apresentaram resultados sobre esse assunto. Na literatura (Buyukkaya, 2010; Ozsezen et al., 2009; Utlu e Koçak, 2008; Keskin et al., 2008; Lin e Li, 2009; Sahoo et al., 2009), foi relatado que o uso do biodiesel resultou em menos emissões de CO₂ quando comparado ao diesel puro, porém maiores emissões de NO_x.

Pesquisa realizada por Carraretto et al., (2004), utilizando misturas de biodiesel/diesel e biodiesel puro em geradores de vapor, indicaram que pode-se substituir totalmente o diesel pelo biodiesel com eficiência comparável ao diesel e com menos poluição, sem considerável perda de potência. Os resultados apresentados na Figura 4.21, que representa as emissões de CO₂ em função da potência se comparados com o combustível diesel, comprovam os relatos dos pesquisadores acima citados.

Verificou-se que, apesar do elevado percentual de gás natural no combustível utilizado, as emissões de biodiesel (B10 a B100) e gás natural apresentaram melhores resultados que as emissões do diesel padrão. Em todas as misturas, as emissões de CO₂ crescem quase que de forma linear com o aumento da potência.

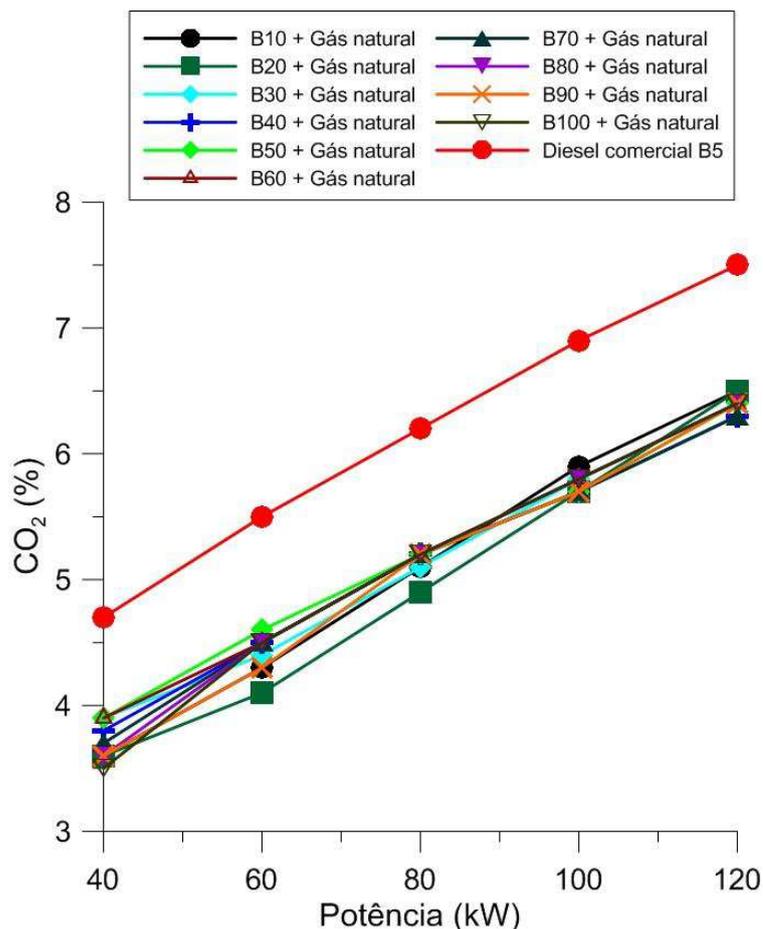


Figura 4.21 - Emissões de CO₂ para os combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.

e) Emissões de SO₂

Estes gases são formados pela reação do enxofre existente no combustível. A concentração resultante de compostos de enxofre nos produtos de combustão é função do percentual de enxofre contido no combustível e da razão ar-combustível.

Os processos industriais são as principais fontes artificiais pelo lançamento de dióxido de enxofre na atmosfera, mas no processo de combustão praticamente todo o enxofre contido no combustível oxida para formar o SO₂.

Segundo Tulcan (2009), no processo de combustão nos motores diesel, a produção de SO₂ é causada pela oxidação do enxofre presente no combustível.

O biodiesel e suas misturas contêm uma quantidade de enxofre muito menor em comparação com o combustível diesel, mas as emissões de SO₂ para o biodiesel e suas misturas quando queimado juntamente com o gás natural apresentaram emissões maiores do que as do combustível diesel.

Carvalho e Lacava (2003) relatam que o gás natural, em sua composição original, é isento de enxofre; no entanto, uma pequena parcela de enxofre é adicionada ao gás por questão de segurança, para que ele deixe de ser inodoro. Os óxidos de enxofre formados na combustão acontecem pela presença deste elemento no óleo diesel contido na mistura diesel/biodiesel e o enxofre presente no gás natural.

Menores teores de enxofre na composição de um combustível contribuem para a redução de desgaste de componentes do motor, além de minimizar os níveis de particulados e reduzir as emissões dos óxidos de enxofre para a atmosfera (Kegl, 2010).

As emissões de SO₂ representadas na Figura 4.22 confirmam o que relata a literatura, pois, apesar de insignificantes, as emissões das misturas de biodiesel e gás natural apresentaram-se maiores do que as do combustível diesel padrão (B5).

Analisando as curvas das emissões do dióxido de enxofre, verifica-se que quando as misturas têm percentual de biodiesel igual ou inferior a 50%, as curvas apresentam uma tendência, ou seja, as emissões são nulas a partir da potência de 60 kW. Isso significa que o maior percentual de diesel interfere na qualidade das emissões, apesar da influência maior na mistura ser do gás natural. Quando o percentual de biodiesel é igual ou superior a 50%, as curvas apresentam outra tendência, ou seja, as emissões são nulas a partir da potência de 100 kW. Apesar de valores insignificantes (representados em ppm), esses são maiores do que as emissões encontradas nos experimentos com diesel comercial (B5).

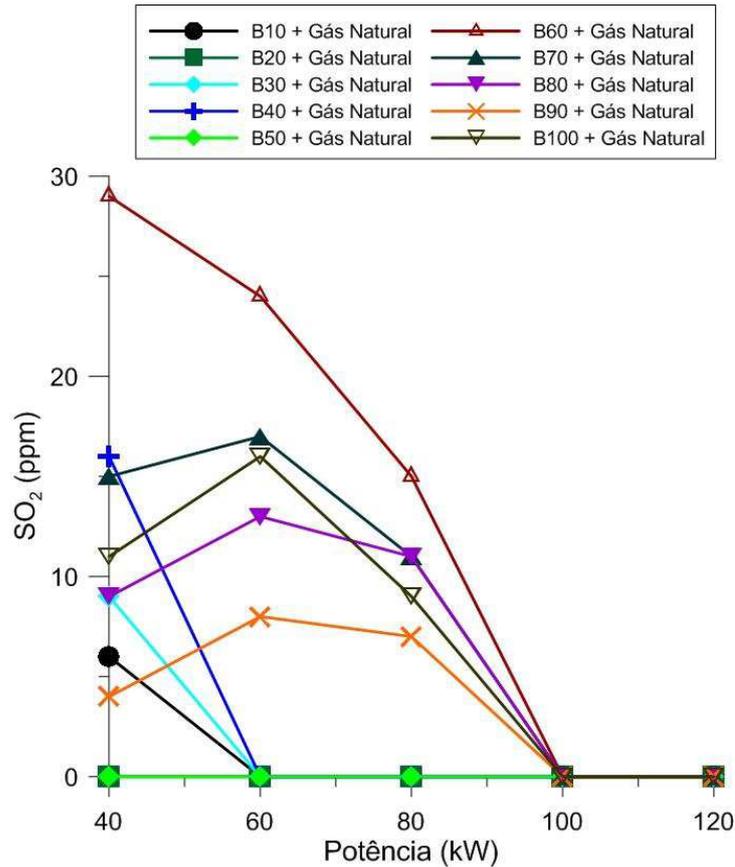


Figura 4.22 - Emissões de SO₂ para combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.

f) Emissões de O₂

Embora não seja poluente, conhecer a concentração de oxigênio no gás de escape é uma ferramenta importante para avaliar parâmetros da combustão do motor. Relatos de alguns pesquisadores informam que a concentração de oxigênio no combustível favorece o aumento das emissões do NO_x, mas, por outro lado, contribui para que o processo de combustão seja mais completo e tenha como consequência a redução das emissões de CO.

As curvas das emissões de O₂ para as misturas de diesel/biodiesel e gás natural representadas na Figura 4.23 apresentaram características similares às do combustível diesel.

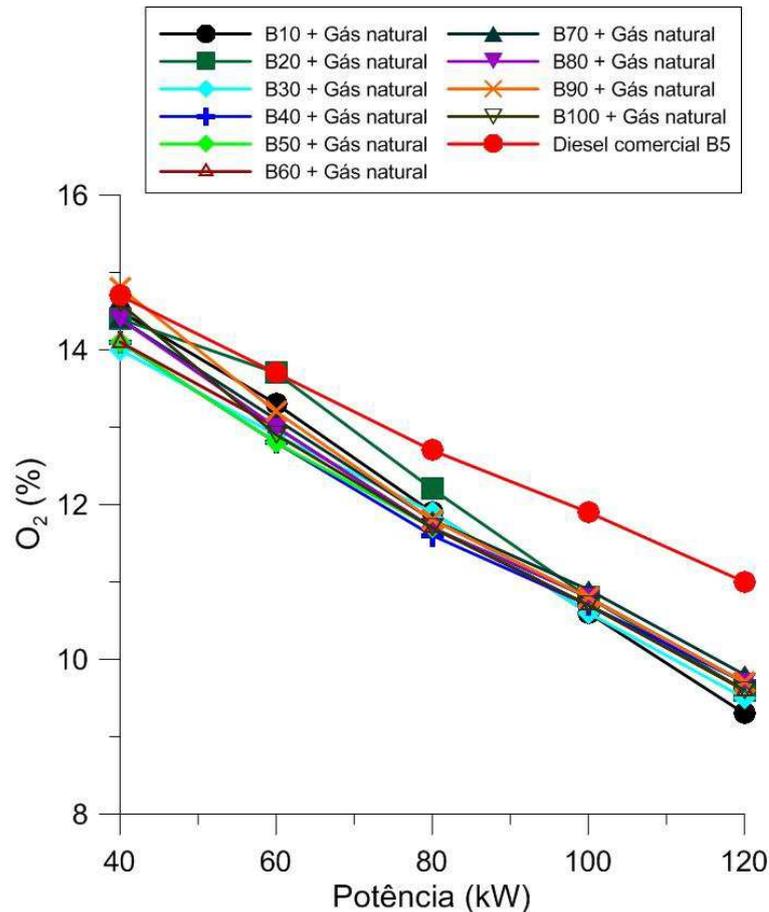


Figura 4.23 - Emissões de O_2 para combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.

4.1.5 Análise do excesso de ar

Para um combustível ser completamente queimado, é necessário fornecer, na câmara de combustão, uma quantidade de ar maior que a teoricamente necessária (estequiométrica). Partindo do princípio de que seja adicionado na câmara de combustão somente o ar teórico, sempre haverá má distribuição do ar na câmara de combustão, ou seja, excesso de ar em uma área, e falta de ar em outra área da câmara de combustão. Falta de ar na mistura ar-combustível provoca a queima incompleta, enquanto com grande excesso de ar na mistura ar-combustível (como no motor diesel) tem-se uma combustão completa – porém, essa quantidade de ar em excesso diminuirá a temperatura na câmara de combustão, que diminui o rendimento térmico do motor.

A maior parte dos experimentos com as misturas diesel/biodiesel e gás natural representados na Figura 4.24 apresentaram excesso de ar inferior ao do diesel comercial (B5),

fato que justifica a melhor eficiência de combustão do combustível diesel, conforme ilustrado na Figura 4.24.

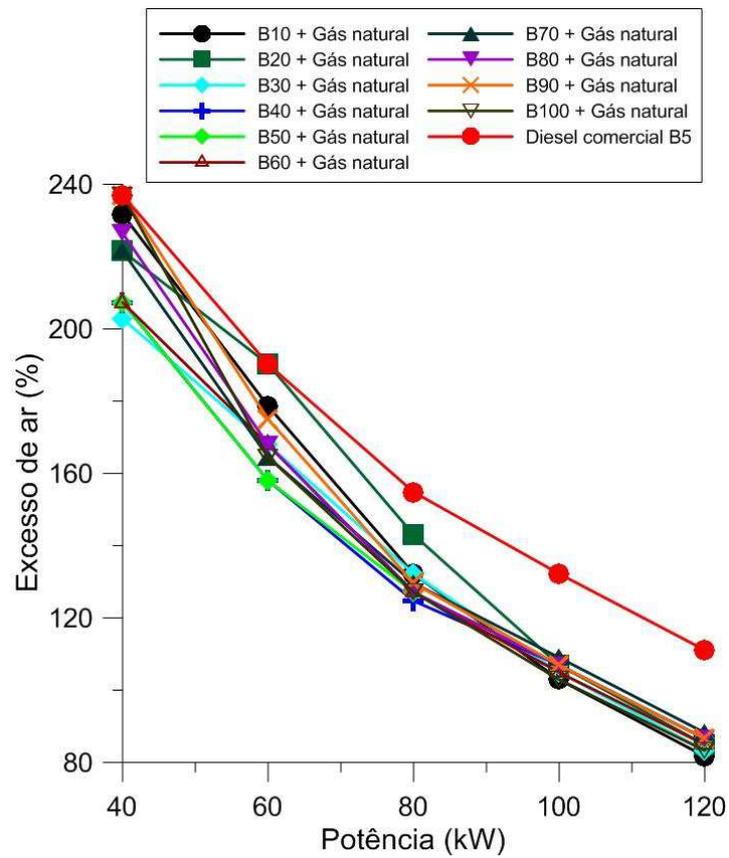


Figura 4.24 - Excesso de ar para os combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.

4.2 Resultados Teóricos

4.2.1 Análise energética do motor operando com diesel, biodiesel e gás natural

As figuras a seguir representam o comportamento dos dados referentes à eficiência da combustão, eficiência térmica baseada no PCI, calor transferido para o meio ambiente, temperatura de orvalho, temperatura adiabática de chama, entalpia dos produtos, fração molar do vapor d'água e excesso de ar. Todos os resultados estão expressos em função da potência do motor e foram obtidos através do modelo matemático desenvolvido no ambiente EES (Engineering Equation Solver). Nos Apêndices, encontram-se os resultados fornecidos pelo código computacional.

a) Eficiência de combustão

A Figura 4.25, a seguir, apresenta a eficiência da combustão teórica em função da potência desenvolvida. Verifica-se que o comportamento dos resultados das misturas (experimental e teórica) se assemelha e os valores da eficiência de combustão teórica se apresentam melhores para as potências mais baixas e tornam-se equivalentes na potência de 120 kW, conforme pode ser verificado na curva experimental da Figura 4.16. Quanto às curvas teórica e experimental do diesel comercial B5, apresentaram diferentes eficiências de combustão, e os valores experimentais variaram entre 59,6% na potência de 40 kW e 56,7% na potência de 120 kW, enquanto os valores da eficiência de combustão teórica ficaram entre 51,83% na potência de 40 kW e 52,92% na potência de 120 kW.

Os resultados das eficiências teórica e experimental apresentam características similares para as misturas biodiesel e gás natural, principalmente a partir da potência de 80 kW, onde ambos tendem a convergir para valores semelhantes na potência de 120 kW.

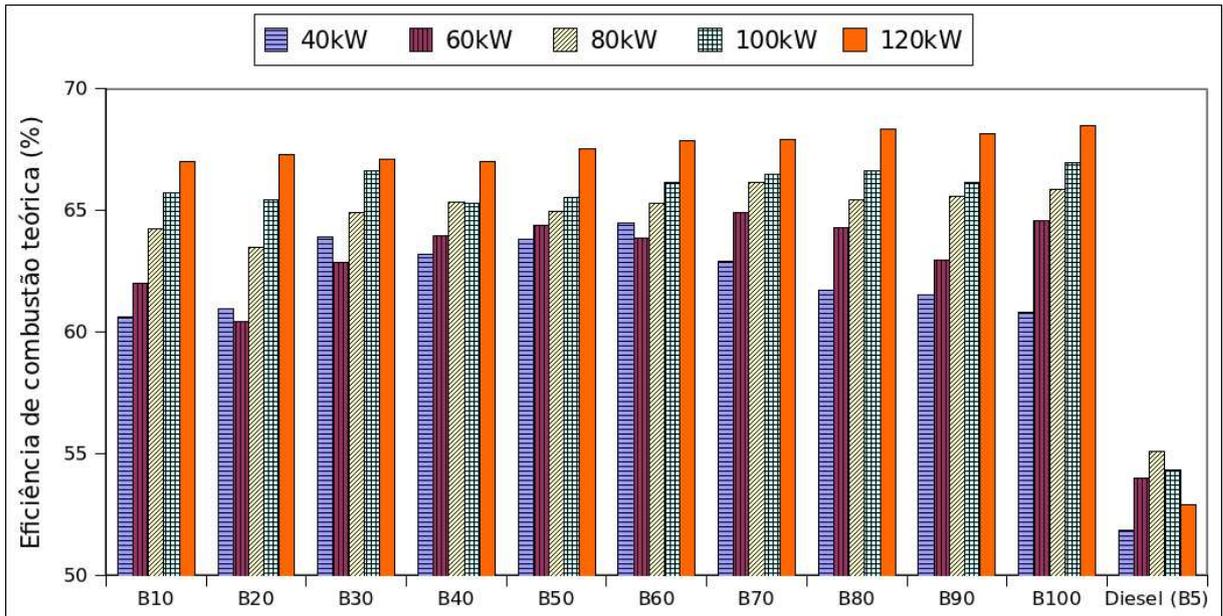


Figura 4.25 – Eficiência de combustão teórica para os combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.

b) Eficiência térmica

Na Figura 4.26, está representado o comportamento da eficiência energética baseada no PCI para o diesel comercial B5 e para as misturas B10 a B100 e gás natural. Verifica-se que a eficiência energética do sistema operando na condição dual apresenta similaridade entre os resultados e aumenta com o aumento da potência, tanto para o diesel B5, quanto para as misturas biodiesel e gás natural.

As misturas de diesel/biodiesel e gás natural (B10 a B100) apresentam resultados semelhantes, enquanto o diesel comercial B5, nas menores potências, apresentou melhor eficiência térmica do que as misturas; porém, na potência de 120 kW, apresentou resultado semelhante às misturas.

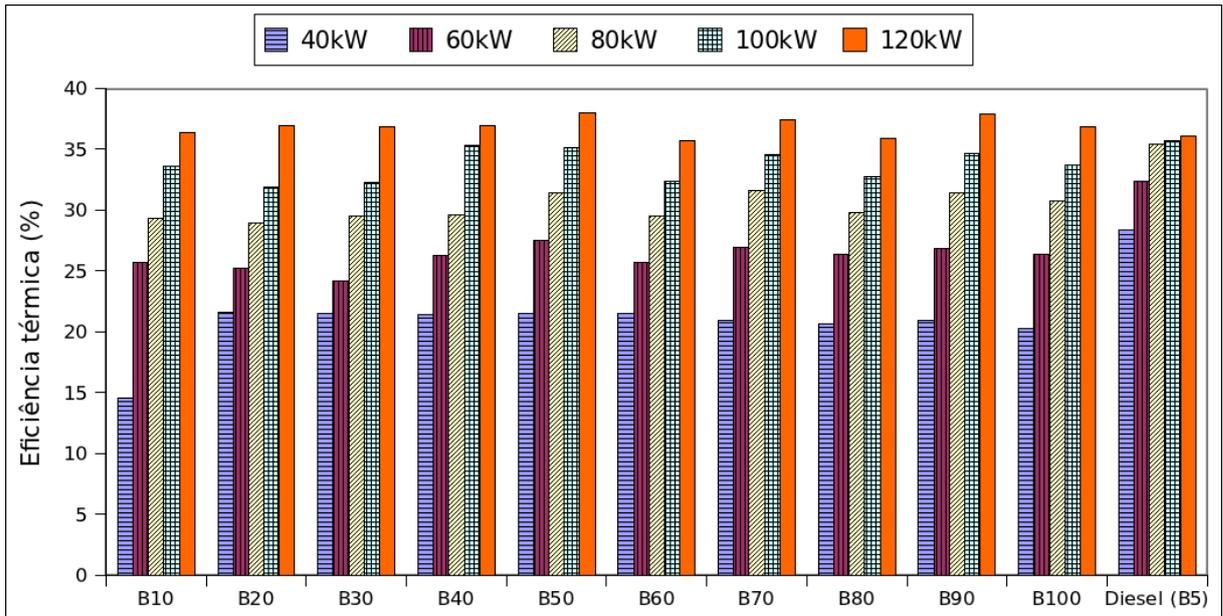


Figura 4.26 – Eficiência térmica baseada no PCI, para os combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.

c) Temperatura adiabática

A Figura 4.27 apresenta o comportamento da temperatura adiabática calculada pelo modelo matemático em função da potência. Verifica-se que os resultados apresentam grande similaridade entre eles, ou seja, a temperatura adiabática aumenta com o aumento da potência. Porém, verifica-se que, nas potências de 100 para 120 kW, existe uma tendência de todos os valores convergirem para um valor muito aproximado de 1260°C em todas as misturas (diesel, biodiesel e gás natural).

Quanto ao diesel comercial B5, também apresentou comportamento similar, porém iniciou e terminou com temperaturas inferiores, 683,63°C e 1002,76°C nas potências de 40 e 120 kW, respectivamente.

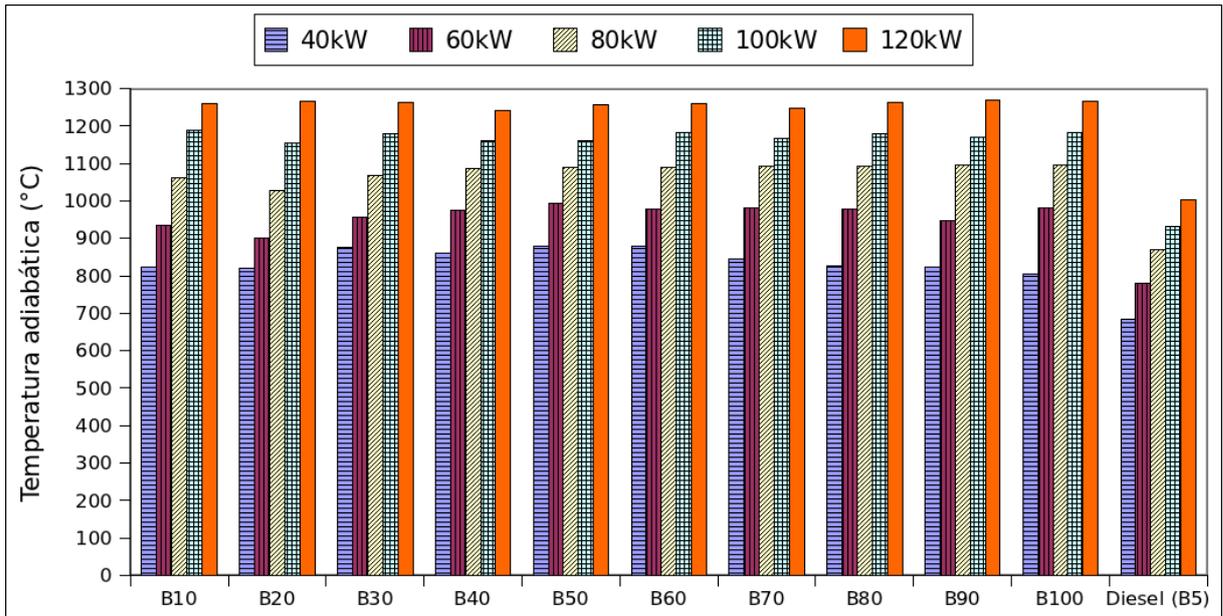


Figura 4.27 – Temperatura adiabática para os combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.

d) Calor perdido para o ambiente

Na Figura 4.28, apresenta-se o calor perdido pelo motor para o ambiente por unidade de tempo, predito pelo modelo proposto. Observa-se que, quando o sistema funciona com as misturas de biodiesel e gás natural, a transferência de calor aumenta com o aumento da potência; porém, a mistura B10 e gás natural na potência de 40 kW apresentou uma divergência quando comparada às demais misturas.

O comportamento dos resultados do diesel comercial B5 apresentaram a mesma tendência dos resultados das misturas diesel, biodiesel e gás natural, aumentando com o aumento da potência, porém com perda de calor para o ambiente inferior ao apresentado pelas misturas.

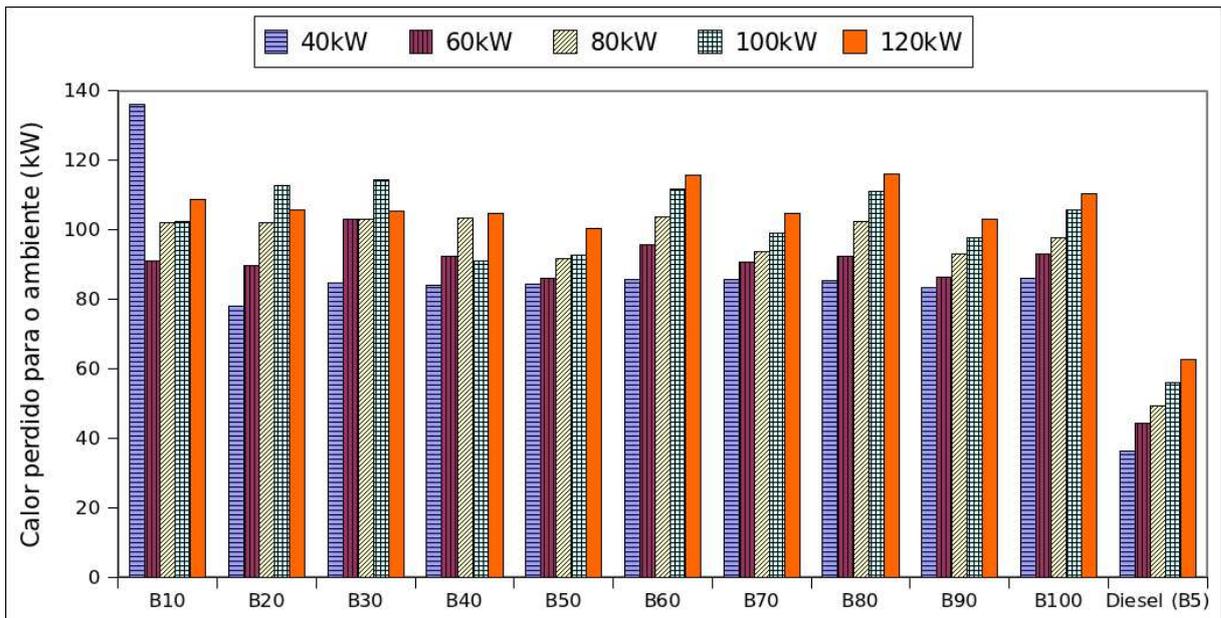


Figura 4.28 – Calor perdido para o ambiente para os combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.

e) Entalpia dos produtos

A Figura 4.29, a seguir, representa o comportamento da entalpia dos produtos por unidade de tempo predita pelo modelo matemático proposto em função da potência. Verifica-se que ocorre um crescimento da entalpia dos gases com o aumento da potência. Isso é compatível com o que aconteceu nos testes experimentais, como pode ser observado pelo aumento da temperatura dos gases de escapamento do motor para as condições de óleo diesel comercial B5 e misturas de biodiesel e gás natural.

O diesel comercial B5 também apresentou comportamento similar ao das misturas, porém com resultados melhores que os das misturas.

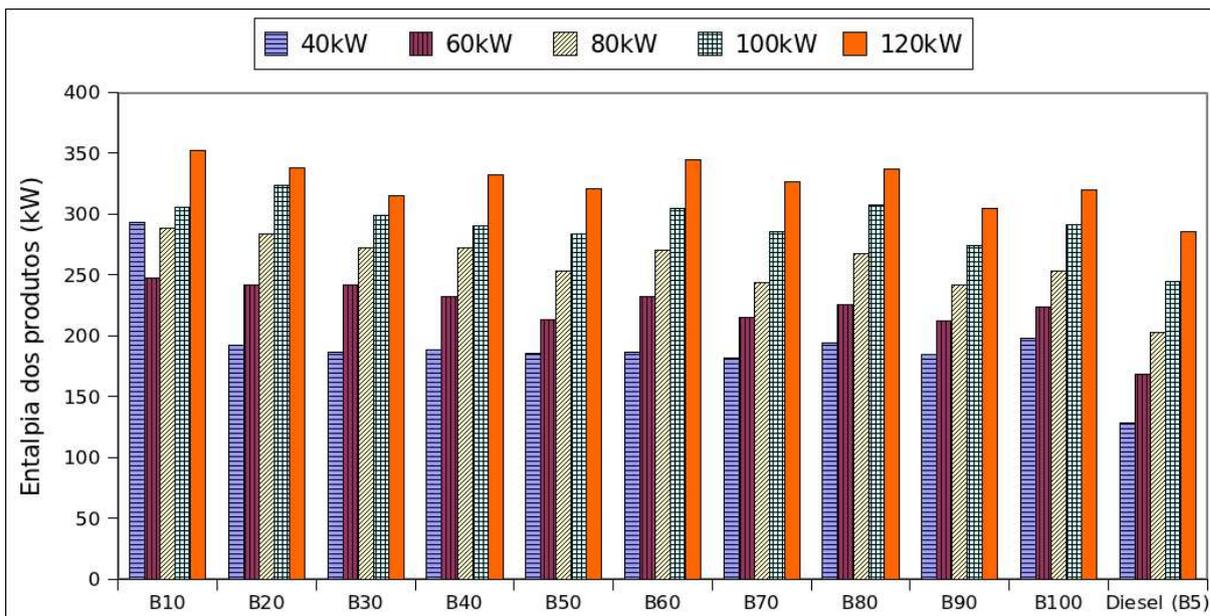


Figura 4.29 – Entalpia dos produtos para os combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.

f) Ar em excesso

A Figura 4.30 mostra o excesso de ar calculado pelo modelo matemático proposto. Verificou-se que o comportamento dos resultados em todas as condições de operação é semelhante aos dados experimentais. Os valores de excesso de ar obtidos experimentalmente variaram de 200 a 240 para todas as misturas biodiesel e gás natural na potência de 40 kW, enquanto na mesma potência, para os valores teóricos, variaram entre 170 e 205%.

Tomando como referência a potência de 120 kW nos resultados experimentais do excesso de ar, variaram de 80% a 110%, ao passo que no predito pelo modelo matemático os valores variaram entre 60% e 85%.

No modelo matemático proposto, o excesso de ar se apresentou com valores menores que os experimentais, porém as figuras com características muito semelhantes entre elas.

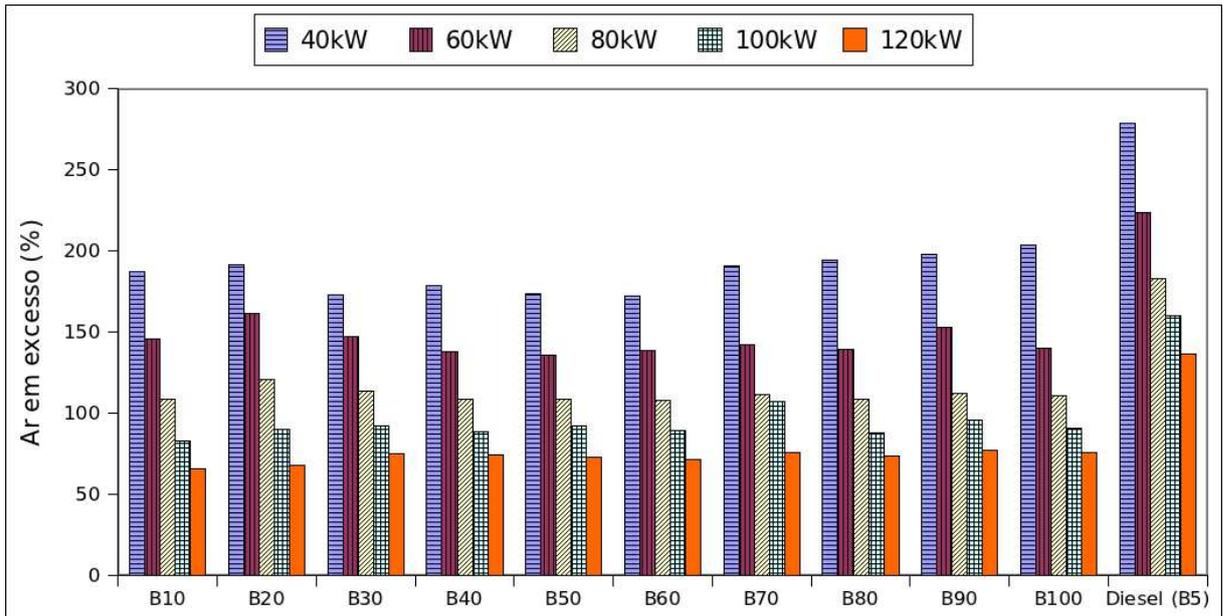


Figura 4.30 – Ar em excesso para os combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.

g) Fração molar do vapor d'água

A Figura 4.31 apresenta a fração molar de vapor de água contida nos produtos da combustão predita pelo modelo matemático. Observa-se que os resultados das misturas diesel/biodiesel e gás natural (B10 a B100) apresentaram grande similaridade entre eles, nas mesmas potências. As informações obtidas são importantes, visto que a associação do vapor de água com produtos da combustão pode gerar elementos corrosivos que desgastam os elementos do escapamento do motor (processo de corrosão).

Comparando os resultados apresentados entre as misturas diesel, biodiesel e gás natural com os resultados do diesel comercial B5, é possível verificar a melhor situação do diesel B5, tendo em vista que este apresentou menores frações molares, o que significa menores quantidades de água no sistema de escapamento e demais partes do motor.

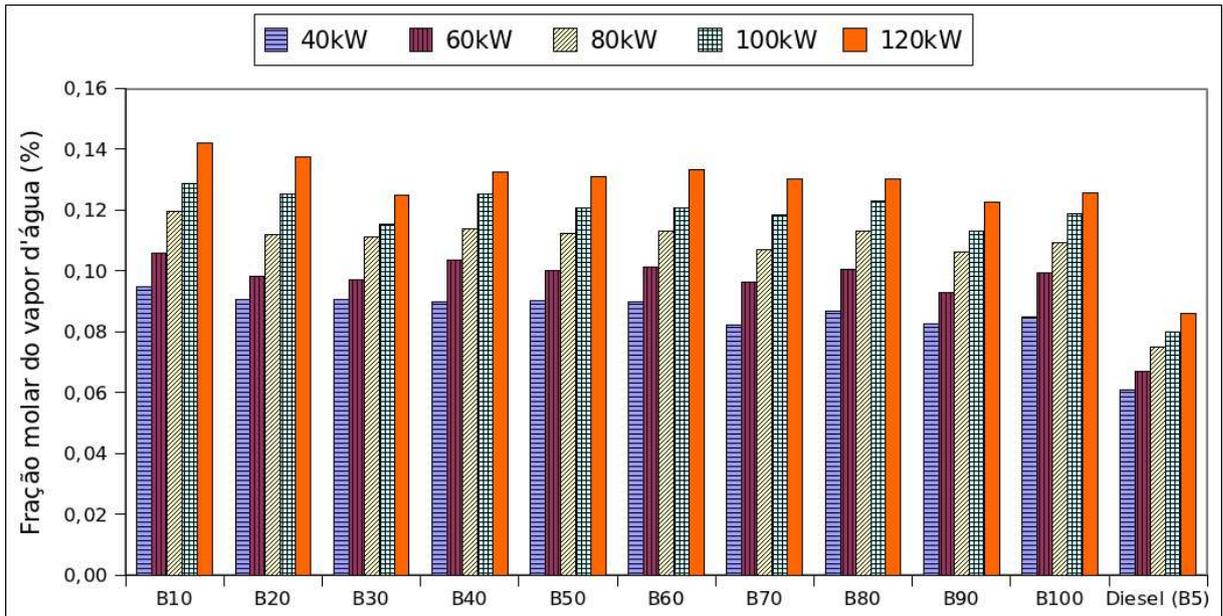


Figura 4.31 – Fração molar do vapor d'água para os combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.

g) Temperatura de orvalho

A Figura 4.32 representa o comportamento da temperatura de orvalho calculada pelo modelo matemático em função da potência desenvolvida pelo motor. Os resultados das misturas diesel/biodiesel e gás natural apresentaram um comportamento similar em todas as potências (40 a 120 kW). Verifica-se que, com a utilização de misturas de biodiesel e gás natural, ocorre um aumento desta temperatura com a elevação da potência do motor. Há uma tendência de que essa variável decresça com o aumento da quantidade do biodiesel no diesel padrão, para uma potência pré-fixada.

Quanto ao diesel comercial B5, também apresentou características semelhantes às misturas de diesel/biodiesel e gás natural, ou seja, os resultados aumentam com o aumento da potência, porém com temperaturas de orvalho inferiores às das misturas.

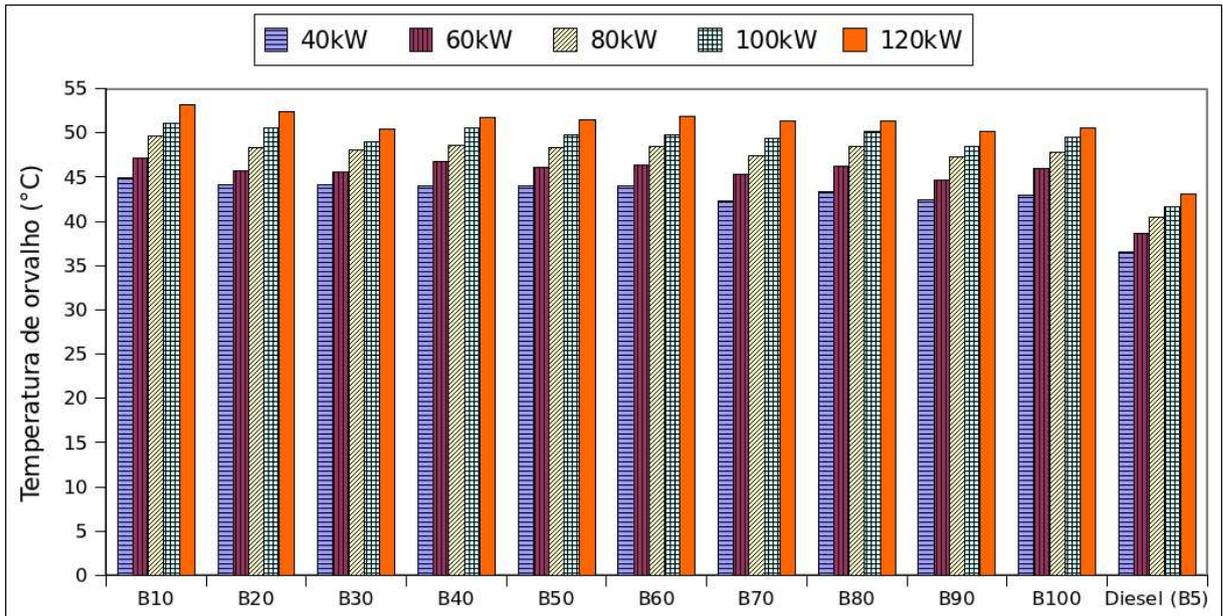


Figura 4.32 – Temperatura de orvalho para os combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.

h) Diagrama do fluxo de energia do diesel puro na potência de 120 kW

Nas Figuras a seguir, foram feitos diagramas representando a energia que entra no motor, onde se buscou comparar os resultados do diesel puro com os resultados da mistura diesel, biodiesel e gás natural no percentual de 10% (B10), na maior potência (120 kW) e na menor potência (40 kW).

A Figura 4.33 representa o diagrama da quantidade de energia quanto ao PCI entrando no motor para a condição de operação de máxima potência (120 kW), utilizando apenas diesel como combustível do motor. Observa-se que, para esta condição, a quantidade de energia entrando é de 356,97 kW. Os valores obtidos são compatíveis aos referenciados na literatura, ou seja, aproximadamente um terço para os valores de calor perdido para o ambiente, um terço para a potência útil e um terço para a energia nos produtos.

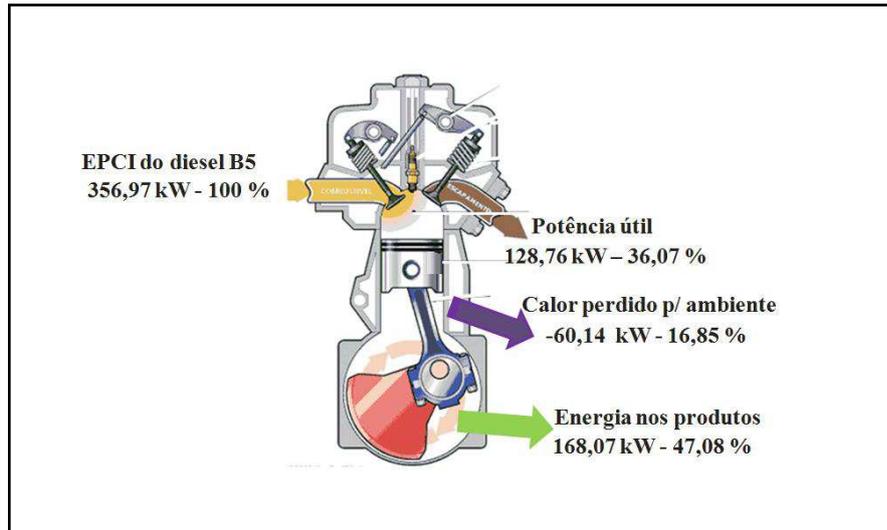


Figura 4.33 – Diagrama de fluxo de energia para a condição com diesel puro e maior potência.

i) Diagrama do fluxo de energia na condição dual, na potência de 120 kW

A Figura 4.34 mostra o diagrama para a condição de operação de máxima potência operando no modo dual, diesel e gás natural como combustível do motor. Observa-se que, para esta condição, com uma quantidade de energia entrando de 354,28 kW, valores muito semelhantes aos do diesel comercial B5, obteve-se menor perda de calor para energia nos produtos para o motor operando no modo dual, se comparado ao motor operando com diesel puro.

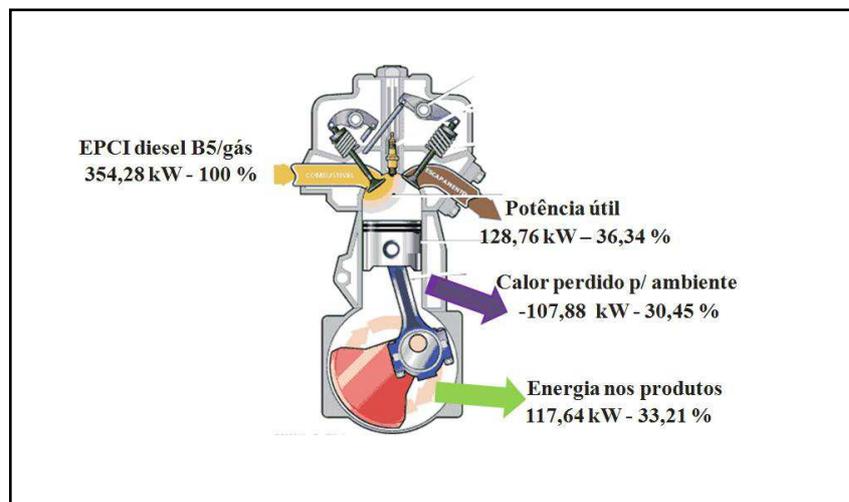


Figura 4.34 – Diagrama de fluxo de energia para a condição dual e maior potência.

j) Diagrama do fluxo de energia do diesel puro na potência de 40 kW

A Figura 4.35 apresenta um diagrama de energia do motor operando para a condição de menor potência, utilizando-se diesel puro. Observa-se que, para esta condição, ocorre uma diferença considerável de valores com relação à máxima potência com diesel puro, onde a potência útil, o calor perdido para o ambiente e a energia nos produtos são consideravelmente menores, o que era esperado nesta condição, em função da diferença entre os valores das potências.

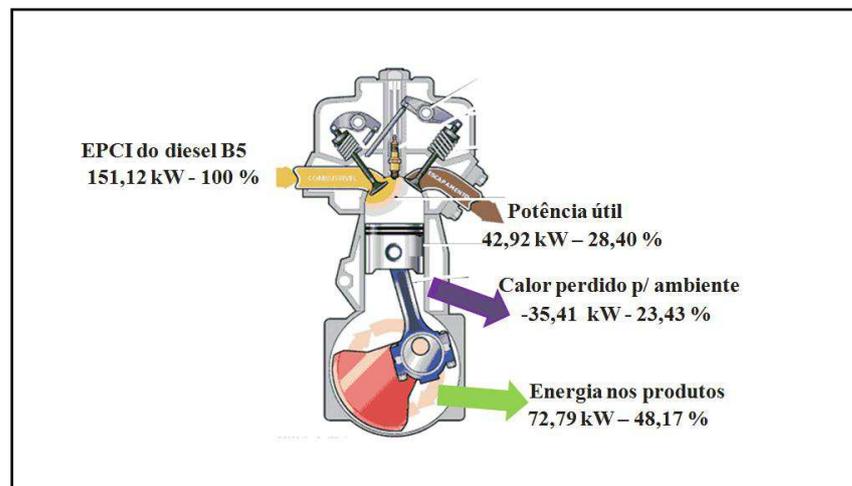


Figura 4.35 Diagrama de fluxo de energia para a condição com diesel puro e menor potência.

k) Diagrama do fluxo de energia na condição dual, na potência de 40 kW

A Figura 4.36 apresenta um diagrama de energia para a condição de menor potência, utilizando-se diesel e gás natural. Comparando-se esta condição com o modo diesel puro na mesma potência, verifica-se que, para uma mesma potência útil, necessita-se de uma maior quantidade de energia na entrada, além do que, na saída, tem-se uma maior perda de calor para o ambiente e também uma maior quantidade de energia presente nos produtos da combustão.

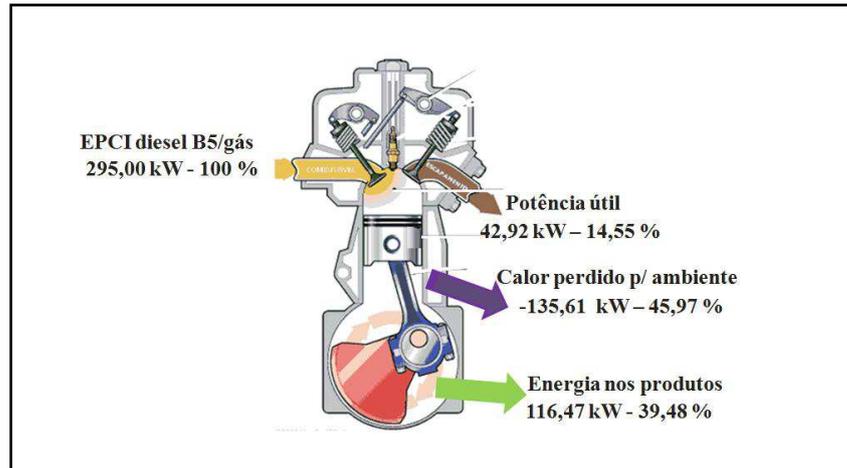


Figura 4.36 – Diagrama de fluxo de energia para a condição dual na menor potência.

4.2.2 Análise exergética do motor operando com diesel, biodiesel e gás natural

a) Eficiência exergética

A eficiência exergética do motor operando no modo dual e diesel comercial B5 é apresentada na Figura 4.37, onde se pode observar que ocorre o crescimento desta eficiência com o aumento da potência. O que se pode avaliar dos resultados mostrados é que as misturas diesel, biodiesel e gás natural apresentam, inicialmente, baixa eficiência exergética, e basicamente todas iniciaram com eficiência em torno de 20%. A partir da potência de 80 kW, um melhor aproveitamento na queima do combustível é verificado, pois as eficiências das misturas se igualam à do diesel comercial B5 e tornam-se superiores na potência de 120 kW. Esse comportamento justifica uma redução dos custos de geração de eletricidade com esse tipo de motor.

Na potência de 120 kW, a eficiência exergética atingiu um valor que variou de 34,12% para a mistura B60 a 36,23% para a mistura B50.

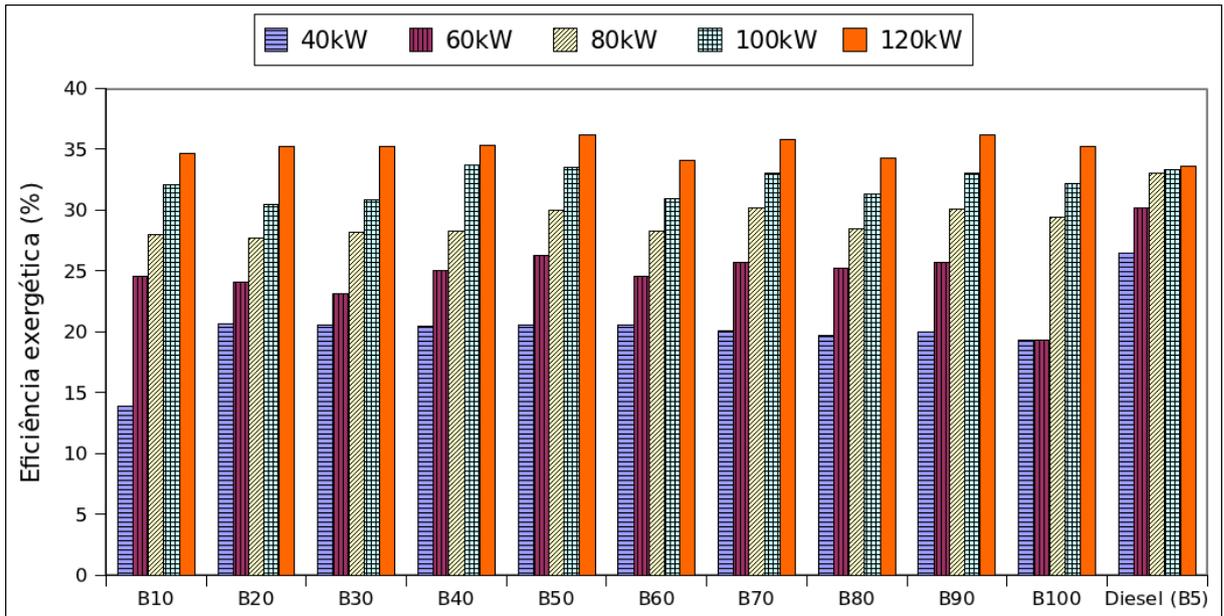


Figura 4.37 – Eficiência exergetica para os combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.

b) Exergia total

A exergia total para o motor operando na condição diesel comercial B5, misturas de biodiesel e gás natural apresentou similaridade. A exergia total cresceu com o aumento da potência, conforme mostra a Figura 4.38.

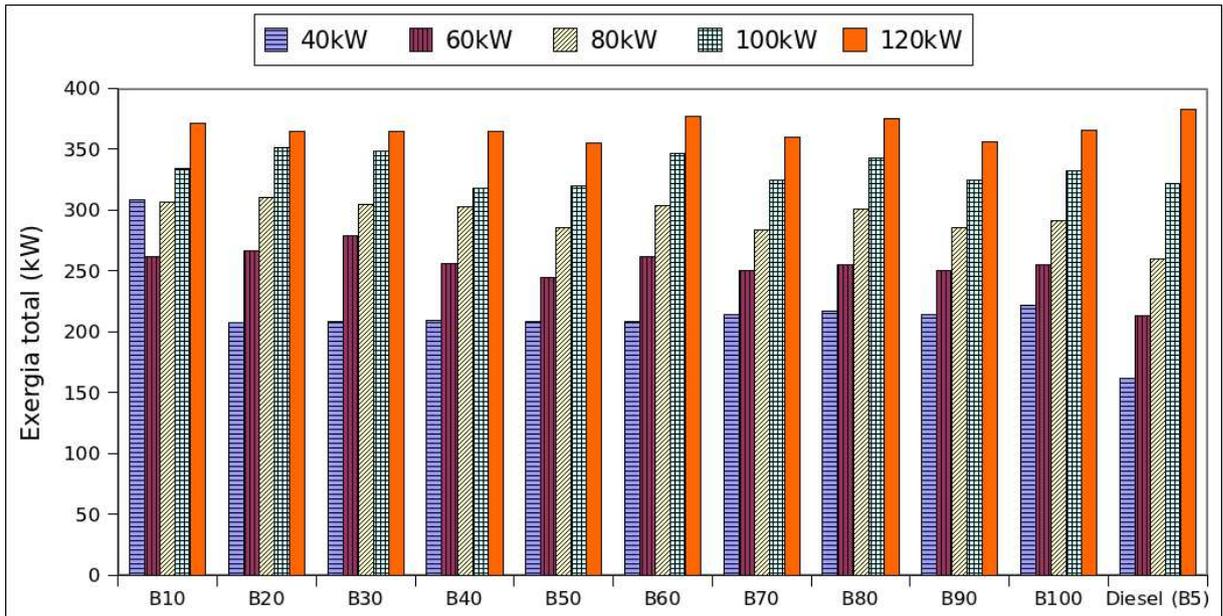


Figura 4.38 – Exergia total para os combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.

c) Exergia destruída

A Figura 4.39, apresentada a seguir, mostra o comportamento da exergia destruída para a condição das misturas de diesel/biodiesel e gás natural. Todas as misturas de biodiesel e gás natural apresentaram comportamento similar na potência de 40 kW, exceto a mistura B10 e gás natural, que apresentou maior exergia destruída nesta potência. As demais misturas, na potência mais elevada, apresentaram tendência a convergir para valores próximos, com variação máxima entre elas de 18,7 kW.

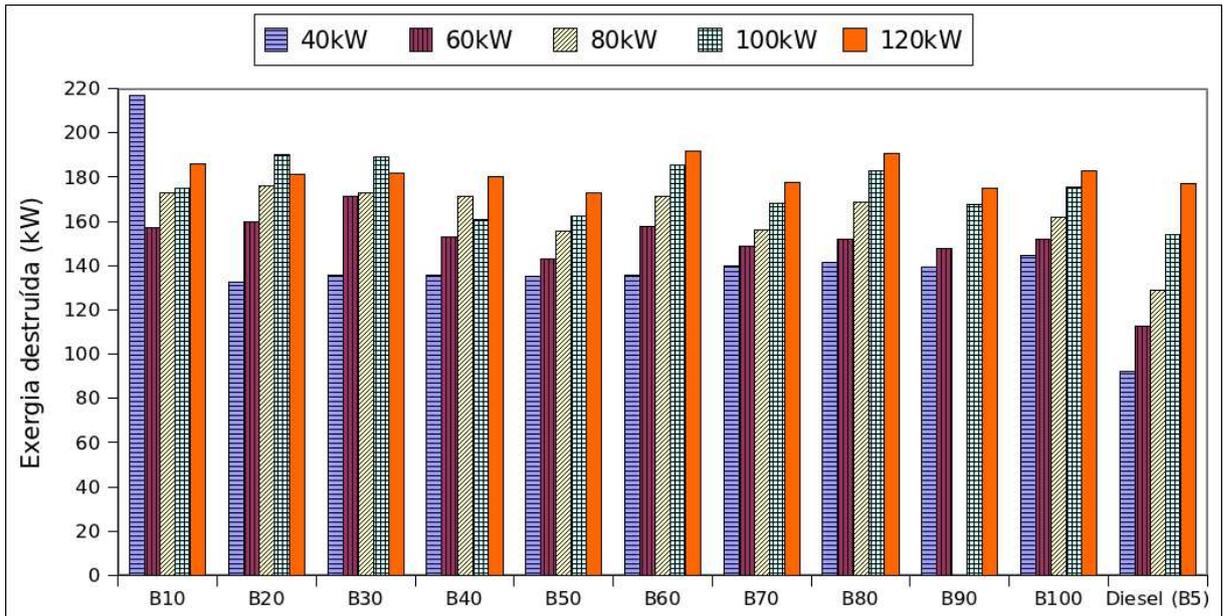


Figura 4.39 – Exergia destruída para os combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.

d) Exergia do calor perdido para o ambiente

A exergia do calor perdido para o ambiente em função da potência é apresentada na Figura 4.40. Pode ser observado que o valor mínimo da exergia do calor perdido para o ambiente foi de 3,7 kW, enquanto o valor máximo foi de 5,5 kW, exceto para a mistura B10 e gás natural. Esses resultados mostram que a exergia do calor perdido representam uma parcela pequena da exergia total, da ordem de 3%. Na potência de 120 kW, a exergia do calor perdido para o ambiente variou de 4,8 a 5,66 kW.

Quanto ao diesel comercial B5, apresentou comportamento similar ao das misturas diesel/biodiesel e gás natural, ou seja, aumentou com o aumento da potência, porém mais eficiente do que as misturas, perdendo menos calor para o ambiente.

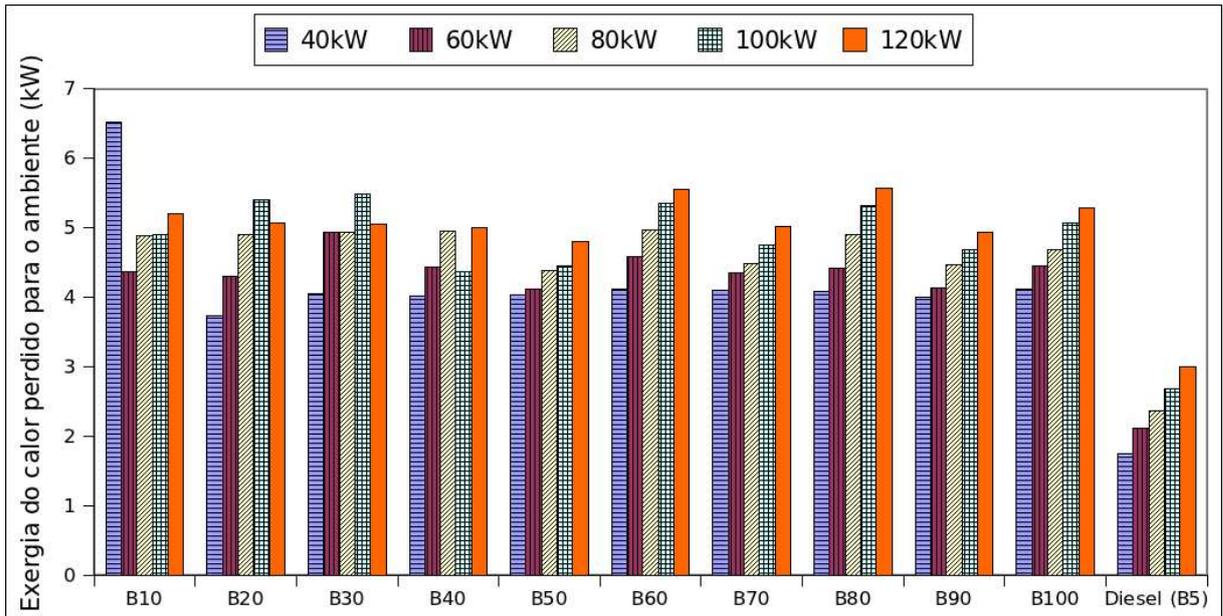


Figura 4.40 – Exergia do calor perdido para o ambiente para os combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.

e) Exergia total dos produtos da combustão

A Figura 4.41 representa o comportamento da exergia dos produtos da combustão para a condição das misturas de B10 a B100 e gás natural. Os resultados apresentam comportamento semelhante, exceto para a mistura B10 na potência de 40 kW. Verificou-se que a exergia total dos produtos da combustão aumentou com o aumento da potência do motor.

Quanto ao diesel comercial B5, apresentou características semelhantes ao das misturas diesel/biodiesel e gás natural e aumentou com o aumento da potência. Nas potências de 100 e 120 kW, o diesel comercial B5 apresentou valores maiores do que os das misturas.

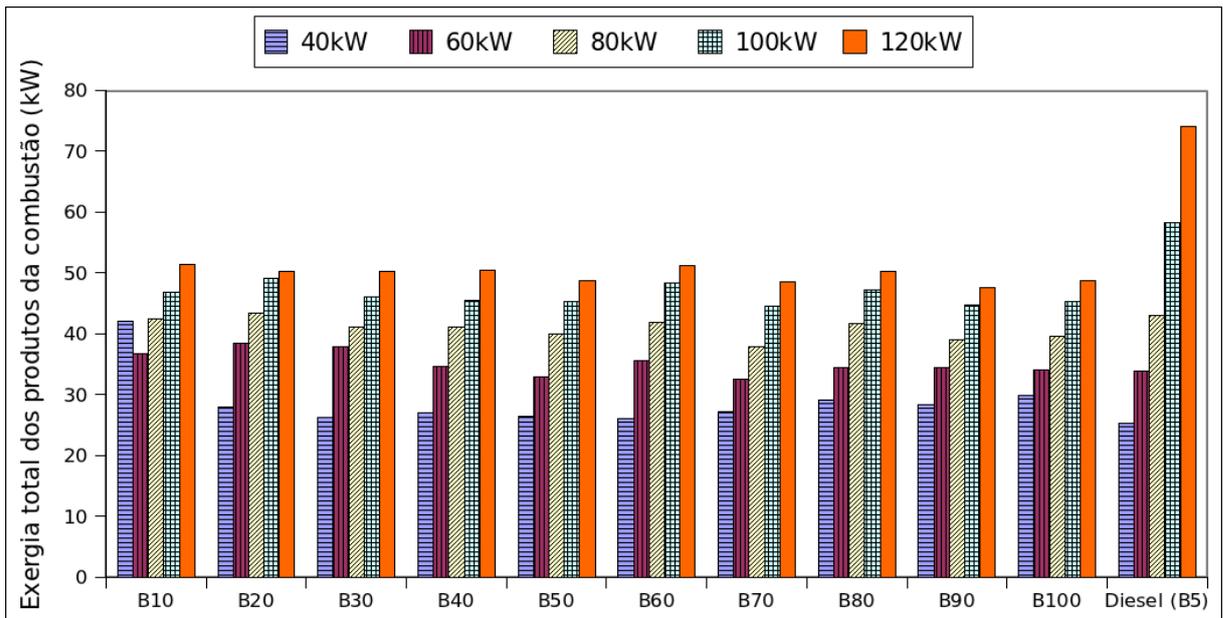


Figura 4.41 – Exergia total dos produtos da combustão para os combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.

f) Exergia química dos produtos da combustão

A Figura 4.42 representa o comportamento da exergia química predita dos gases de escape do motor para todas as condições de trabalho previstas. A partir da potência de 60 kW, a exergia química dos produtos da combustão aumenta com o aumento da potência e todas as misturas tendem a convergir para um mesmo valor na potência de 120 kW.

Os valores da exergia química dos produtos da combustão do diesel comercial B5 também aumentam com a elevação da potência. Apresentam-se com valores inferiores aos das misturas nas menores potências (40 kW), porém na potência de 120 kW tornam-se aproximados aos valores obtidos pelas misturas.

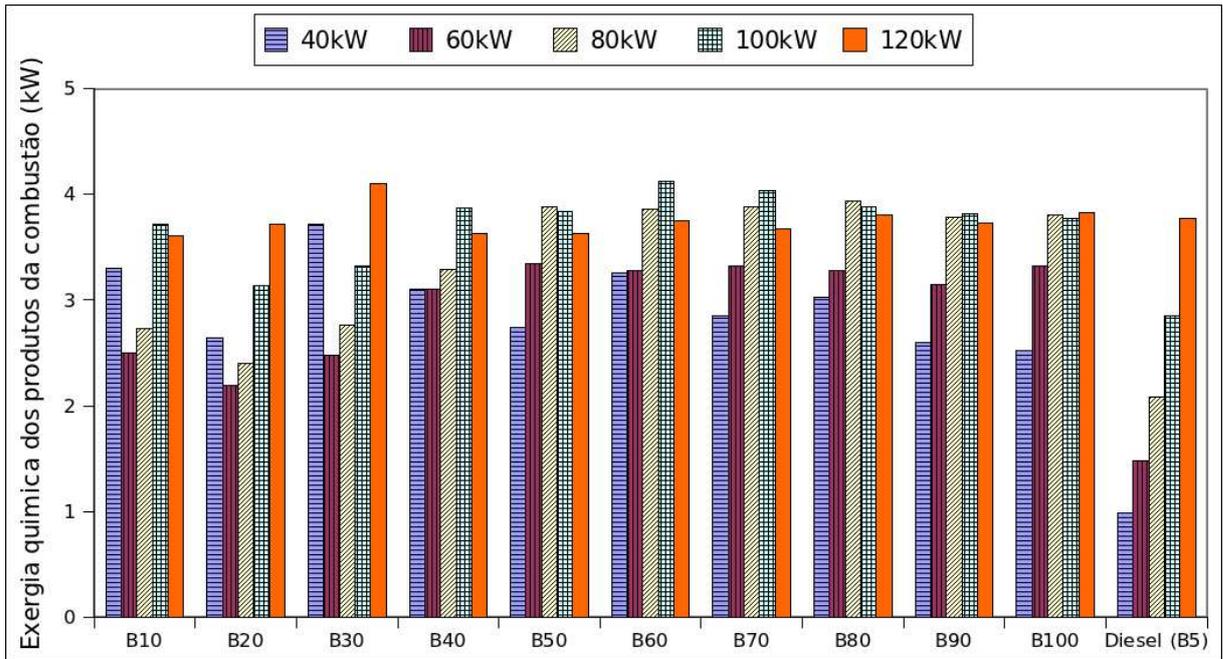


Figura 4.42 – Exergia química dos produtos da combustão para os combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.

g) Exergia térmica dos produtos da combustão

A Figura 4.43 apresenta, a seguir, os valores da exergia térmica dos produtos da combustão. É possível verificar que as misturas diesel, biodiesel e gás natural, assim como o diesel comercial B5, apresentam comportamento semelhante, crescente com o aumento da potência. Para a condição de diesel comercial B5 a partir da potência de 80 kW, este apresenta resultados aproximados aos das misturas (diesel, biodiesel e gás natural), ou seja, a partir desta potência, o combustível comercial B5 passa a apresentar resultados maiores que todas as misturas (diesel, biodiesel e gás natural), iniciando com valores de 40,95 kW na potência de 80 kW do motor, chegando a valores de 70,41kW na potência de 120 kW.

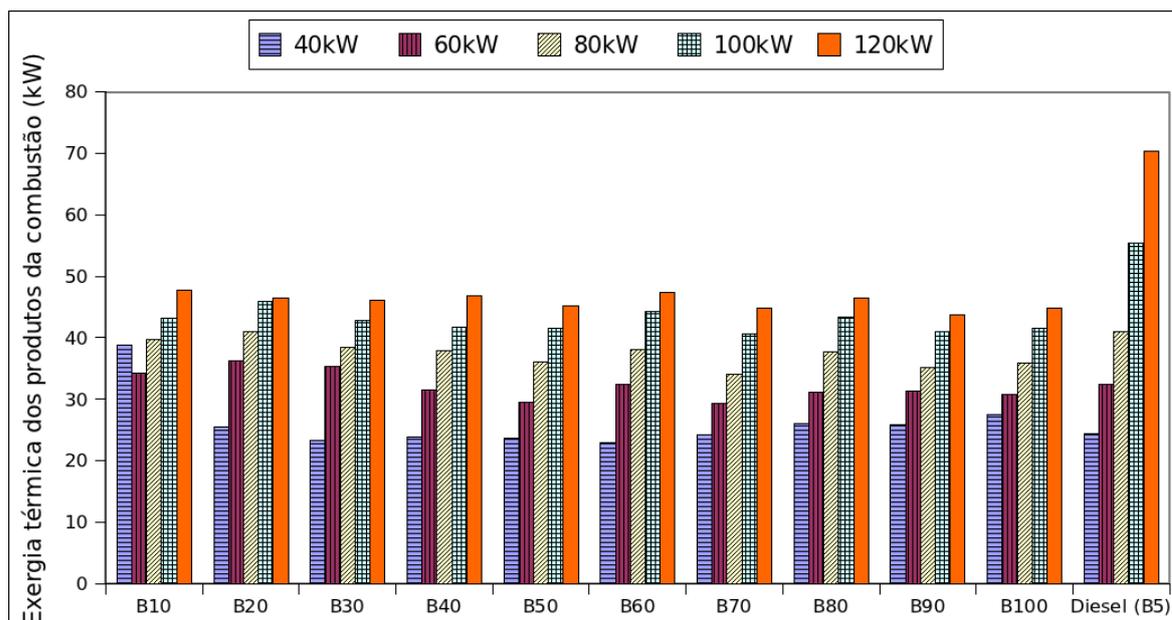


Figura 4.43 – Exergia térmica para os combustíveis diesel padrão (B5) e misturas de biodiesel e gás natural em função da potência do motor a 1800 rpm.

h) Diagrama do fluxo de exergia do diesel puro na potência de 120 kW

Nas Figuras a seguir, foram feitos diagramas representando a exergia que entra no motor e se buscou comparar os resultados do diesel puro com os resultados da mistura diesel, biodiesel e gás natural no percentual de 10% (B10), na maior potência (120 kW) e na menor potência (40 kW).

A Figura 4.44 representa o diagrama do fluxo da quantidade de exergia entrando no motor para a condição de operação de máxima potência (120 kW), utilizando apenas diesel como combustível do motor.

As condições referenciadas são do fluxo de exergia e potência gerada pelo modelo matemático proposto.

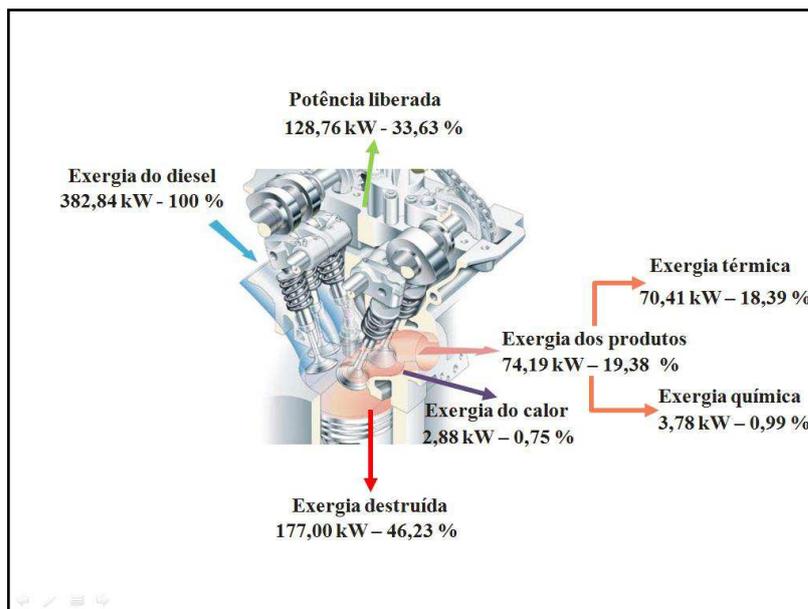


Figura 4.44 – Diagrama do fluxo de exergia com diesel puro em potência máxima.

i) Diagrama do fluxo de exergia na condição dual, na potência de 120 kW

A Figura 4.45 representa o diagrama do fluxo da quantidade de exergia entrando no motor para a condição de operação para menor potência (40 kW), utilizando as misturas diesel, biodiesel e gás natural (B10) como combustível do motor.

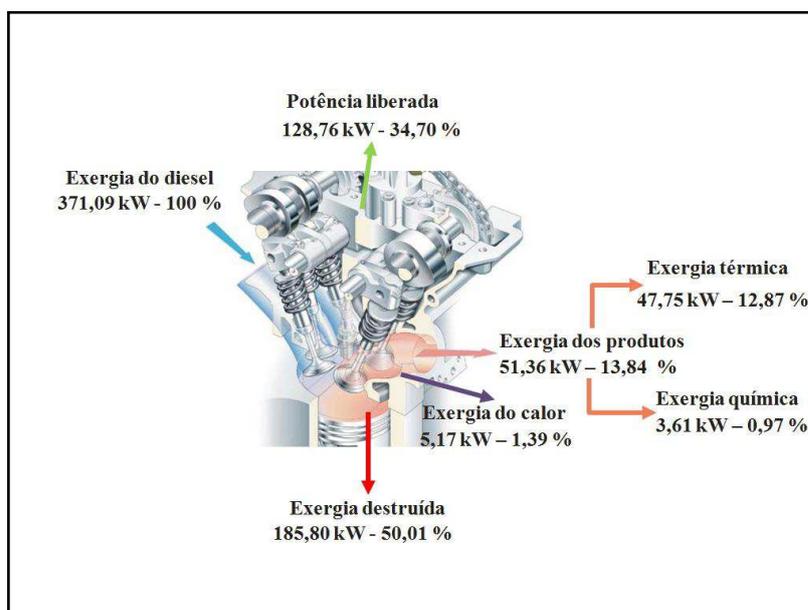


Figura 4.45 – Diagrama do fluxo de exergia com diesel/gás em potência máxima.

j) Diagrama do fluxo de exergia do diesel puro na potência de 40 kW

O fluxo de exergia e a potência prevista pelo modelo são mostrados na Figura 4.46, que apresenta um diagrama mostrando as condições de fluxo de exergia e potência gerada, previstas pelo modelo para a condição de operação com diesel puro e potência mínima.

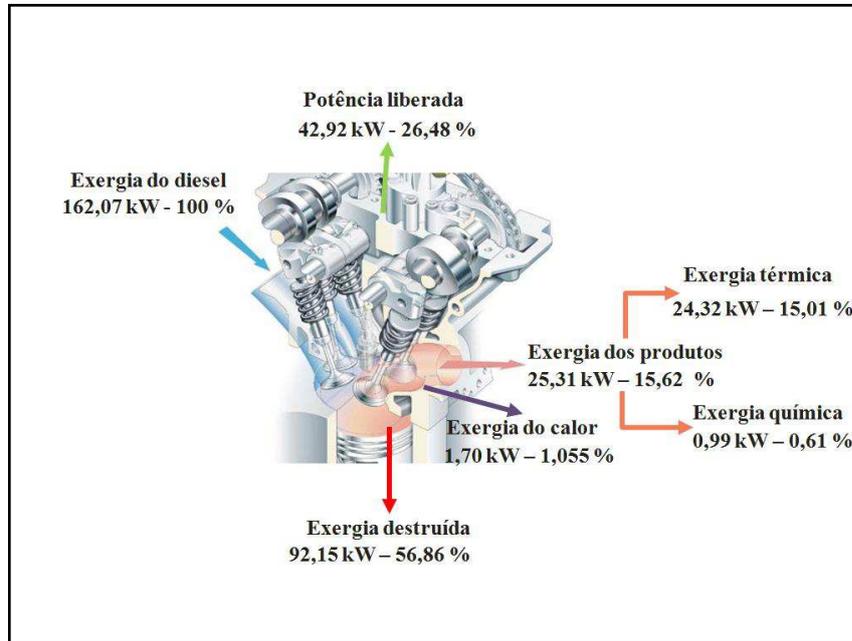


Figura 4.46 – Diagrama do fluxo de exergia com diesel puro na menor potência.

k) Diagrama do fluxo de exergia na condição dual, na potência de 40 kW

A Figura 4.47 apresenta um diagrama mostrando as condições de fluxo de exergia e potência gerada previstas pelo modelo para a condição de operação dual, com diesel e gás natural na condição de potência mínima.

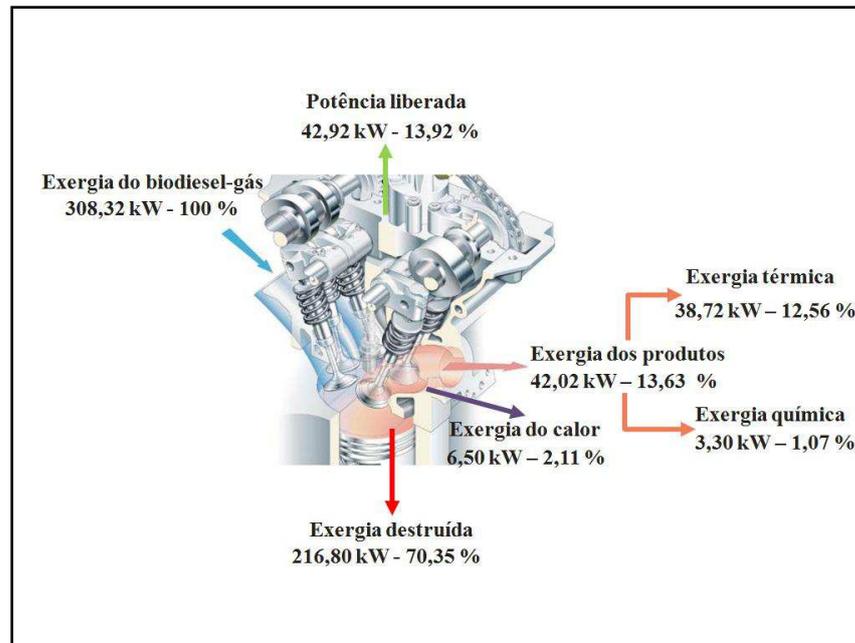


Figura 4.47 – Diagrama do fluxo de exergia com diesel/gás na menor potência.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

5.1.1 Experimentais

Considerando os resultados experimentais realizados no Laboratório de Termogeração Elétrica da UFCG, onde se utilizou um motor de combustão interna do ciclo diesel, operando com diesel comercial B5 e na forma dual (biodiesel/gás natural), pode-se concluir que:

- a) As condições da realização dos experimentos foram consideradas normais, tanto para o motor operando com diesel padrão (B5), quanto para as misturas diesel/biodiesel e gás natural. Considerou-se a rotação de operação do motor como sendo constante, tendo em vista que a variação entre a menor e a maior rotação foi inferior a 0,4%;
- b) Os valores encontrados nos experimentos para o consumo específico do diesel para as condições de potência entre 40kW e 120 kW foram compatíveis com os relatados na literatura pesquisada. O consumo específico apresentou-se elevado na menor potência, diminuindo com a elevação da potência, e permaneceu inferior a 250 g/kWh na potência de 120 kW;

- c) O motor diesel operou com uma taxa de substituição de diesel por gás natural de aproximadamente 85%. Obteve-se a menor taxa de substituição na mistura B30 (84,35) e a maior em B40 (86,28);
- d) Entre as potências de 40 a 100 kW, as curvas de eficiência de combustão das misturas de biodiesel e gás natural apresentaram comportamento de qualidade inferior se comparado ao diesel comercial (B5). Entretanto, na potência de 120 kW, as misturas biodiesel e gás natural superaram o diesel comercial B5 e apresentaram melhor qualidade;
- e) Quanto às emissões das misturas do (B10 + gás natural) a (B100 + gás natural), quando comparadas ao diesel padrão (B5), concluiu-se que:
- O NO_x apresentou redução nas emissões para o (B100 + gás natural);
 - Houve redução das emissões de todas as misturas de (B10 + gás natural) a (B90 + gás natural) para o NO_x , NO e CO_2 ;
 - Todas as emissões de SO_2 das misturas (biodiesel + gás natural) apresentaram qualidade inferior à do diesel padrão (B5). Justifica-se pelo fato do alto percentual de gás na mistura do combustível (85%);
 - Basicamente todas as emissões de O_2 das misturas (biodiesel + gás natural) apresentaram qualidade inferior ao diesel. O excesso de ar apresentado pelos combustíveis justifica a diferença entre ambos;
 - A mistura diesel, biodiesel e gás natural que apresentou o menor custo específico foi a B50 (2,1158 US\$/kWh), bem como o menor consumo específico (224,33 g/kWh).

5.1.2 Teóricos

- a) Nos resultados teóricos, a eficiência de combustão das misturas de biodiesel e gás natural apresentou melhor qualidade quando comparada ao diesel comercial B5;
- b) Comparando os resultados das misturas diesel, biodiesel e gás, entre B10 e B100, a mistura que apresentou melhor eficiência foi a B90;

- c) Tanto nos resultados teóricos quanto nos experimentais, o excesso de ar para o diesel comercial B5 foi maior do que as misturas de diesel, biodiesel e gás natural. Justifica-se o fato, tendo em vista que o motor foi projetado para operar com combustível diesel;
- d) O diesel comercial B5 apresentou menor calor perdido para o ambiente do que as misturas diesel, biodiesel e gás natural;
- e) Na potência de 120 kW, a exergia destruída basicamente foi igual à das misturas diesel, biodiesel e gás natural;
- f) Na potência de 120 kW, a exergia total dos produtos da combustão das misturas diesel, biodiesel e gás natural apresentada foi melhor do que a do diesel comercial B5.

5.2 Sugestões

- a) Realizar experimentos com diesel, biodiesel e gás natural utilizando controle de temperatura do combustível para avaliar sua influência na potência do motor;
- b) Estudar uma forma de aproveitamento do calor perdido no sistema de escapamento, tendo em vista que as temperaturas são bastante elevadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Abdelghaffar, W. A. Performance and Emissions of a Diesel Engine Converted to Dual Diesel-CNG Fuelling. *European Journal of Scientific Research*; v.56, n.2, pp.279-293, 2011.
- [2] Análise Energia - anuário 2010
- [3] Análise Energia - anuário 2011
- [4] Disponível em ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica; <http://www.aneel.gov.br/> acessado em 02/08/2010
- [5] Disponível em ANP, Agência Nacional de Petróleo; www.anp.gov.br acessado em: 16/03/2013
- [6] Disponível em ANP, Agência Nacional de Petróleo; www.anp.gov.br acessado em: 19/07/2011
- [7] Anuário do biodiesel 2011
- [8] Atabani, A. E., Silitonga, A. S., Badruddin, I. A., Mahlia, T. M. I., Masjuki, H. H., Mekhilef, S.: A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* v.16, n.4, p.2070-2093, 2012.

- [9] Aydin, H.; Bayindir, H.; Performance and emission analysis of cottonseed oil methyl ester in a diesel engine. *Renewable Energy*. v.35, n.3, p.588-592, 2010.
- [10] Banapurmath, N. R.; Tewari, P. G.; Hosmath, R. S. Effect of biodiesel derived from Honge oil and its blends with diesel when directly injected at different injection pressures and injection timings in single-cylinder water-cooled compression ignition engine *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part A: Journal of Power and Energy*. p.31-40, 2009.
- [11] Basha, S. A.; Gopal, K. R.; Jebaraj S. A review on biodiesel production, combustion, emissions and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v.13, n.6-7, p.1628-1634, 2009.
- [12] Benjumea, P.; Agudelo, J. R. ; Agudelo, A. F. Effect of the Degree of Unsaturation of Biodiesel Fuels on Engine Performance, Combustion Characteristics, and Emissions. *Energy Fuels*. v.25, n.1, p.77-85, 2011.
- [13] Bhale, P. V.; Deshpande, N. V.; Thombre, S. B. Improving the low temperature properties of biodiesel fuel. *Renewable Energy*. v.34, n.3, p.794-800, 2009.
- [14] Brunetti, F. *Motores de Combustão Interna: Volume 1 – São Paulo: Blucher, 2012.*
- [15] Buyukkaya E. Effects of biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics. *Fuel*. v.89, n.10, p.3099-3105, 2010.
- [16] Canakci, M., Hosoz, M.; Energy and Exergy Analyses of a Diesel Engine Fuelled with Various Biodiesels. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy*. v. 1, n. 4, p. 379-394, 2006.
- [17] Carlucci, A. P., de Risi, A., Laforgia, D., Naccarato, F.: Experimental investigation and combustion analysis of a direct injection dual-fuel diesel-natural gas engine. *Energ.* 33, n.2, p.256-63, 2008.
- [18] Carraretto, C.; Macor, A.; Mirandola, A.; Stoppato, A.; Tonon, S. Biodiesel as alternative fuel: Experimental analysis and energetic evaluations. *Energy*. v.29, n.12-15, p.2195-2211, 2004.

- [19] Cheung, C. S.; Zhu, L.; Huang, Z. Regulated and unregulated emissions from a diesel engine fueled with biodiesel and biodiesel blended with methanol, *Atmospheric Environment*. v.43, n.32, p.4865-4872, 2009.
- [20] Cordiner, S.; Gambino, M.; Iannaccone, S.; Rocco, V.; Scarcelli, R. Numerical and Experimental Analysis of Combustion and Exhaust Emissions in a Dual-Fuel Diesel/Natural Gas Engine, *Energy & Fuels*, v.22, n. pp.1418–1424, 2008
- [21] Costa, Y. J. R. Análise energética e exergetica de um motor de combustão interna operando com diesel e gás natural. 2007. 185f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba.
- [22] Costa, Y. J. R.; Lima, A. G. B.; Bezerra Filho, C. R.; Lima, L. A. Energetic and exergetic analyses of a dual-fuel diesel engine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v.16, n.7 , pp. 4651–4660, 2012.
- [23] Costa, Y. J. R.; Lima, A. G. B.; Grilo, M. B.; Bezerra Filho, C. R.; Lima, A. M. N. Experimental study on diesel engine: the effect of dual fuel operation on exhaust emissions. 19th Internacional Congress of Mechanical Engineering, p.5-9, Nov. 2007, Brasília, DF
- [24] Dantas, M. B.; Conceição, M. M.; Fernandes Jr., V. J.; Santos, N. A.; Rosenhaim, R.; Marques, A. L. B.; Santos, I. M. G.; Souza, A. G. Thermal and kinetic study of corn biodiesel obtained by the methanol and ethanol routes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 73, n.8, p.835–839, 2007.
- [25] Demirbaş, A. Biodiesel fuels from vegetable oils via catalytic and non-catalytic supercritical alcohol transesterifications and other methods: a survey. *Energy Conversion and Management*. v.44, n.13, p.2093-2109, 2003.
- [26] Demirbas, A. *Biodiesel: A Realistic Fuel Alternative For Diesel Engines*. Springer-Verlag, London (2008)
- [27] Escobar, J. C., Lora, E. S., Venturini, O. J., Yañez, E. E., Castillo, E. F., Almazan, O.: Biofuels: Environment, technology and food security *Renewable and Sustainable Energy Review*. v.13, n. 6-7, p.1275–1287, 2009.

- [28] Fazal, M.A., Haseeb, A.S.M.A., Masjuki, H.H.: Biodiesel feasibility study: An evaluation of material compatibility; performance; emission and engine durability. *Renewable and Sustainable Energy Review*. v.15, n.2 p.1314–1324, 2011.
- [29] Ghobadian, B.; Rahimi, H.; Nikbakht, A. M.; Najafi, G.; Yusaf, T. F. Diesel engine performance and exhaust emission analysis using waste cooking biodiesel fuel with an artificial neural network. *Renewable Energy*. v.34, n.4, p.976-982, 2009.
- [30] Godiganur, S.; Murthy, C. S.; Reddy, R. P. Performance and emission characteristics of a Kirloskar HA394 diesel engine operated on fish oil methyl esters. *Renewable Energy*. v.35, n.2, p.355-359, 2010.
- [31] Gupta, K. K., Rehman, A., Sarviya, R. M.: Bio-fuels for the gas turbine: *Renewable and Sustainable Energy Review*. v.14, n.9, p. 2946–2955, 2010.
- [32] Hazar, H. Effects of biodiesel on a low heat loss diesel engine. *Renewable Energy*. v. 34, n.6, p.1533-1537, 2009.
- [33] Incropera, F. P.; Dewitt, D. P.; *Fundamentals of heat and mass transfer*. New York: Editora John Wiley & Sons, 2002.
- [34] Karabektas, M. The effects of turbocharger on the performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with biodiesel. *Renewable Energy*. v.34, n.4, p.989-993, 2009.
- [35] Karim, G. A. A review of combustion processes in the dual engine – the gas diesel engine. *Program Energy Combustion Science*. v. 6, n.3, pp 227-285, 1980.
- [36] Kegl, B.: Effects of biodiesel on emissions of a bus diesel engine. *Bioresource Technol*. v.99, n.4, p. 863–873, 2008.
- [37] Kegl, B.: Influence of biodiesel on engine combustion and emission characteristics. *Applied Energy*. v.88, n.5, p. 1803–1812, 2011.
- [38] Kim, H.; Choi, B. The effect of biodiesel and bioethanol blended diesel fuel on nanoparticles and exhaust emissions from CRDI diesel engine. *Renewable Energy*. v. 35, n.1, p.157-163, 2010.

- [39] Knothe, G. Biodiesel and renewable diesel: A comparison. *Progress in Energy and Combustion Science*. v.36, n.3, p.364-373, 2010.
- [40] Knothe, G. Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters. *Fuel Processing Technology*. v.86, n.10, p.1059-1070, 2005.
- [41] Knothe, G. H. Analyzing biodiesel: Standards and other methods. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. v.83, n.10, p.823-833, 2006.
- [42] Knothe, G. H. Biodiesel Derived from a Feedstock Enriched in Palmitoleic Acid, Macadamia Nut Oil. *Energy and Fuels*. v.24, n.3, p.2098-2103, 2010.
- [43] Knothe, G. H.; Sharp, C. A.; Ryan, T. W. Exhaust emissions of biodiesel, petrodiesel, neat methyl esters, and alkanes in a new technology engine. *Energy and Fuels*. v.20, n. 1, p.403-408, 2005.
- [44] Knothe, G.; Steidley, K. R. Lubricity of components of biodiesel and petrodiesel, The origin of biodiesel lubricity. *Energy and Fuels*. v.19, p.1192-1200, 2005.
- [45] Kotas, T. J. *The exergy method of thermal plant analysis*. London: Butterworths, 1985.
- [46] Lacour, S., Chinese, T., Alkadee, D., Perilhon, C., Descombes, G.: Energy and environmental balance of biogas for dual-fuel mobile applications. *Renewable Sustainable Energy Reviews*. v.16, n.3, 1745– 1753, 2012.
- [47] Leung, D. Y. C.; Wu, X.; Leung, M. K. H. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied Energy*. v.87, n.4, p.1083-1095, 2010.
- [48] Lin, Bai-Fu; Huang, J-H.; Huang, D-Y. Experimental study of the effects of vegetable oil methyl ester on DI diesel engine performance characteristics and pollutant emissions. *Fuel*. v.88, n.9, p.1779-1785, 2009.
- [49] Lin, C. Y.; Li, R-J. Engine performance and emission characteristics of marine fish-oil biodiesel produced from the discarded parts of marine fish. *Fuel Processing Technology*. v.90, n.7-8, p.883-888, 2009.

- [50] Martins, J. Motores de Combustão Interna. Porto – Publindustria, Edições Técnicas. 2011.
- [51] Mbarawa, M., Milton, B. E., Casey, T. C.: Experimental and modeling of natural gas combustion ignited by a pilot diesel fuel spray. International Journal Thermal Sciences. v.40, n.10, 927-936, 2001.
- [52] MEDEIROS, M. A. O.; ARAÚJO, A. S.; FERNANDES, N. S. Estudo comparativo das propriedades físico-químicas do óleo diesel combustível nos estados do RN e PB. In: 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. Rio de Janeiro, 2003. Anais....., CD Rom.
- [53] Misra, R. D., Murthy, M.S.: Blending of additives with biodiesels to improve the cold flow properties, combustion and emission performance in a compression ignition engine. Renewable and sustainable energy reviews. v.15, n.5, 2413–2422, 2011.
- [54] Misra, R. D., Murthy, M.S.: Straight vegetable oils usage in a compression ignition engine. Renewable and sustainable energy reviews. v.14, n.9, p.3005–3013, 2010.
- [55] Mittelbach, M.; Remschmidt C. Biodiesel - The comprehensive Handbook. Published by Universit at Graz, Graz Austria, 2004.
- [56] Moran, M. S.; Shapiro, H. N. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. New York: Editora LTC, 2008.
- [57] Murugesan, A., Umarani, C., Subramanian, R., Nedunchezian, N. Bio-diesel as an alternative fuel for diesel engines. Renewable and sustainable energy reviews. v.13, n3. 653–662. 2009.
- [58] Nabi, Md. N., Akhter, Md. S., Shahadat, M. Md. Z.: Improvement of engine emissions with conventional diesel fuel and diesel–biodiesel blends. Bioresource Technology v.97, n.3, 372–378, 2006.
- [59] Nabi, Md. N.; Hoque, S. M. Najmul; Akhter, Md. Shamim Karanja (Pongamia Pinnata) biodiesel production in Bangladesh, characterization of karanja biodiesel and

- its effect on diesel emissions. *Fuel Processing Technology*. v.90, n.9, p.1080-1086, 2009.
- [60] Nabi, Md. N.; Rahman, Md. M.; Akhter, Md. S. Biodiesel from cotton seed oil and its effect on engine performance and exhaust emissions. *Applied Thermal Engineering*. v.29, n.11-12, p.2265-2270, 2009.
- [61] No, S.-Y.: Inedible vegetable oils and their derivatives for alternative diesel fuels in CI engines: A review. *Renewable Sustainable Energy Reviews*. v.15, n.1, p.131–149, 2011.
- [62] Nogueira, Luiz A.H. Does biodiesel make sense? *Energy*. v.36, n.6, p.3659-3666, 2011.
- [63] Özgünay, H.; Çolak, S.; Zengin, G.; Sari, O.; Sarikahya, H.; Yüceer, L. Performance and emission study of biodiesel from leather industry pre-fleshings, *Waste Management*, v.27, n.12, p.1897-1901, 2007.
- [64] Ozsezen, A. N.; Canakci, M.; Turkcan, A.; Sayin, C. Performance and combustion characteristics of a DI diesel engine fueled with waste palm oil and canola oil methyl esters. *Fuel*. v.88, n.4, p.629-636, 2009.
- [65] Panwar N. L., Kaushik, S. C, Kothari S. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; v.15, p.1513–1524, 2011.
- [66] Papagiannakis R. G. Yfantis, E. A.; Hountalas, D. T.; Zannis, T. C. Theoretical investigation of the factors affecting the performance of a high-speed DI diesel engine fuelled with natural gas. In: *ASME international mechanical engineering congress & exposition (IMECE2008)*, Boston, Massachusetts; v.3, p.66953, 2008.
- [67] Papagiannakis, R. G.; Hountalas, D. T. Combustion and exhaust emission characteristics of a dual fuel compression ignition engine operated with pilot diesel fuel and natural gas. *Energy Convers Manage*; v.45, n.18-19, p.363–75, 2004.

- [68] Papagiannakis, R. G.; Hountalas, D. T.; Kotsiopoulos, P. N. Experimental and theoretical analysis of the combustion and pollutants formation mechanisms in dual fuel DI diesel engines. SAE paper n°.2005-01-1726, 2005.
- [69] Papagiannakis, R. G.; Hountalas, D. T.; Rakopoulos, C. D. Theoretical study of the effects of pilot fuel quantity and its injection advance on the performance and emissions of a dual fuel diesel engine. *Energy Convers Manage*; v.48, n.11, p.2951–2961, 2007.
- [70] Papagiannakis, R. G.; Kotsiopoulos, P. N.; Zannis, T. C.; Yfantis, E. A.; Hountalas, D. T.; and Rakopoulos, C. D.. Theoretical study of the effects of engine parameters on performance and emissions of a pilot ignited natural gas diesel engine, *Energy*; v.35, n.2, p.1129–1138, 2010.
- [71] Papagiannakis, R. G.; Rakopoulos, C. D.; Hountalas, D. T.; Rakopoulos, D. C. Emission characteristics of high speed, dual fuel, compression ignition engine operating in a wide range of natural gas/diesel fuel proportions, *Fuel*; v. 89, n.7, p.1397–1406, 2010.
- [72] Pedersen, K. S., Christensen, P. L.: *Phase Behavior of Petroleum Reservoir Fluids*. CRC Taylor & Francis, Boca Raton (2007)
- [73] Qi, D. H.; Geng, L. M.; Chen, H.; Bian, Y. Z. H.; Liu, J. ; Ren, X. C. H. Combustion and performance evaluation of a diesel engine fueled with biodiesel produced from soybean crude oil. *Renewable Energy*. v.34, n.12, p.2706-2713, Dez. 2009.
- [74] Refaat, A. A. Correlation between the chemical structure of biodiesel and its physical properties. *International Journal of Environmental Science and Technology*. v.6, n. 4, p.677–694, 2009.
- [75] Sahoo, P. K.; Das, L. M.; Babu, M. K. G.; Arora, P.; Singh, V. P.; Kumar, N. R.; Varyani, T. S. Comparative evaluation of performance and emission characteristics of jatropha , karanja and polanga based biodiesel as fuel in a tractor engine. *Fuel*. v.88, n.9, p.1698-1707, 2009.

- [76] Shahid E. M., Jamal Y. A review of biodiesel as vehicular fuel *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v.12, n.9 , p.2484–2494, 2008.
- [77] Sidibé, S. S., Blin, J., Vaitilingom, G., Azoumah, Y.: Use of crude filtered vegetable oil as a fuel in diesel engines state of the art: Literature review. *Renewable Sustainable Energy Reviews*. v.14, n.9 p.2748–2759, 2010.
- [78] Speight, J. G.: *Handbook of Petroleum Product Analysis*. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey (2002)
- [79] Sun, J.; Caton, J. A.; Jacobs, T. J. Oxides of nitrogen emissions from biodiesel-fuelled diesel engines. *Progress in Energy and Combustion Science*. v.36, n.6, p.677-695, 2010.
- [80] Szybist, J. P.; Song, J.; Alam, M.; Boehman, A. L. Biodiesel combustion, emissions and emission control. *Fuel Processing Technology*. v.88, n.7, p.679-691, 2007.
- [81] Tulcan, O. E. P. Estudo do desempenho do grupo motor-gerador alimentado com diferentes misturas diesel-biocombustíveis e avaliação de emissões. 2009. 185f. Tese (Livre Docência) 185f. Tese (Livre Docência) – Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro.
- [82] Ulusoy, Y.; Arslan, R.; Kaplan, C. Emission characteristics of sunflower oil methyl ester. *Energy Sources. Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, v. 31, n.11, p.906–910, 2009.
- [83] Uma, R.; Kandpal ,T.C.; Kishorea, V.V.N. Emission characteristics of an electricity generation system in diesel alone and dual fuel modes. *Biomass and Bioenergy* v.27, n.2, pp. 195-203 -2004.
- [84] Utlu, Z.; Koçak, M. S. The effect of biodiesel fuel obtained from waste frying oil on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions. *Renewable Energy*. v.33, n.8, p.1936-1941, 2008.
- [85] Van Wylen, G. J.; Sonntag, R. E. *Fundamentos da termodinâmica clássica*: São Paulo: 4ª edição, John Wiley & Sons, 1993.

- [86] Vaz, C. E. M.; Maia, J. L. P.; Santos, W. G. Tecnologia da indústria do gás natural: São Paulo: 1^a edição, Blucher, 2008.
- [87] Wu, F.; Wang, J.; Chen, W.; Shuai, S. A study on emission performance of a diesel engine fueled with five typical methyl ester biodiesels. *Atmospheric Environment*. v. 43, n.7, p.1481-1485, 2009.
- [88] Xue, J.; Grift, T. E.; Hansen, A. C. Effect of biodiesel on engine performances and emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v.15, n.2, p.1098-1116, 2011.
- [89] Zheng, M.; Mulenga, M. C.; Reader, G. T.; Meiping, W.; David, S-K.; Ting, J. T. Biodiesel engine performance and emissions in low temperature combustion. *Fuel*. v. 87, n.6, p.714-722, 2008.
- [90] Zhu, L.; Zhang, W.; Liu, W.; Huang, Z. Experimental study on particulate and NOx emissions of a diesel engine fueled with ultra low sulfur diesel, RME-diesel blends and PME-diesel blends. *Science of The Total Environment*. v.408, n.5, p.1050-1058, 2010.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Resultados Experimentais

Apêndice A1

Resultados dos experimentos das misturas B10, B20 e B30 + Gás Natural.

Pot.	Massa	Tempo	Consumo biodiesel	Tx.S.	V.A	V.G.	CO	CO ₂	O ₂	NO	NO _x	SO ₂	Eff. Comb.	Exc. de ar	T.E.S	Temp. ambient	Temp Gás	Temp comb.	Temp. ar ent.
kW	kg	Seg	kg/h	%	m ³ /h	m ³ /h	ppm	%	%	ppm	ppm	ppm	%	%	°C	°C	°C	°C	°C
ENSAIO 01: DIESEL COM 10% BIODIESEL + GÁS																			
40	0,12	246,80	1,75	86,05	761,40	21,20	1285	3,60	14,5	82,00	84,0	6	54,30	231,70	358	31,80	42,00	46,70	37,70
60	0,12	172,40	2,51	85,44	844,56	24,20	1090	4,30	13,3	165,00	170,00	0	56,20	178,60	396	31,80	44,00	53,10	39,30
80	0,20	248,00	2,90	86,23	900,80	28,30	907	5,10	11,9	266,00	273,00	0	58,50	132,20	429	32,00	46,00	56,40	40,60
100	0,20	208,60	3,45	86,23	995,08	30,50	1117	5,90	10,6	332,00	344,00	0	59,90	102,90	461	32,10	48,00	59,80	38,90
120	0,20	162,90	4,42	85,37	1017,28	33,10	694	6,50	9,30	685,00	730,00	0	61,50	81,70	478	32,20	48,00	61,60	43,30
ENSAIO 02: DIESEL COM 20% BIODIESEL + GÁS																			
40	0,12	226,80	1,90	84,81	771,92	19,20	1444	3,60	14,4	93,00	97,00	0	55,30	221,50	353	30,30	36,00	52,00	36,00
60	0,12	163,80	2,64	84,67	832,90	24,50	885	4,10	13,7	164,00	177,00	0	54,80	190,20	396	30,60	40,00	57,00	36,70
80	0,20	220,70	3,26	84,53	910,30	28,20	701	4,90	12,2	300,00	308,00	0	57,80	143,00	424	30,80	41,00	59,00	38,40
100	0,20	196,80	3,66	85,41	964,84	32,10	714	5,70	10,8	507,00	535,00	0	59,70	106,90	454	31,10	42,00	61,00	39,80
120	0,20	154,60	4,66	84,58	1017,64	32,20	746	6,50	9,60	662,00	708,00	0	61,10	84,90	476	31,30	42,00	61,80	41,20
ENSAIO 03: DIESEL COM 30% BIODIESEL + GÁS																			
40	0,12	220,00	1,96	84,35	758,44	19,40	1605	3,90	14,0	88,00	92,00	9	57,30	202,80	350	350,00	34,00	45,00	32,70
60	0,12	167,00	2,59	84,96	845,82	25,70	874	4,40	12,9	195,00	199,00	0	57,00	167,90	396	396,00	38,00	51,70	33,00
80	0,20	230,00	3,13	85,15	918,58	28,00	833	5,10	11,9	285,00	292,00	0	59,00	132,20	423	423,00	41,00	55,80	36,00
100	0,20	196,00	3,67	85,35	1064,96	31,90	693	5,80	10,6	475,00	510,00	0	60,60	104,90	446	446,00	36,00	56,00	32,40
120	0,20	153,00	4,71	84,42	1058,14	32,40	877	6,40	9,50	595,00	598,00	0	61,60	83,30	474	474,00	34,00	58,40	34,20

Apêndice A2

Resultados dos experimentos das misturas B40, B50 e B60 + Gás Natural.

Pot.	Massa	Tempo	Consumo biodiesel	Tx.S.	V.A	V.G	CO	CO ₂	O ₂	NO	NO _x	SO ₂	Eff. Comb	Exc. de ar	T.E.S	Temp. ambient	Temp Gás	Temp comb	Temp. ar ent.
kW	kg	Seg	kg/h	%	m ³ /h	m ³ /h	ppm	%	%	ppm	ppm	ppm	%	%	°C	°C	°C	°C	°C
ENSAIO 04: DIESEL COM 40% BIODIESEL + GÁS																			
40	0,12	223,40	1,93	84,58	767,24	19,20	1652	3,80	14,10	88,00	93,00	16	51,60	207,30	350	31,30	33,00	38,30	33,60
60	0,12	172,10	2,51	85,41	862,00	23,30	1362	4,50	12,80	167,00	176,00	0	53,00	158,00	394	31,60	36,00	46,60	36,40
80	0,20	232,70	3,09	85,32	943,80	27,10	1119	5,20	11,60	256,00	268,00	0	54,70	124,70	426	31,70	36,00	49,60	37,20
100	0,20	209,30	3,44	86,28	1034,34	28,20	1307	5,70	10,70	366,00	381,00	0	54,70	106,90	457	31,70	34,00	55,60	39,90
120	0,20	166,90	4,31	85,72	1034,96	31,90	740	6,30	9,70	613,00	660,00	0	56,70	86,60	472	31,80	35,00	58,40	40,10
ENSAIO 05: DIESEL COM 50% BIODIESEL + GÁS																			
40	0,12	248,00	1,74	86,11	774,78	19,30	1454	3,90	14,10	91,00	94,00	0	56,70	207,30	353	27,10	32,00	44,80	32,70
60	0,12	162,10	2,67	84,51	831,64	21,90	1527	4,60	12,80	154,00	162,00	0	57,50	158,00	396	27,50	31,00	50,70	33,40
80	0,20	218,20	3,30	84,35	923,60	25,40	1540	5,20	11,70	211,00	222,00	0	58,30	127,10	430	27,90	31,00	54,30	36,30
100	0,20	183,70	3,92	84,37	996,52	28,10	1243	5,70	10,80	307,00	324,00	0	59,10	106,90	455	28,20	32,00	56,30	37,70
120	0,20	151,80	4,74	84,30	1050,14	30,80	744	6,40	9,70	617,00	647,00	0	61,20	86,60	472	28,70	32,00	57,60	39,10
ENSAIO 06: DIESEL COM 60% BIODIESEL + GÁS																			
40	0,12	224,20	1,93	84,64	736,98	19,10	1743	3,90	14,10	100,00	103,00	29	57,00	207,30	347,00	27,40	36,00	38,90	32,40
60	0,12	178,40	2,42	85,92	826,78	24,00	1397	4,50	13,00	164,00	170,00	24	56,40	167,90	396,00	27,80	40,00	47,80	34,70
80	0,20	228,90	3,15	85,08	906,90	27,40	1407	5,20	11,70	243,00	239,00	15	58,50	127,10	428,00	27,60	42,00	51,90	36,30
100	0,20	193,00	3,73	85,12	1011,62	30,80	1198	5,80	10,70	334,00	350,00	0	59,40	104,90	456,00	28,10	44,00	56,20	36,40
120	0,20	170,10	4,23	85,99	1017,98	33,70	707	6,40	9,60	648,00	689,00	0	61,30	84,90	470,00	28,20	46,00	58,60	39,50

Apêndice A3

Resultados dos experimentos das misturas B70, B80 e B90 + Gás Natural.

Pot.	Massa	Tempo	Consumo biodiesel	Tx.S	V.A	V.G	CO	CO ₂	O ₂	NO	NO _x	SO ₂	Eff. Comb	Exc. de ar	T.E.S	Temp. ambient	Temp Gás	Temp comb	Temp. ar ent.
kW	kg	Seg	kg/h	%	m ³ /h	m ³ /h	ppm	%	%	ppm	ppm	ppm	%	%	°C	°C	°C	°C	°C
ENSAIO 07: DIESEL COM 70% BIODIESEL + GÁS																			
40	0,12	245,00	1,76	85,94	754,84	19,90	1391	3,70	14,40	86,00	91,00	15	55,80	221,50	345,00	28,30	31,00	39,60	28,50
60	0,12	172,30	2,51	85,43	836,66	22,70	1439	4,50	13,10	171,00	180,00	17	58,00	164,50	385,00	28,00	32,00	45,10	31,30
80	0,20	225,10	3,20	84,83	924,22	25,40	1486	5,20	11,80	242,00	267,00	11	59,20	129,60	418,00	27,50	32,00	49,00	32,10
100	0,20	195,60	3,68	85,32	1011,98	28,80	1278	5,70	10,90	344,00	362,00	0	59,80	109,00	446,00	28,80	33,00	52,30	35,80
120	0,20	164,40	4,38	85,50	1022,56	31,80	767	6,30	9,80	605,00	654,00	0	61,20	88,20	464,00	28,30	35,00	54,80	38,90
ENSAIO 08: DIESEL COM 80% BIODIESEL + GÁS																			
40	0,12	224,60	1,92	84,67	750,90	20,20	1528	3,60	14,40	94,00	95,00	9	54,70	226,50	350,00	29,80	38,00	45,10	33,60
60	0,12	170,70	2,53	85,29	832,72	23,40	1434	4,50	13,00	168,00	177,00	13	57,00	167,90	393,00	30,00	39,00	50,70	34,60
80	0,20	228,30	3,15	85,04	920,00	27,40	1464	5,20	11,70	242,00	250,00	11	58,70	127,10	428,00	29,60	42,00	55,40	36,40
100	0,20	204,20	3,53	85,94	989,34	30,80	1123	5,80	10,80	338,00	355,00	0	59,40	106,90	452,00	28,40	44,00	57,60	37,80
120	0,20	163,60	4,40	85,43	1011,88	33,40	717	6,40	9,70	638,00	679,00	0	61,60	86,60	466,00	28,10	45,00	58,10	38,00
ENSAIO 09: DIESEL COM 90% BIODIESEL + GÁS																			
40	0,24	477,30	1,81	85,57	757,28	19,90	1272	3,60	14,80	84,00	91,00	4	53,60	237,00	350,00	27,40	32,00	50,30	30,60
60	0,12	177,10	2,44	85,82	827,60	22,90	1332	4,30	13,20	165,00	177,00	8	56,20	175,00	390,00	28,20	32,00	53,80	30,90
80	0,20	232,80	3,09	85,33	910,48	25,80	1412	5,20	11,80	239,00	261,00	7	58,70	129,60	425,00	28,80	33,00	55,90	31,40
100	0,20	199,00	3,62	85,57	992,22	28,90	1115	5,70	10,80	345,00	359,00	0	59,50	106,90	450,00	29,30	33,00	57,20	31,90
120	0,20	167,20	4,31	85,75	998,06	31,70	689	6,40	9,70	713,00	769,00	0	61,70	86,60	467,00	29,70	34,00	58,30	32,80

Apêndice A4

Resultados dos experimentos da mistura B100+ Gás Natural.

Pot.	Massa	Tempo	Consumo biodiesel	Tx.S	V.A	V.G	CO	CO ₂	O ₂	NO	NO _x	SO ₂	Eff. Comb	Exc. de ar	T.E.S	Temp amb.	Temp Gás	Temp comb	Temp. ar ent.
kW	kg	Seg	kg/h	%	m ³ /h	m ³ /h	ppm	%	%	ppm	ppm	ppm	%	%	°C	°C	°C	°C	°C
ENSAIO 10: DIESEL COM 100% BIODIESEL + GÁS																			
40	0,24	244,00	1,77	85,89	764,10	20,90	1243	3,50	14,60	82,00	84,00	11	54,10	237,00	350,00	30,10	38,00	39,70	33,50
60	0,12	174,50	2,48	85,61	825,98	23,50	1447	4,50	12,90	159,00	168,00	16	58,10	164,50	391,00	29,80	38,00	44,20	33,60
80	0,20	245,00	2,94	86,06	916,24	26,70	1393	5,20	11,70	224,00	234,00	9	58,90	127,10	424,00	29,00	38,00	47,80	33,60
100	0,20	208,80	3,45	86,25	961,94	30,00	1074	5,80	10,70	351,00	372,00	0	60,60	102,90	449,00	28,70	38,00	50,20	35,10
120	0,20	162,30	4,44	85,32	1013,5	32,50	697	6,40	9,60	665,00	706,00	0	61,60	83,30	465,00	28,30	39,00	54,40	35,20

Apêndice A5

Resultados do experimento com diesel comercial (B5)

Pot.	Massa	Tempo	Consumo P. D.	V.A.	CO	CO ₂	O ₂	NO	NO _x	SO ₂	Eff Comb.	Exc. de ar	T.E.S	Temp amb.	Temp Gás	Temp comb	Temp. ar ent.
Kw	Kg	Seg	Kg/h	m ³ /h	ppm	%	%	ppm	ppm	ppm	%	%	°C	°C	°C	°C	°C
ENSAIO 11: DIESEL COMERCIAL 100% BIODIESEL + GÁS																	
40	0,30	86,30	12,51	734,00	136,00	4,70	14,70	309,00	324,00	0,00	59,60	237,00	355,00	32,30		41,90	32,40
60	0,40	87,60	16,44	835,86	113,00	5,50	13,70	446,00	467,00	0,00	59,50	190,20	389,00	32,40		43,50	33,50
80	0,40	69,70	20,66	939,22	103,00	6,20	12,70	558,00	583,00	0,00	60,00	154,80	426,00	32,60		45,60	34,40
100	0,60	86,90	24,86	1057,80	116,00	6,90	11,90	670,00	696,00	0,00	59,40	132,20	468,00	32,80		49,80	35,20
120	0,60	73,10	29,55	1188,00	155,00	7,50	11,00	746,00	778,00	0,00	58,70	111,10	512,00	32,90		51,90	36,30

Legenda:

Pot.: Potência

P.D : Padrão Diesel.

Tx.S : Taxa de Substituição.

V.A.:Vazão de Ar

V.G : Vazão de Gás.

Eff. Comb.: Eficiência de Combustão

Exc. Ar.: Excesso de Ar

T.E.S : Temperatura dos Gases de Escape na Sonda.

Temp. Amb.: Temperatura Ambiente

Temp. Gás.: Temperatura do Gás

Temp. Comb.: Temperatura do Combustível (diesel/biodiesel)

Temp. ar ent.: Temperatura do ar de entrada

- 1) Ensaios com adição em volume de biodiesel ao percentual diesel, utilizando como combustível “primário ou piloto” na mistura (Diesel-GNV)
- 2) As misturas ensaiadas ficaram com valores entre 10% (B10) e 90% (B90) de biodiesel, variando de 10 em 10%.
- 3) Também foi realizado um ensaio com 100% (B100) de biodiesel (biodiesel puro como combustível primário ou piloto)
- 4) A taxa de substituição de "diesel" por "gnv" foi da ordem aproximada de 85%, para todos os ensaios
- 5) Todos os ensaios foram realizados gerando energia elétrica diretamente para a rede interna de alimentação elétrica da UFCG.
- 6) Foi adotado a mesma convenção utilizada na literatura sobre biodiesel, ou seja: B10, B20, B30, B40, B50, B60, B70, B80, B90 e B100 para designar os percentuais de biodiesel contido na mistura (Diesel / Biodiesel)

Apêndice A6

Resultados Experimentais da operação do motor com B5, B10, B20 e B30+85% de GNV

Potência (kW) Elétrica	Temperatura (°C)			Pressão (bar)		Rotoção (RPM)	Taxa de fluxo de massa (kg/h)			Temperatura (°C)	
	Água		Óleo Lubrificante	Coletor Admissão	Ambiente	Motor	Diesel/biodiesel	Ar	Gás	Amb.	Combust.
	Entrada	Saída									
B5 – Padrão Diesel (Óleo Diesel fornecido nas bombas de abastecimento, com adição de 5% de biodiesel por Lei Federal.)											
40	65	79	96	1,55	0,95	1803	12,51	795,28		32,30	41,90
60	66	82	100	1,78	0,95	1802	16,44	905,35		32,40	43,50
80	67	83	104	2,01	0,95	1802	20,66	1016,64		32,60	45,60
100	68	86	104	2,27	0,95	1793	24,86	1144,25		32,80	49,80
120	70	89	106	2,54	0,95	1802	29,59	1284,67		32,90	51,90
B10+85% de GNV											
40	62	82	62	1.45	0.95	1795	1.75	829,25	14,96	31.80	46.70
60	64	84	66	1.59	0.95	1795	2.51	916,57	17,07	31.80	53.10
80	65	86	70	1.73	0.95	1793	2.90	976,97	19,95	32.00	56.40
100	66	86	76	1.89	0.95	1792	3.45	1078,87	21,49	32.10	59.80
120	68	90	77	1,96	0,95	1792	4,42	1102,58	23,32	32,20	61,60
B20+85% de GNV											
40	62	81	59	1.47	0.95	1792	1.90	841,88	13,61	36.00	52.00
60	62	83	62	1.61	0.95	1793	2.64	907,49	17,35	36.70	57.00
80	63	86	71	1.74	0.95	1796	3.26	991,17	19,96	38.40	59.00
100	64	86	77	1.86	0.95	1794	3.66	1049,50	22,70	39.80	61.00
120	65	88	77	1,97	0,95	1794	4,66	1106,23	22,75	31,30	63,00
B30+85% de GNV											
40	61	79	59,00	1.45	0.95	1792	1.96	823,11	13,69	32.70	45.00
60	62	81	61,00	1.63	0.95	1795	2.59	917,14	18,13	33.00	51.70
80	62	83	67,00	1.77	0.95	1792	3.13	996,25	19,74	36.00	55.80
100	61	86	75,00	2.04	0.95	1795	3.67	1154,63	22,48	32.40	56.00
120	62	86	76,00	2,03	0,95	1795	4,71	1146,86	22,83	31,40	58,40

Apêndice A7

Resultados Experimentais da operação do motor com B40, B50 e B60+85% de GNV

Potência (kW) Elétrica	Temperatura (°C) Água		Óleo Lubrificante	Pressão (bar) Coletor Admissão		Rotação (RPM) Motor	Taxa de fluxo de massa (kg/h) Diesel/biodiesel			Temperatura (°C) Amb.		Combust.
	Entrada	Saída		Ambiente	Diesel/biodiesel		Ar	Gás	Amb.	Combust.		
B40+85% de GNV												
40	62,00	84,00	61,00	1,48	0,97	1808	1,93	850,19	13,83	31,30	38,30	
60	63,00	86,00	63,00	1,65	0,97	1810	2,51	955,20	16,78	31,60	46,60	
80	59,00	87,00	72,00	1,82	0,98	1824	3,09	1055,93	19,71	31,70	49,60	
100	55,00	89,00	76,00	1,96	0,98	1816	3,44	1156,85	20,50	31,70	55,60	
120	55,00	90,00	77,00	2,04	0,98	1816	4,31	1157,16	23,18	31,80	58,40	
B50+85% de GNV												
40	82,00	86,00	57,00	1,50	0,97	1815	1,74	860,00	13,92	27,10	44,80	
60	62,00	86,00	62,00	1,65	0,97	1812	2,67	922,16	15,78	27,50	50,70	
80	62,00	86,00	66,00	1,82	0,97	1815	3,30	1023,79	18,30	27,90	54,30	
100	62,00	88,00	69,00	1,97	0,97	1814	3,92	1104,62	20,25	28,20	56,30	
120	62,00	90,00	77,00	2,03	0,97	1817	4,74	1163,68	22,18	28,70	57,60	
B60+85% de GNV												
40	63,00	84,00	58,00	1,47	0,96	1806	1,93	820,07	13,81	27,40	32,40	
60	64,00	86,00	62,00	1,63	0,96	1808	2,42	918,78	17,34	27,80	34,70	
80	64,00	86,00	65,00	1,80	0,96	1807	3,15	1008,48	19,80	27,60	36,30	
100	66,00	88,00	73,00	1,93	0,97	1810	3,73	1134,76	22,46	28,10	36,40	
120	66,00	88,00	76,00	2,01	0,96	1805	4,23	1129,75	24,31	28,20	39,50	
B70+85% de GNV												
40	60,00	81,00	55,00	1,49	0,97	1808	1,76	837,44	14,35	28,30	39,60	
60	61,00	83,00	61,00	1,64	0,97	1812	2,51	928,03	16,39	28,00	45,10	
80	61,00	86,00	62,00	1,82	0,97	1809	3,20	1028,08	18,37	27,50	49,00	
100	62,00	86,00	64,00	1,96	0,97	1810	3,68	1132,53	20,95	28,80	52,30	
120	62,00	86,00	70,00	2,05	0,97	1810	4,38	1134,45	22,93	28,30	54,80	

Apêndice A8

Resultados Experimentais da operação do motor com B80, B90 e B100+85% de GNV

Potência (kW) Elétrica	Temperatura (°C)			Pressão (bar)		Rotação (RPM) Motor	Taxa de fluxo de massa (kg/h)			Temperatura (°C)	
	Água		Óleo Lubrificante	Coletor Admissão	Ambiente		Diesel/biodiesel	Ar	Gás	Amb.	Combust.
	Entrada	Saída									
B80+85% de GNV											
40	62,00	82,00	58,00	1,48	0,97	1809	1,92	828,94	14,49	29,80	45,10
60	62,00	84,00	62,00	1,62	0,97	1810	2,53	918,66	16,78	30,00	50,70
80	63,00	86,00	62,00	1,79	0,97	1809	3,15	1016,29	19,67	29,60	55,40
100	65,00	86,00	70,00	1,93	0,97	1813	3,53	1108,67	22,43	28,40	57,60
120	65,00	87,00	70,00	2,01	0,97	1812	4,40	1123,35	24,10	28,10	58,10
B90+85% de GNV											
40	61,00	84,00	59,00	1,49	0,97	1809	1,81	842,66	14,39	27,40	50,30
60	61,00	86,00	62,00	1,62	0,97	1810	2,44	918,47	16,52	28,40	53,80
80	62,00	86,00	66,00	1,79	0,97	1809	3,09	1008,47	18,57	28,80	55,90
100	62,00	86,00	69,00	1,93	0,97	1813	3,62	1108,58	20,99	29,30	57,20
120	62,00	89,00	71,00	1,98	0,97	1812	4,31	1102,16	22,75	29,70	58,30
B100+85% de GNV											
40	62,00	85,00	57,00	1,49	0,97	1813	1,77	842,68	14,98	30,10	39,70
60	62,00	86,00	61,00	1,63	0,97	1812	2,48	911,83	16,86	29,80	44,20
80	62,00	86,00	62,00	1,81	0,97	1813	2,94	1014,15	19,21	29,00	47,80
100	62,00	86,00	67,00	1,93	0,97	1814	3,45	1076,89	21,83	28,70	50,20
120	63,00	89,00	70,00	2,02	0,97	1815	4,44	1124,40	23,44	28,30	54,40

APÊNDICE B
Resultados Teóricos

Apêndice B1

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B10 + gás natural**
(Potência de 40 a 120kW)

AC kg de ar/kg de combust.	AC _i kg de ar/kg de combust.	C _p C ₁₂ H ₂₆ (kJ/kg°C)	C _p C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kg°C)	C _p _s (kJ/kg°C)	ε (%)	η _{PCI} (%)	E _{PCI} (kW)	fmolarPer (%)	fmolar H ₂ Ovp (%)
49,527	17,242	2,21	2,075	0,708	13,9200	14,5488	295,00	9,468172	0,094682
42,512	17,312	2,21	2,075	0,708	24,5388	25,6823	250,67	10,591690	0,105917
36,406	17,447	2,21	2,075	0,708	28,0343	29,3397	292,56	11,946965	0,119470
31,655	17,346	2,21	2,075	0,708	32,1250	33,6311	319,04	12,890063	0,128901
29,333	17,709	2,21	2,075	0,708	34,6962	36,3430	354,28	14,212531	0,142125

hp CH ₄ (kJ/kg)	hp CO (kJ/kg)	hp CO ₂ (kJ/kg)	hp H ₂ O (kJ/kg)	hp N ₂ (kJ/kg)	hp NO (kJ/kg)	hp NO ₂ (kJ/kg)	hp O ₂ (kJ/kg)	hp SO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} CH ₄ (kJ/kg)
-3743,50	-3592,61	-8614,81	-12777,33	350,99	3357,03	1036,96	320,55	-4403,20	-1850,60
-3613,10	-3550,62	-8572,98	-12699,45	392,39	3397,23	1075,77	359,26	-4373,71	-1319,71
-3495,87	-3513,86	-8536,09	-12631,0	428,64	3432,44	1109,98	393,17	-4347,77	-676,33
-3378,73	-3477,96	-8499,84	-12563,88	464,05	3466,82	1143,57	426,31	-4322,33	-18,72
-3315,16	-3458,78	-8480,40	-12527,93	482,97	3485,18	1161,57	444,00	-4308,71	375,50

hp _{Tad} CO (kJ/kg)	hp _{Tad} CO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} H ₂ O (kJ/kg)	hp _{Tad} N ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} NO (kJ/kg)	hp _{Tad} NO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} O ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} SO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} teco CO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} teco H ₂ O (kJ/kg)
-3057,22	-8065,20	-11756,37	879,69	3869,23	1543,95	813,67	-4021,70	-7065,56	-9800,94
-2923,70	-7925,10	-11491,74	1011,76	3996,58	1671,94	936,00	-3926,66	-7011,41	-9690,59
-2767,04	-7760,05	-11176,19	1166,76	4145,76	1822,11	1079,23	-3815,89	-6951,26	-9567,49
-2611,30	-7595,51	-10857,31	1320,86	4293,80	1971,23	1221,34	-3706,66	-6856,47	-9372,47
-2519,60	-7498,49	-10667,24	1411,58	4380,85	2058,91	1304,93	-3642,72	-6894,06	-9449,95

hp _{Tad} teco N ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} teco SO ₂ (kJ/kg)	hra H ₂ O (kJ/kg)	hra N ₂ (kJ/kg)	hra O ₂ (kJ/kg)	hr C ₁₂ H ₂₆ (kJ/kg)	hr C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kg)	hr C ₂ H ₆ (kJ/kg)	hr C ₃ H ₈ (kJ/kg)	hr C ₄ H ₁₀ (kJ/kg)
1815,90	-3359,60	-13398,73	13,23	11,70	-2021,79	-2137	-2785,13	-2325,86	-2140,62
1866,45	-3324,16	-13395,74	14,90	13,17	-2007,65	-2124	-2781,45	-2322,34	-2137,04
1922,61	-3284,71	-13393,3	16,25	14,37	-2000,35	-2117	-2777,76	-2318,81	-2133,44
2011,13	-3222,24	-13394,8	15,42	13,64	-1992,62	-2110	-2774,04	-2315,25	-2129,82
1976,03	-3247,06	-13388,24	19,07	16,86	-1988,86	-2106	-2774,04	-2315,25	-2129,82

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B10 + gás natural**
(Potência de 40 a 120kW) (Continuação)

hr CH ₄ (kJ/kg)	hr CO ₂ (kJ/kg)	hr N ₂ (kJ/kg)	hr O ₂ (kJ/kg)	hr S (kJ/kg)	H _p (kW)	H _{pTad} (kW)	H _{pTadteo} (kW)	H _r (kW)	$\dot{m}_{\text{produtos}}$ (kg/s)
-4628,31	-8927,170	17,71	15,66	15,36	-293,69	-115,16	-115,16	-115,16	0,322111
-4623,74	-8925,450	19,80	17,50	19,89	-247,74	-92,68	-92,68	-92,68	0,236659
-4619,15	-8923,730	21,88	19,35	22,23	-288,88	-101,43	-101,43	-101,43	0,237424
-4614,56	-8922,000	23,97	21,19	24,71	-305,96	-96,80	-96,80	-96,80	0,226227
-4614,56	-8922,000	23,97	21,19	25,91	-352,72	-116,09	-116,09	-116,09	0,233733

\dot{m}_{prodteo} (kg/s)	$\dot{m}_{\text{reagentes}}$ (kg/s)	\dot{m}_{reagteo} (kg/s)	\dot{m}_d (kg/h)	\dot{m}_g (kg/h)	\dot{m}_{ar} (kg/h)	M _{ar} (kg/kmol)	M _{C₁₂H₂₆} (kg/kmol)	M _{C_{18,74}H_{34,43}O₂} (kg/kmol)	M _{C₂H₆} (kg/kmol)
0,116565	0,322110	0,116292	1,75	21,20	829,25	28,97	170,33	291,80	30,07
0,099852	0,236659	0,099596	2,51	17,07	916,57	28,97	170,33	291,80	30,07
0,117410	0,237424	0,117086	2,90	19,95	976,97	28,97	170,33	291,80	30,07
0,127433	0,226226	0,127097	3,45	21,49	1078,87	28,97	170,33	291,80	30,07
0,144626	0,233733	0,144163	4,42	23,32	1102,58	28,97	170,33	291,80	30,07

M _{C₃H₈} (kg/kmol)	M _{C₄H₁₀} (kg/kmol)	M _{CH₄} (kg/kmol)	M _{CO} (kg/kmol)	M _{CO₂} (kg/kmol)	M _{diesel blend} (kg/kmol)	M _{gas} (kg/kmol)	M _{H₂O} (kg/kmol)	M _{N₂} (kg/kmol)	M _{NO} (kg/kmol)
44,10	58,12	16,04	28,01	44,01	180,6	17,81	18,02	28,01	30,01
44,10	58,12	16,04	28,01	44,01	180,6	17,81	18,02	28,01	30,01
44,10	58,12	16,04	28,01	44,01	180,6	17,81	18,02	28,01	30,01
44,10	58,12	16,04	28,01	44,01	180,6	17,81	18,02	28,01	30,01
44,10	58,12	16,04	28,01	44,01	180,6	17,81	18,02	28,01	30,01

M _{NO₂} (kg/kmol)	M _{O₂} (kg/kmol)	M _S (kg/kmol)	M _{SO₂} (kg/kmol)	\dot{n}_d (kmol/s)	\dot{n}_g (kmol/s)	$n_{\text{moles}_{\text{prod}}}$ (kmol)	\dot{n}_p (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt CO}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt H}_2\text{O}}$ (kmol/s)
46,01	32	32	64,06	3,00E-06	0,000331	0,011456	0,010371	0,000387	0,000839
46,01	32	32	64,06	4,00E-06	0,000266	0,008436	0,007542	0,000333	0,000716
46,01	32	32	64,06	4,00E-06	0,000311	0,008489	0,007475	0,000388	0,000848
46,01	32	32	64,06	5,00E-06	0,000335	0,008101	0,007057	0,000424	0,000914
46,01	32	32	64,06	7,00E-06	0,000364	0,008399	0,007206	0,000473	0,001054

$\dot{n}_{\text{pt N}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt SO}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{p H}_2\text{O}}$ (kmol/s)	$\dot{n}_t \text{O}_2$ (kmol/s)	\dot{n}_{O_2} (kmol/s)	PCI _{C₁₂H₂₆} (kJ/kg)	PCI _{C_{18,74}H_{34,43}O₂} (kJ/kg)	PCI _{C₂H₆} (kJ/kg)	PCI _{C₃H₈} (kJ/kg)	PCI _{C₄H₁₀} (kJ/kg)
0,003014	0	0,000839	0,0008	0,002249	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,002581	0	0,000716	0,000686	0,001644	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,003036	0	0,000848	0,000806	0,00164	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,003294	0	0,000914	0,000875	0,001558	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,003741	0	0,001054	0,000994	0,001598	44143,18	37388	47480	46360	45720

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B10 + gás natural**
(Potência de 40 a 120kW) (continuação)

PCI_{CH_4} (kJ/kg)	PCI_{CO_2} (kJ/kg)	PCI_{N_2} (kJ/kg)	PCI_{O_2} (kJ/kg)	PCI_s (kJ/kg)	ϕ (%)	P_a (kPa)	P_p (kPa)	P_{va} (kPa)	P_{vp} (kPa)
50020	0	0	0	9259	50	95	101,33	3,261503	9,593625
50020	0	0	0	9259	50	95	101,33	3,555193	10,73203
50020	0	0	0	9259	50	95	101,33	3,810370	12,10526
50020	0	0	0	9259	50	95	101,33	3,651534	13,06086
50020	0	0	0	9259	50	95	101,33	4,391273	14,40085

\dot{Q} (kW)	rend (%)	\bar{R} (kJ/kmolK)	T_{ad} (C)	$T_{ad,arteorico}$ (C)	T_0 (K)	T_a (C)	T_d (C)	T_g (C)	$T_{orvalho}$ (C)
-135,61	0,932	8,314	822,16	1580,20	298,15	37,7	46,7	42	44,98
-90,68	0,932	8,314	932,66	1619,90	298,15	39,3	53,1	44	47,18
-101,62	0,932	8,314	1060,46	1663,90	298,15	40,6	56,4	46	49,58
-101,87	0,932	8,314	1185,83	1733,06	298,15	39,8	59,9	48	51,11
-107,88	0,932	8,314	1258,98	1705,67	298,15	43,3	61,6	48	53,11

T_p (C)	T_{ref} (C)	w	\dot{W} (kW)	W_{res} (kW)	X _{Air} (%)	$\bar{X}_{C_{12}H_{26}l_0}$ (kJ/kmol)	$\bar{X}_{C_{12}H_{26}, quim}$ (kJ/kmol)	$\bar{X}_{C_{18,74}H_{34,43}O_2l_0}$ (kJ/kmol)	$\bar{X}_{C_{18,74}H_{34,43}O_2l_0, quim}$ (kJ/kmol)
358	25	0,022113	42,92	40	187,25	8059340	8059340	11700000	11700000
396	25	0,024182	64,38	60	145,57	8059340	8059340	11700000	11700000
429	25	0,02599	85,84	80	108,67	8059340	8059340	11700000	11700000
461	25	0,024864	107,3	100	82,49	8059340	8059340	11700000	11700000
478	25	0,030145	128,76	120	65,64	8059340	8059340	11700000	11700000

$\bar{X}_{C_2H_6 l_0}$ (kJ/kmol)	$\bar{X}_{C_2H_6, quim}$ (kJ/kmol)	$\bar{X}_{C_3H_8 l_0}$ (kJ/kmol)	$\bar{X}_{C_3H_8, quim}$ (kJ/kmol)	$\bar{X}_{C_4H_{10} l_0}$ (kJ/kmol)	$\bar{X}_{C_4H_{10}, quim}$ (kJ/kmol)	$\bar{X}_{CH_4 quim}$ (kJ/kmol)	$\bar{X}_{CO_2 l_0}$ (kJ/kmol)	$\bar{X}_{CO_2, quim}$ (kJ/kmol)	$\bar{X}_{N_2 l_0}$ (kJ/kmol)
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720

$\bar{X}_{N_2, quim}$ (kJ/kmol)	$\bar{X}_{O_2 l_0}$ (kJ/kmol)	$\bar{X}_{O_2, quim}$ (kJ/kmol)	$\bar{X}_{SO_2 l_0}$ (kJ/kmol)	\dot{X} (kW)	\dot{X}_d (kW)	\dot{X}_g (kW)	yd $C_{12}H_{26}$ (kmol/kmol)	yd $C_{18,74}H_{34,43}O_2$ (kJ/kmol)	yd _s
-10103,4	3970	-13706,9	303500	308,32	22,4	285,92	0,88677	0,1	0,01323
-10103,4	3970	-13706,9	303500	262,35	32,13	230,22	0,88677	0,1	0,01323
-10103,4	3970	-13706,9	303500	306,19	37,12	269,06	0,88677	0,1	0,01323
-10103,4	3970	-13706,9	303500	334	44,16	289,83	0,88677	0,1	0,01323
-10103,4	3970	-13706,9	303500	371,09	56,58	314,51	0,88677	0,1	0,01323

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B10 + gás natural**
(Potência de 40 a 120kW) (continuação)

Yg C2H6	Yg C3H8	Yg C4H10	Yg CH4	Yg CO2	Yg N2	Yg O2	Yp CH4	Yp CO	Yp CO2
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	0	0,001285	0,036
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	0	0,001090	0,043
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	0	0,000907	0,051
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	0	0,001117	0,059
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	0	0,000694	0,065

Yp N2	Yp NO	Yp NO2	Yp O2	Yp SO2	η_{combCa}	η_{comb}	\dot{X} destruída (kW)	\dot{X} p (kW)	\dot{X} p. quim (kW)
0,815800	8,20E-05	2,00E-06	0,146827	3,00E-06	34,8129	60,5193	216,9	42,02	3,298
0,819825	0,000165	5,00E-06	0,135908	7,00E-06	40,7219	61,8581	156,9	36,71	2,496
0,825265	0,000266	7,00E-06	0,122548	8,00E-06	47,9232	64,0726	173,0	42,49	2,730
0,830569	0,000332	1,20E-05	0,10896	1,00E-05	54,7971	65,5620	175,0	46,83	3,714
0,833888	0,000685	4,50E-05	0,099675	1,20E-05	60,3722	66,7926	185,8	51,36	3,606

\dot{X} p_term (kW)	\dot{X} q (kW)
38,72	6,496
34,21	4,344
39,76	4,867
43,12	4,88
47,75	5,167

Apêndice B2

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B20 + gás natural**
(Potência de 40 a 120kW)

AC kg de ar/kg de combust.	AC _t kg de ar/kg de combust.	C _p C ₁₂ H ₂₆ (kJ/kg°C)	C _p C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kg°C)	C _{p_s} (kJ/kg°C)	ε (%)	η _{PCI} (%)	E _{PCI} (kW)	f _{molarPer} (%)	f _{molar} H ₂ O _v p (%)
49,446	16,98	2,21	2,075	0,708	20,6988	21,6588	198,16	9,074754	0,090748
44,466	17,02	2,21	2,075	0,708	24,1066	25,2309	255,15	9,811475	0,098115
37,834	17,153	2,21	2,075	0,708	27,6876	28,9853	296,14	11,18503	0,11185
32,850	17,291	2,21	2,075	0,708	30,4834	31,9109	336,24	12,55017	0,125502
29,182	17,378	2,21	2,075	0,708	35,2582	36,9393	348,56	13,74572	0,137457

hp CH ₄ (kJ/kg)	hp CO (kJ/kg)	hp CO ₂ (kJ/kg)	hp H ₂ O (kJ/kg)	hp N ₂ (kJ/kg)	hp NO (kJ/kg)	hp NO ₂ (kJ/kg)	hp O ₂ (kJ/kg)	hp SO ₂ (kJ/kg)	hp _{T_{rad}} CH ₄ (kJ/kg)
-3760,28	-3598,11	-8620,26	-12787,5	345,57	3351,76	1031,91	315,49	-4407,04	-1871,14
-3613,1	-3550,62	-8572,98	-12699,5	392,39	3397,23	1075,77	359,26	-4373,71	-1490,78
-3513,86	-3519,45	-8541,71	-12641,4	423,13	3427,08	1104,76	388,02	-4351,72	-852,11
-3404,64	-3485,83	-8507,8	-12578,6	456,28	3459,28	1136,19	419,04	-4327,92	-208,11
-3322,68	-3461,04	-8482,69	-12532,2	480,74	3483,02	1159,45	441,92	-4310,32	385,36

hp _{T_{ad}} CO (kJ/kg)	hp _{T_{ad}} CO ₂ (kJ/kg)	hp _{T_{ad}} H ₂ O (kJ/kg)	hp _{T_{ad}} N ₂ (kJ/kg)	hp _{T_{ad}} NO (kJ/kg)	hp _{T_{ad}} NO ₂ (kJ/kg)	hp _{T_{ad}} O ₂ (kJ/kg)	hp _{T_{ad}} SO ₂ (kJ/kg)	hp _{T_{ad}teo} CO ₂ (kJ/kg)	hp _{T_{ad}teo} H ₂ O (kJ/kg)
-3062,48	-8070,71	-11766,7	874,49	3864,21	1538,91	808,84	-4025,45	-7013,32	-9694,47
-2966,25	-7969,81	-11576,5	969,67	3956,02	1631,14	897,05	-3956,89	-6967,19	-9600,15
-2809,37	-7804,7	-11262	1124,88	4105,48	1781,55	1040,56	-3845,73	-6918,85	-9500,95
-2655,76	-7642,52	-10948,9	1276,86	4251,56	1928,68	1180,79	-3737,76	-6876,86	-9414,53
-2517,32	-7496,08	-10662,5	1413,84	4383,01	2061,09	1307,01	-3641,14	-6847,58	-9354,13

hp _{T_{ad}teo} N ₂ (kJ/kg)	hp _{T_{ad}teo} SO ₂ (kJ/kg)	h _{ra} H ₂ O (kJ/kg)	h _{ra} N ₂ (kJ/kg)	h _{ra} O ₂ (kJ/kg)	h _r C ₁₂ H ₂₆ (kJ/kg)	h _r C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kg)	h _r C ₂ H ₆ (kJ/kg)	h _r C ₃ H ₈ (kJ/kg)	h _r C ₄ H ₁₀ (kJ/kg)
1864,67	-3325,41	-13401,9	11,46	10,14	-2010,08	-2126	-2796,05	-2336,3	-2151,26
1907,74	-3295,17	-13400,6	12,19	10,78	-1999,03	-2116	-2788,79	-2329,36	-2144,19
1952,88	-3263,39	-13397,4	13,96	12,35	-1994,61	-2112	-2786,96	-2327,61	-2142,41
1992,09	-3235,71	-13394,8	15,42	13,64	-1990,19	-2108	-2785,13	-2325,86	-2140,62
2019,43	-3216,37	-13392,2	16,88	14,92	-1988,42	-2106	-2785,13	-2325,86	-2140,62

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B20 + gás natural**
(Potência de 40 a 120kW) (Continuação)

hr CH ₄ (kJ/kg)	hr CO ₂ (kJ/kg)	hr N ₂ (kJ/kg)	hr O ₂ (kJ/kg)	hr S (kJ/kg)	H _p (kW)	H _{pTad} (kW)	H _{pTadteo} (kW)	H _r (kW)	$\dot{m}_{\text{produtos}}$ (kg/s)
-4641,97	-8932,3	11,46	10,14	19,12	-192,33	-72,11	-72,11	-72,11	0,217339
-4632,87	-8928,88	15,63	13,82	22,66	-241,5	-88,15	-88,15	-88,15	0,252465
-4630,59	-8928,03	16,67	14,74	24,07	-284,11	-97,12	-97,12	-97,12	0,250479
-4628,31	-8927,17	17,71	15,66	25,49	-323,95	-105,12	-105,12	-105,12	0,247856
-4628,31	-8927,17	17,71	15,66	26,05	-338,48	-105,39	-105,39	-105,39	0,229803

\dot{m}_{prodteo} (kg/s)	$\dot{m}_{\text{reagentes}}$ (kg/s)	\dot{m}_{reagteo} (kg/s)	$\dot{m}_{\text{biodiesel}}$ (kg/h)	\dot{m}_{g} (kg/h)	\dot{m}_{ar} (kg/h)	M _{ar} (kg/kmol)	M _{C₁₂H₂₆} (kg/kmol)	M _{C_{18,74}H_{34,43}O₂} (kg/kmol)	M _{C₂H₆} (kg/kmol)
0,077631	0,217339	0,077466	1,90	13,61	841,88	28,97	170,33	291,8	30,07
0,100281	0,252464	0,100058	2,64	17,35	907,49	28,97	170,33	291,8	30,07
0,117374	0,250479	0,117088	3,26	19,96	991,17	28,97	170,33	291,8	30,07
0,134289	0,247856	0,133934	3,66	22,70	1049,5	28,97	170,33	291,8	30,07
0,140330	0,229803	0,139930	4,66	22,75	1106,23	28,97	170,33	291,8	30,07

M _{C₃H₈} (kg/kmol)	M _{C₄H₁₀} (kg/kmol)	M _{CH₄} (kg/kmol)	M _{CO} (kg/kmol)	M _{CO₂} (kg/kmol)	M _{diesel blend} (kg/kmol)	M _{gas} (kg/kmol)	M _{H₂O} (kg/kmol)	M _{N₂} (kg/kmol)	M _{NO} (kg/kmol)
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	193	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	193	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	193	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	193	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	193	17,81	18,02	28,01	30,01

M _{NO₂} (kg/kmol)	M _{O₂} (kg/kmol)	M _S (kg/kmol)	M _{SO₂} (kg/kmol)	\dot{n}_{d} (kmol/s)	\dot{n}_{g} (kmol/s)	n _{moles_{prod}} (kmol)	\dot{n}_{p} (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt CO}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt H}_2\text{O}}$ (kmol/s)
46,01	32	32	64,06	3,00E-06	0,000212	0,007717	0,007017	0,000263	0,000548
46,01	32	32	64,06	4,00E-06	0,000271	0,008976	0,008095	0,000339	0,000709
46,01	32	32	64,06	5,00E-06	0,000311	0,008933	0,007934	0,000394	0,000835
46,01	32	32	64,06	5,00E-06	0,000354	0,008868	0,007755	0,000448	0,000963
46,01	32	32	64,06	7,00E-06	0,000355	0,008242	0,007109	0,000467	0,001007

$\dot{n}_{\text{pt N}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt SO}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{p H}_2\text{O}}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{t O}_2}$ (kmol/s)	\dot{n}_{O_2} (kmol/s)	PCI _{C₁₂H₂₆} (kJ/kg)	PCI _{C_{18,74}H_{34,43}O₂} (kg/kmol)	PCI _{C₂H₆} (kJ/kg)	PCI _{C₃H₈} (kJ/kg)	PCI _{C₄H₁₀} (kJ/kg)
0,002006	0	0,000548	0,000533	0,001521	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,002591	0	0,000709	0,000688	0,001761	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,003033	0	0,000835	0,000806	0,001737	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,003471	0	0,000963	0,000922	0,001709	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,003627	0	0,001007	0,000964	0,001575	44143,18	37388	47480	46360	45720

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B20 + gás natural**
(Potência de 40 a 120kW) (Continuação)

PCI _{CH4} (kJ/kg)	PCI _{CO2} (kJ/kg)	PCI _{N2} (kJ/kg)	PCI _{O2} (kJ/kg)	PCI _S (kJ/kg)	φ (%)	Pa (kPa)	Pp (kPa)	Pva (kPa)	Pvp (kPa)
50020	0	0	0	9259	50	95	101,33	2,972676	9,194995
50020	0	0	0	9259	50	95	101,33	3,088804	9,941478
50020	0	0	0	9259	50	95	101,33	3,387303	11,33323
50020	0	0	0	9259	50	95	101,33	3,651534	12,71645
50020	0	0	0	9259	50	95	101,33	3,933377	13,92785

Q̇ (kW)	rend (%)	R̄ (kJ/kmolK)	T _{ad} (C)	T _{ad,ar teorico} (C)	T ₀ (K)	T _a (C)	T _{combust.} (C)	T _g (C)	T _{orvalho} (C)
-77,3	0,932	8,314	817,78	1618,5	298,15	36	52	36	44,16
-88,97	0,932	8,314	897,62	1652,26	298,15	36,7	57	40	45,67
-101,16	0,932	8,314	1026,11	1687,58	298,15	38,4	59	41	48,26
-111,53	0,932	8,314	1150,19	1718,21	298,15	39,8	61	42	50,57
-104,33	0,932	8,314	1260,79	1739,53	298,15	41,2	61,8	42	52,43

T _p (C)	T _{ref} (C)	w	Ẇ (kW)	W _{res} (kW)	X _{Air} (%)	X̄ C ₁₂ H ₂₆ l ₀ (kJ/kmol)	X̄ C ₁₂ H ₂₆ , quim (kJ/kmol)	X̄ C _{18,74} H _{34,43} O ₂ l ₀ (kJ/kmol)	X̄ C _{18,74} H _{34,43} O ₂ l quim (kJ/kmol)
353	25	0,020092	42,92	40	191,19	8059340	8059340	11700000	11700000
396	25	0,020903	64,38	60	161,27	8059340	8059340	11700000	11700000
424	25	0,022998	85,84	80	120,57	8059340	8059340	11700000	11700000
454	25	0,024864	107,3	100	89,98	8059340	8059340	11700000	11700000
476	25	0,026866	128,76	120	67,92	8059340	8059340	11700000	11700000

X̄ C ₂ H ₆ l ₀ (kJ/kmol)	X̄ C ₂ H ₆ , quim (kJ/kmol)	X̄ C ₃ H ₈ l ₀ (kJ/kmol)	X̄ C ₃ H ₈ , quim (kJ/kmol)	X̄ C ₄ H ₁₀ l ₀ (kJ/kmol)	X̄ C ₄ H ₁₀ , quim (kJ/kmol)	X̄ CH ₄ quim (kJ/kmol)	X̄ CO ₂ l ₀ (kJ/kmol)	X̄ CO ₂ , quim (kJ/kmol)	X̄ N ₂ l ₀ (kJ/kmol)
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720

X̄ N ₂ , quim (kJ/kmol)	X̄ O ₂ l ₀ (kJ/kmol)	X̄ O ₂ , quim (kJ/kmol)	X̄ SO ₂ l ₀ (kJ/kmol)	Ẋ (kW)	Ẋ d (kW)	Ẋ g (kW)	y _d C ₁₂ H ₂₆ (kmol/kmol)	y _d C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kmol)	y _{d s}
-10103,4	3970	-13706,9	303500	207,35	23,79	183,56	0,78824	0,2	0,01176
-10103,4	3970	-13706,9	303500	267,05	33,06	234	0,78824	0,2	0,01176
-10103,4	3970	-13706,9	303500	310,02	40,82	269,2	0,78824	0,2	0,01176
-10103,4	3970	-13706,9	303500	351,98	45,83	306,15	0,78824	0,2	0,01176
-10103,4	3970	-13706,9	303500	365,18	58,35	306,82	0,78824	0,2	0,01176

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B20 + gás natural**
(Potência de 40 a 120kw) (Continuação)

Yg C2H6	Yg C3H8	Yg C4H10	Yg CH4	Yg CO2	Yg N2	Yg O2	Yp CH4	Yp CO	Yp CO2
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	1,00E-06	0,001444	0,036
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	1,00E-06	0,000885	0,041
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	1,00E-06	0,000701	0,049
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	0	0,000714	0,057
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	0	0,000746	0,065

Yp N2	Yp NO	Yp NO2	Yp O2	Yp SO2	η_{combCa}	η_{comb}	\dot{X} destruída (kW)	\dot{X} _p (kW)	\dot{X} _{p,quim} (kW)
0,815156	9,30E-05	4,00E-06	0,147298	5,00E-06	34,3413	60,6666	132,7	28,06	2,639
0,818257	0,000164	1,30E-05	0,139674	6,00E-06	38,2751	60,1009	159,9	38,53	2,198
0,823477	0,000300	8,00E-06	0,126506	7,00E-06	45,3379	63,1444	176,0	43,33	2,403
0,828881	0,000507	2,80E-05	0,112862	8,00E-06	52,6381	65,0816	190,3	49,07	3,140
0,833525	0,000662	4,60E-05	0,100010	1,10E-05	59,551	66,8701	181,2	50,21	3,718

\dot{X} _{p,term} (kW)	\dot{X} _q (kW)
25,42	3,703
36,33	4,262
40,93	4,846
45,93	5,342
46,49	4,997

Apêndice B3

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B30 + gás natural**
(Potência de 40 a 120kW)

AC kg de ar/kg de combust.	AC _t kg de ar/kg de combust.	C _p C ₁₂ H ₂₆ (kJ/kg°C)	C _p C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kg°C)	C _{p_s} (kJ/kg°C)	ε (%)	η _{PCI} (%)	E _{PCI} (kW)	fmolarPer (%)	fmolar H ₂ O _v p (%)
45,500	16,694	2,210	2,075	0,708	20,5650	21,5192	199,44	9,05613	0,090561
41,339	16,717	2,210	2,075	0,708	23,1071	24,1785	266,26	9,72998	0,097300
36,156	16,908	2,210	2,075	0,708	28,1750	29,4912	291,06	11,10719	0,111072
32,005	16,642	2,210	2,075	0,708	30,8111	32,2532	332,67	11,55929	0,115593
29,236	16,696	2,210	2,075	0,708	35,2053	36,8823	349,10	12,49613	0,124961

hp CH ₄ (kJ/kg)	hp CO (kJ/kg)	hp CO ₂ (kJ/kg)	hp H ₂ O (kJ/kg)	hp N ₂ (kJ/kg)	hp NO (kJ/kg)	hp NO ₂ (kJ/kg)	hp O ₂ (kJ/kg)	hp SO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} CH ₄ (kJ/kg)
-3770,310	-3601,400	-8623,530	-12793,59	342,320	3348,610	1028,880	312,450	-4409,350	-1606,660
-3613,100	-3550,620	-8572,980	-12699,45	392,390	3397,230	1075,770	359,260	-4373,710	-1223,170
-3517,450	-3520,570	-8542,830	-12643,50	422,030	3426,020	1103,720	386,990	-4352,510	-666,000
-3434,060	-3494,820	-8516,880	-12595,43	447,420	3450,670	1127,770	410,750	-4334,290	-83,190
-3330,200	-3463,300	-8484,980	-12536,40	478,510	3480,860	1157,330	439,830	-4311,920	367,570

hp _{Tad} CO (kJ/kg)	hp _{Tad} CO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} H ₂ O (kJ/kg)	hp _{Tad} N ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} NO (kJ/kg)	hp _{Tad} NO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} O ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} SO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} te _o CO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} te _o H ₂ O (kJ/kg)
-2995,32	-8000,33	-11634,18	940,92	3928,3	1603,28	870,42	-3977,57	-6878,36	-9417,63
-2899,87	-7900,03	-11444,09	1035,34	4019,29	1694,79	957,81	-3909,75	-6838,46	-9335,29
-2764,56	-7757,43	-11171,15	1169,21	4148,12	1824,49	1081,49	-3814,15	-6840,88	-9340,28
-2626,40	-7611,48	-10888,45	1305,91	4279,45	1956,78	1207,57	-3717,21	-6723,54	-9096,93
-2521,43	-7500,43	-10671,06	1409,77	4379,11	2057,16	1303,26	-3644,00	-6720,16	-9089,90

hp _{Tad} te _o N ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} te _o SO ₂ (kJ/kg)	h _{ra} H ₂ O (kJ/kg)	h _{ra} N ₂ (kJ/kg)	h _{ra} O ₂ (kJ/kg)	h _r C ₁₂ H ₂₆ (kJ/kg)	H _r C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kg)	h _r C ₂ H ₆ (kJ/kg)	h _r C ₃ H ₈ (kJ/kg)	h _r C ₄ H ₁₀ (kJ/kg)
1990,68	-3236,71	-13408,1	8,02	7,10	-2025,55	-2141	-2799,66	-2339,74	-2154,77
2027,95	-3210,33	-13407,53	8,33	7,37	-2010,74	-2127	-2792,43	-2332,84	-2147,73
2025,69	-3211,93	-13401,92	11,46	10,14	-2001,68	-2119	-2786,96	-2327,61	-2142,41
2135,3	-3133,82	-13408,66	7,71	6,82	-2001,24	-2118	-2796,05	-2336,3	-2151,26
2138,45	-3131,55	-13405,29	9,58	8,48	-1995,93	-2113	-2799,66	-2339,74	-2154,77

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B30 + gás natural**
(Potência de 40 a 120 kW) (Continuação)

hr CH ₄ (kJ/kg)	hr CO ₂ (kJ/kg)	hr N ₂ (kJ/kg)	hr O ₂ (kJ/kg)	hr S (kJ/kg)	H _p (kW)	H _{pTad} (kW)	H _{pTadteo} (kW)	H _r (kW)	$\dot{m}_{\text{produtos}}$ (kg/s)
-4646,51	-8934	9,38	8,29	14,16	-186,84	-60,20	-60,20	-60,20	0,202148
-4637,42	-8930,59	13,54	11,98	18,9	-242,3	-76,02	-76,02	-76,02	0,245682
-4630,59	-8928,03	16,67	14,74	21,81	-272,27	-84,60	-84,60	-84,60	0,236046
-4641,97	-8932,3	11,46	10,14	21,95	-298,79	-78,64	-78,64	-78,64	0,239748
-4646,51	-8934	9,38	8,29	23,65	-314,87	-82,62	-82,62	-82,62	0,231304

\dot{m}_{prodteo} (kg/s)	$\dot{m}_{\text{reagentes}}$ (kg/s)	\dot{m}_{reagteo} (kg/s)	$\dot{m}_{\text{biodiesel}}$ (kg/h)	\dot{m}_{g} (kg/h)	\dot{m}_{ar} (kg/h)	M _{ar} (kg/kmol)	M _{C₁₂H₂₆} (kg/kmol)	M _{C_{18,74}H_{34,43}O₂} (kg/kmol)	M _{C₂H₆} (kg/kmol)
0,077057	0,202147	0,076921	1,96	13,69	823,11	28,97	170,33	291,8	30,07
0,102992	0,245682	0,102807	2,59	18,3	917,94	28,97	170,33	291,8	30,07
0,114005	0,236045	0,113762	3,13	19,74	996,25	28,97	170,33	291,8	30,07
0,128369	0,239747	0,128146	3,67	22,48	1154,63	28,97	170,33	291,8	30,07
0,135632	0,231304	0,135372	4,71	22,83	1146,86	28,97	170,33	291,8	30,07

M _{C₃H₈} (kg/kmol)	M _{C₄H₁₀} (kg/kmol)	M _{CH₄} (kg/kmol)	M _{CO} (kg/kmol)	M _{CO₂} (kg/kmol)	M _{diesel blend} (kg/kmol)	M _{gas} (kg/kmol)	M _{H₂O} (kg/kmol)	M _{N₂} (kg/kmol)	M _{NO} (kg/kmol)
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	205,3	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	205,3	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	205,3	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	205,3	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	205,3	17,81	18,02	28,01	30,01

M _{NO₂} (kg/kmol)	M _{O₂} (kg/kmol)	M _S (kg/kmol)	M _{SO₂} (kg/kmol)	\dot{n}_{d} (kmol/s)	\dot{n}_{g} (kmol/s)	n _{moles_{prod}} (kmol)	\dot{n}_{p} (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt CO}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt H}_2\text{O}}$ (kmol/s)
46,01	32	32	64,06	3,00E-06	0,000214	0,007171	0,006521	0,000265	0,000536
46,01	32	32	64,06	4,00E-06	0,000285	0,008724	0,007876	0,000353	0,000718
46,01	32	32	64,06	4,00E-06	0,000308	0,008411	0,007477	0,000388	0,000802
46,01	32	32	64,06	5,00E-06	0,000351	0,00854	0,007553	0,000443	0,000889
46,01	32	32	64,06	6,00E-06	0,000356	0,008256	0,007224	0,000469	0,000939

$\dot{n}_{\text{pt N}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt SO}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{p H}_2\text{O}}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{t O}_2}$ (kmol/s)	\dot{n}_{O_2} (kmol/s)	PCI _{C₁₂H₂₆} (kJ/kg)	PCI _{C_{18,74}H_{34,43}O₂} (kJ/kg)	PCI _{C₂H₆} (kJ/kg)	PCI _{C₃H₈} (kJ/kg)	PCI _{C₄H₁₀} (kJ/kg)
0,001990	0	0,000536	0,000528	0,001417	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,002660	0	0,000718	0,000706	0,001718	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,002945	0	0,000802	0,000782	0,00164	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,003314	0	0,000889	0,00088	0,001666	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,003502	0	0,000939	0,00093	0,001599	44143,18	37388	47480	46360	45720

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B30 + gás natural**
(Potência de 40 a 120 kW) (Continuação)

PCI _{CH4} (kJ/kg)	PCI _{CO2} (kJ/kg)	PCI _{N2} (kJ/kg)	PCI _{O2} (kJ/kg)	PCI _S (kJ/kg)	φ (%)	Pa (kPa)	Pp (kPa)	Pva (kPa)	Pvp (kPa)
50020	0	0	0	9259	50	95	101,33	2,47468	9,176119
50020	0	0	0	9259	50	95	101,33	2,516742	9,858902
50020	0	0	0	9259	50	95	101,33	2,972676	11,25436
50020	0	0	0	9259	50	95	101,33	2,433229	11,71245
50020	0	0	0	9259	50	95	101,33	2,691257	12,66170

Q̇ (kW)	rend (%)	R̄ (kJ/kmolK)	T _{ad} (C)	T _{ad} _{arteorico} (C)	T ₀ (K)	T _a (C)	T _{combust.} (C)	T _g (C)	T _{orvalho} (C)
-83,72	0,932	8,314	873,59	1717,11	298,15	32,7	45,0	34	44,12
-101,90	0,932	8,314	952,22	1746,17	298,15	33,0	51,7	38	45,51
-101,83	0,932	8,314	1062,46	1744,41	298,15	36,0	55,8	41	48,12
-112,86	0,932	8,314	1173,74	1829,68	298,15	32,4	56,0	36	48,92
-103,50	0,932	8,314	1257,52	1832,13	298,15	34,2	58,4	34	50,48

p (C)	T _{ref} (C)	w	Ẇ (kW)	W _{res} (kW)	X _{Air} (%)	X̄ C ₁₂ H ₂₆ l ₀ (kJ/kmol)	X̄ C ₁₂ H ₂₆ , quim (kJ/kmol)	X̄ C _{18,74} H _{34,43} O ₂ l ₀ (kJ/kmol)	X̄ C _{18,74} H _{34,43} O ₂ l quim (kJ/kmol)
350	25	0,016636	42,92	40	172,55	8059340	8059340	11700000	11700000
396	25	0,016926	64,38	60	147,29	8059340	8059340	11700000	11700000
423	25	0,020092	85,84	80	113,85	8059340	8059340	11700000	11700000
446	25	0,01635	107,3	100	92,32	8059340	8059340	11700000	11700000
474	25	0,018134	128,76	120	75,11	8059340	8059340	11700000	11700000

X̄ C ₂ H ₆ l ₀ (kJ/kmol)	X̄ C ₂ H ₆ , quim (kJ/kmol)	X̄ C ₃ H ₈ l ₀ (kJ/kmol)	X̄ C ₃ H ₈ , quim (kJ/kmol)	X̄ C ₄ H ₁₀ l ₀ (kJ/kmol)	X̄ C ₄ H ₁₀ , quim (kJ/kmol)	X̄ CH ₄ , quim (kJ/kmol)	X̄ CO ₂ l ₀ (kJ/kmol)	X̄ CO ₂ , quim (kJ/kmol)	X̄ N ₂ l ₀ (kJ/kmol)
1504360	1497851	2163190	2147231,3	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231,3	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231,3	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231,3	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231,3	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720

X̄ N ₂ , quim (kJ/kmol)	X̄ O ₂ l ₀ (kJ/kmol)	X̄ O ₂ , quim (kJ/kmol)	X̄ SO ₂ l ₀ (kJ/kmol)	Ẋ (kW)	Ẋ _d (kW)	Ẋ _g (kW)	y _d C ₁₂ H ₂₆ (kmol/kmol)	y _d C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kmol)	y _d _s
-10103,35	3970	-13706,93	303500	208,7	24,06	184,63	0,68971	0,3	0,01029
-10103,35	3970	-13706,93	303500	278,61	31,8	246,81	0,68971	0,3	0,01029
-10103,35	3970	-13706,93	303500	304,66	38,43	266,23	0,68971	0,3	0,01029
-10103,35	3970	-13706,93	303500	348,24	45,06	303,18	0,68971	0,3	0,01029
-10103,35	3970	-13706,93	303500	365,73	57,82	307,9	0,68971	0,3	0,01029

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B30 + gás natural**
(Potência de 40 a 120 kW) (Continuação)

y_g C ₂ H ₆	y_g C ₃ H ₈	y_g C ₄ H ₁₀	y_g CH ₄	y_g CO ₂	y_g N ₂	y_g O ₂	y_p CH ₄	y_p CO	y_p CO ₂
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	1,00E-06	0,001605	0,039
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	1,00E-06	0,000874	0,044
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	1,00E-06	0,000833	0,051
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	0	0,000693	0,058
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	0	0,000877	0,064

y_p N ₂	y_p NO	y_p NO ₂	y_p O ₂	y_p SO ₂	η_{combCa}	η_{comb}	\dot{X} destruída (kW)	\dot{X}_p (kW)	\dot{X}_{p_quim} (kW)
0,817181	8,80E-05	4,00E-06	0,142117	4,00E-06	36,6904	63,4961	135,5	26,3	3,006
0,820376	0,000195	4,00E-06	0,134546	5,00E-06	40,4389	62,4498	171,5	37,83	2,481
0,824882	0,000285	7,00E-06	0,122986	6,00E-06	46,7624	64,4767	172,8	41,17	2,765
0,829452	0,000475	3,50E-05	0,111338	7,00E-06	51,996	66,1783	189,4	46,17	3,319
0,832781	0,000595	3,00E-06	0,101735	9,00E-06	57,1069	66,529	181,8	50,23	4,099

\dot{X}_{p_term} (kW)	\dot{X}_q (kW)
23,29	4,010
35,35	4,881
38,40	4,878
42,86	5,406
46,14	4,957

Apêndice B4

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B40 + gás natural**
(Potência de 40 a 120 kW)

AC kg de ar/kg de combust.	AC _t kg de ar/kg de combust.	C _p C ₁₂ H ₂₆ (kJ/kg°C)	C _p C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kg°C)	C _p s (kJ/kg°C)	ε (%)	η _{PCI} (%)	E _{PCI} (kW)	f _{molarPer} (%)	f _{molar} H ₂ O _{vp} (%)
46,501	16,7	2,21	2,075	0,708	20,4572	21,4039	200,52	8,989293	0,089893
40,144	16,886	2,21	2,075	0,708	25,091	26,2572	245,18	10,34855	0,103485
35,279	16,922	2,21	2,075	0,708	28,3208	29,6412	289,59	11,38288	0,113829
32,413	17,161	2,21	2,075	0,708	33,7449	35,3255	303,74	12,54192	0,125419
29,831	17,147	2,21	2,075	0,708	35,3142	36,9807	348,17	13,25135	0,132513

hp CH ₄ (kJ/kg)	hp CO (kJ/kg)	hp CO ₂ (kJ/kg)	hp H ₂ O (kJ/kg)	hp N ₂ (kJ/kg)	hp NO (kJ/kg)	hp NO ₂ (kJ/kg)	hp O ₂ (kJ/kg)	hp SO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} CH ₄ (kJ/kg)
-3770,31	-3601,4	-8623,53	-12793,6	342,32	3348,61	1028,88	312,45	-4409,35	-1688,61
-3620,09	-3552,84	-8575,2	-12703,6	390,2	3395,11	1073,71	357,21	-4375,28	-1132,96
-3506,67	-3517,22	-8539,46	-12637,3	425,33	3429,22	1106,85	390,08	-4350,14	-573,32
-3393,56	-3482,46	-8504,39	-12572,3	459,61	3462,51	1139,35	422,15	-4325,52	-187,58
-3337,7	-3465,56	-8487,27	-12540,6	476,28	3478,7	1155,21	437,75	-4313,53	247,92

hp _{Tad} CO (kJ/kg)	hp _{Tad} CO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} H ₂ O (kJ/kg)	hp _{Tad} N ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} NO (kJ/kg)	hp _{Tad} NO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} O ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} SO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tadteo} CO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tadteo} H ₂ O (kJ/kg)
-3016,00	-8022,02	-11675,1	920,46	3908,57	1583,45	851,46	-3992,30	-6902,72	-9467,79
-2877,72	-7876,71	-11399,7	1057,26	4040,40	1716,03	978,08	-3894,05	-6894,15	-9450,14
-2742,38	-7734,02	-11126,0	1191,16	4169,21	1845,74	1101,74	-3798,54	-6843,36	-9345,42
-2650,93	-7637,41	-10938,9	1281,64	4256,15	1933,30	1185,20	-3734,37	-6865,82	-9391,77
-2549,15	-7529,77	-10728,7	1382,34	4352,80	2030,66	1278,00	-3663,30	-6829,72	-9317,21

hp _{Tadteo} N ₂ (kJ/kg)	hp _{Tadteo} SO ₂ (kJ/kg)	h _{ra} H ₂ O (kJ/kg)	h _{ra} N ₂ (kJ/kg)	h _{ra} O ₂ (kJ/kg)	h _r C ₁₂ H ₂₆ (kJ/kg)	h _r C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kg)	h _r C ₂ H ₆ (kJ/kg)	h _r C ₃ H ₈ (kJ/kg)	h _r C ₄ H ₁₀ (kJ/kg)
1967,94	-3252,77	-13406,4	8,96	7,92	-2040,35	-2155	-2801,46	-2341,45	-2156,51
1975,94	-3247,12	-13401,2	11,88	10,50	-2022,01	-2138	-2796,05	-2336,3	-2151,26
2023,37	-3213,57	-13399,7	12,71	11,24	-2015,38	-2131	-2796,05	-2336,3	-2151,26
2002,39	-3228,42	-13394,6	15,52	13,73	-2002,12	-2119	-2799,66	-2339,74	-2154,77
2036,11	-3204,54	-13394,2	15,73	13,91	-1995,93	-2113	-2797,86	-2338,02	-2153,02

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B40 + gás natural**
(Potência de 40 a 120 kW) (Continuação)

hr CH ₄ (kJ/kg)	hr CO ₂ (kJ/kg)	hr N ₂ (kJ/kg)	hr O ₂ (kJ/kg)	hr S (kJ/kg)	H _p (kW)	H _{pTad} (kW)	H _{pTadteo} (kW)	H _r (kW)	$\dot{m}_{\text{produtos}}$ (kg/s)
-4648,77	-8934,85	8,33	7,37	9,42	-188,52	-62,78	-62,78	-62,78	0,207949
-4641,97	-8932,3	11,46	10,14	15,29	-232,36	-76,92	-76,92	-76,92	0,220466
-4641,97	-8932,3	11,46	10,14	17,42	-272,48	-84,86	-84,86	-84,86	0,229766
-4646,51	-8934,0	9,38	8,29	21,66	-290,03	-93,50	-93,50	-93,50	0,222195
-4644,24	-8933,15	10,42	9,21	23,65	-332,8	-101,81	-101,81	-101,81	0,235427

\dot{m}_{prodteo} (kg/s)	$\dot{m}_{\text{reagentes}}$ (kg/s)	\dot{m}_{reagteo} (kg/s)	$\dot{m}_{\text{biodiesel}}$ (kg/h)	\dot{m}_{g} (kg/h)	\dot{m}_{ar} (kg/h)	M _{ar} (kg/kmol)	M _{C₁₂H₂₆} (kg/kmol)	M _{C_{18,74}H_{34,43}O₂} (kg/kmol)	M _{C₂H₆} (kg/kmol)
0,077627	0,207948	0,077486	1,93	13,83	850,19	28,97	170,33	291,8	30,07
0,096042	0,220465	0,095837	2,51	16,78	955,20	28,97	170,33	291,8	30,07
0,113754	0,229765	0,113503	3,09	19,71	1055,93	28,97	170,33	291,8	30,07
0,121085	0,222195	0,120771	3,44	20,50	1156,85	28,97	170,33	291,8	30,07
0,138937	0,235426	0,138573	4,31	23,18	1157,16	28,97	170,33	291,8	30,07

M _{C₃H₈} (kg/kmol)	M _{C₄H₁₀} (kg/kmol)	M _{CH₄} (kg/kmol)	M _{CO} (kg/kmol)	M _{CO₂} (kg/kmol)	M _{diesel blend} (kg/kmol)	M _{gas} (kg/kmol)	M _{H₂O} (kg/kmol)	M _{N₂} (kg/kmol)	M _{NO} (kg/kmol)
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	217,7	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	217,7	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	217,7	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	217,7	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	217,7	17,81	18,02	28,01	30,01

M _{NO₂} (kg/kmol)	M _{O₂} (kg/kmol)	M _S (kg/kmol)	M _{SO₂} (kg/kmol)	\dot{n}_{d} (kmol/s)	\dot{n}_{g} (kmol/s)	$n_{\text{moles}_{\text{prod}}}$ (kmol)	\dot{n}_{p} (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt CO}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt H}_2\text{O}}$ (kmol/s)
46,01	32	32	64,06	2,00E-06	0,000216	0,007377	0,006714	0,000266	0,000542
46,01	32	32	64,06	3,00E-06	0,000262	0,007846	0,007034	0,000326	0,000677
46,01	32	32	64,06	4,00E-06	0,000307	0,008194	0,007261	0,000386	0,000803
46,01	32	32	64,06	4,00E-06	0,00032	0,00795	0,006953	0,000405	0,000866
46,01	32	32	64,06	5,00E-06	0,000362	0,008432	0,007314	0,000466	0,000991

$\dot{n}_{\text{pt N}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt SO}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{p H}_2\text{O}}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{t O}_2}$ (kmol/s)	\dot{n}_{O_2} (kmol/s)	PCI _{C₁₂H₂₆} (kJ/kg)	PCI _{C_{18,74}H_{34,43}O₂} (kg/kmol)	PCI _{C₂H₆} (kJ/kg)	PCI _{C₃H₈} (kJ/kg)	PCI _{C₄H₁₀} (kJ/kg)
0,002004	0	0,000542	0,000532	0,001457	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,002481	0	0,000677	0,000659	0,001535	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,002938	0	0,000803	0,000780	0,001594	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,003129	0	0,000866	0,000831	0,001532	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,003590	0	0,000991	0,000953	0,001619	44143,18	37388	47480	46360	45720

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B40 + gás natural**
(Potência de 40 a 120 kW) (Continuação)

PCI _{CH4} (kJ/kg)	PCI _{CO2} (kJ/kg)	PCI _{N2} (kJ/kg)	PCI _{O2} (kJ/kg)	PCI _S (kJ/kg)	φ (%)	Pa (kPa)	Pp (kPa)	Pva (kPa)	Pvp (kPa)
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	2,602732	9,108402
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	3,038563	10,48567
50020	0	0	0	9259	50	98	101,33	3,174138	11,53370
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	3,671071	12,70810
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	3,710414	13,42693

Q̇ (kW)	rend (%)	R̄ (kJ/kmolK)	T _{ad} (C)	T _{ad,arteorico} (C)	T ₀ (K)	T _a (C)	T _{combust.} (C)	T _g (C)	T _{orvalho} (C)
-82,82	0,932	8,314	856,45	1699,35	298,15	33,6	38,3	33	43,97
-91,06	0,932	8,314	970,37	1705,6	298,15	36,4	46,6	36	46,72
-101,78	0,932	8,314	1080,41	1742,6	298,15	37,2	49,6	36	48,61
-89,24	0,932	8,314	1154,07	1726,25	298,15	39,9	55,6	34	50,56
-102,24	0,932	8,314	1235,45	1752,54	298,15	40,1	58,4	35	51,68

T _p (C)	T _{ref} (C)	w	Ẇ (kW)	W _{res} (kW)	X _{Air} (%)	X̄ C ₁₂ H ₂₆ l0 (kJ/kmol)	X̄ C ₁₂ H ₂₆ , quim (kJ/kmol)	X̄ C _{18,74} H _{34,43} O ₂ l0 (kJ/kmol)	X̄ C _{18,74} H _{34,43} O ₂ l quim
350	25	0,01715	42,92	40	178,45	8059340	8059340	11700000	11700000
394	25	0,020114	64,38	60	137,74	8059340	8059340	11700000	11700000
426	25	0,02082	85,84	80	108,48	8059340	8059340	11700000	11700000
457	25	0,024466	107,3	100	88,87	8059340	8059340	11700000	11700000
472	25	0,024739	128,76	120	73,97	8059340	8059340	11700000	11700000

X̄ C ₂ H ₆ l0 (kJ/kmol)	X̄ C ₂ H ₆ , quim (kJ/kmol)	X̄ C ₃ H ₈ l0 (kJ/kmol)	X̄ C ₃ H ₈ , quim (kJ/kmol)	X̄ C ₄ H ₁₀ l0 (kJ/kmol)	X̄ C ₄ H ₁₀ , quim (kJ/kmol)	X̄ CH ₄ quim (kJ/kmol)	X̄ CO ₂ l0 (kJ/kmol)	X̄ CO ₂ , quim (kJ/kmol)	X̄ N ₂ l0 (kJ/kmol)
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720

X̄ N ₂ , quim (kJ/kmol)	X̄ O ₂ l0 (kJ/kmol)	X̄ O ₂ , quim (kJ/kmol)	X̄ SO ₂ l0 (kJ/kmol)	Ẋ (kW)	Ẋ _d (kW)	Ẋ _g (kW)	y _d C ₁₂ H ₂₆ (kmol/kmol)	y _d C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kmol)	y _{d s}
-10103,4	3970	-13706,9	303500	209,8	23,27	186,52	0,59118	0,4	0,00882
-10103,4	3970	-13706,9	303500	256,58	30,27	226,31	0,59118	0,4	0,00882
-10103,4	3970	-13706,9	303500	303,09	37,26	265,82	0,59118	0,4	0,00882
-10103,4	3970	-13706,9	303500	317,96	41,48	276,48	0,59118	0,4	0,00882
-10103,4	3970	-13706,9	303500	364,6	51,97	312,62	0,59118	0,4	0,00882

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B40 + gás natural**
(Potência de 40 a 120 kW) (Continuação)

y_g C ₂ H ₆	y_g C ₃ H ₈	y_g C ₄ H ₁₀	y_g CH ₄	y_g CO ₂	y_g N ₂	y_g O ₂	y_p CH ₄	y_p CO	y_p CO ₂
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	1,00E-06	0,001652	0,038
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	1,00E-06	0,001362	0,045
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	1,00E-06	0,001119	0,052
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	0	0,001307	0,057
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	0	0,00074	0,063

y_p N ₂	y_p NO	y_p NO ₂	y_p O ₂	y_p SO ₂	η_{combCa}	η_{comb}	\dot{X} destruída (kW)	\dot{X} p (kW)	\dot{X} p _{quim} (kW)
0,816502	8,80E-05	5,00E-06	0,143748	3,00E-06	35,9128	62,7051	135,9	27,05	3,103
0,821054	0,000167	9,00E-06	0,132403	4,00E-06	42,0624	63,3987	153,2	34,66	3,106
0,82562	0,000256	1,20E-05	0,120987	5,00E-06	47,9652	64,7896	171,2	41,19	3,291
0,828847	0,000366	1,50E-05	0,112459	6,00E-06	52,9452	64,7053	160,9	45,51	3,871
0,832309	0,000613	4,70E-05	0,103285	7,00E-06	57,4812	66,3453	180,5	50,44	3,629

\dot{X} p _{term} (kW)	\dot{X} q (kW)
23,95	3,967
31,55	4,362
37,90	4,876
41,64	4,274
46,81	4,897

Apêndice B5

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B50 + gás natural** (Potência de 40 a 120 kW).

AC kg de ar/kg de combust.	AC _t kg de ar/kg de combust.	C _p C ₁₂ H ₂₆ (kJ/kg°C)	C _p C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kg°C)	C _{p_s} (kJ/kg°C)	ε (%)	η _{PCI} (%)	E _{PCI} (kW)	fmolarPer (%)	fmolar H ₂ O _{vp} (%)
45,473	16,64	2,21	2,075	0,708	20,5961	21,5423	199,23	9,023109	0,090231
39,069	16,593	2,21	2,075	0,708	26,3302	27,563	233,57	10,02952	0,100295
34,978	16,78	2,21	2,075	0,708	30,0168	31,4285	273,12	11,25485	0,112548
32,357	16,869	2,21	2,075	0,708	33,5701	35,1573	305,19	12,07756	0,120776
29,350	16,954	2,21	2,075	0,708	36,2306	37,9569	339,21	13,11229	0,131123

hp CH ₄ (kJ/kg)	hp CO (kJ/kg)	hp CO ₂ (kJ/kg)	hp H ₂ O (kJ/kg)	hp N ₂ (kJ/kg)	hp NO (kJ/kg)	hp NO ₂ (kJ/kg)	hp O ₂ (kJ/kg)	hp SO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} CH ₄ (kJ/kg)
-3760,28	-3598,11	-8620,26	-12787,5	345,57	3351,76	1031,91	315,49	-4407,04	-1605,24
-3613,1	-3550,62	-8572,98	-12699,5	392,39	3397,23	1075,77	359,26	-4373,71	-1045,12
-3492,26	-3512,74	-8534,96	-12628,9	429,74	3433,51	1111,02	394,21	-4346,98	-569,29
-3400,95	-3484,71	-8506,67	-12576,5	457,39	3460,36	1137,24	420,08	-4327,12	-195,63
-3337,7	-3465,56	-8487,27	-12540,6	476,28	3478,7	1155,21	437,75	-4313,53	310,76

hp _{Tad} CO (kJ/kg)	hp _{Tad} CO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} H ₂ O (kJ/kg)	hp _{Tad} N ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} NO (kJ/kg)	hp _{Tad} NO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} O ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} SO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tadteo} CO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tadteo} H ₂ O (kJ/kg)
-2994,96	-7999,95	-11633,5	941,27	3928,64	1603,62	870,75	-3977,31	-6870,21	-9400,83
-2856,24	-7854,09	-11356,5	1078,51	4060,86	1736,62	997,72	-3878,85	-6814,68	-9286,1
-2741,42	-7733,01	-11124,1	1192,11	4170,13	1846,66	1102,62	-3797,86	-6825,62	-9308,74
-2652,82	-7639,42	-10942,8	1279,77	4254,35	1931,49	1183,47	-3735,7	-6819,07	-9295,19
-2534,58	-7514,35	-10698,4	1396,76	4366,63	2044,59	1291,28	-3653,15	-6803,39	-9262,73

hp _{Tadteo} N ₂ (kJ/kg)	hp _{Tadteo} SO ₂ (kJ/kg)	hra H ₂ O (kJ/kg)	hra N ₂ (kJ/kg)	hra O ₂ (kJ/kg)	hr C ₁₂ H ₂₆ (kJ/kg)	Hr C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kg)	hr C ₂ H ₆ (kJ/kg)	hr C ₃ H ₈ (kJ/kg)	hr C ₄ H ₁₀ (kJ/kg)
1998,29	-3231,33	-13408,1	8,02	7,10	-2025,99	-2141	-2803,25	-2343,15	-2158,26
2050,16	-3194,56	-13406,8	8,75	7,74	-2012,95	-2129	-2805,04	-2344,86	-2160,00
2039,94	-3201,82	-13401,4	11,77	10,41	-2004,99	-2122	-2805,04	-2344,86	-2160,00
2046,06	-3197,48	-13398,7	13,23	11,7	-2000,57	-2117	-2803,25	-2343,15	-2158,26
2060,71	-3187,07	-13396,1	14,69	12,99	-1997,70	-2115	-2803,25	-2343,15	-2158,26

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B50 + gás natural** (Potência de 40 a 120 kW).(Continuação)

hr CH ₄ (kJ/kg)	hr CO ₂ (kJ/kg)	hr N ₂ (kJ/kg)	hr O ₂ (kJ/kg)	hr S (kJ/kg)	H _p (kW)	H _{pTad} (kW)	H _{pTadteo} (kW)	H _r (kW)	$\dot{m}_{\text{produtos}}$ (kg/s)
-4651,04	-8935,70	7,29	6,45	14,02	-185,49	-59,48	-59,48	-59,48	0,202157
-4653,30	-8936,55	6,25	5,53	18,2	-213,13	-64,44	-64,44	-64,44	0,205353
-4653,30	-8936,55	6,25	5,53	20,74	-253,05	-77,70	-77,70	-77,70	0,215871
-4651,04	-8935,70	7,29	6,45	22,16	-284,21	-86,62	-86,62	-86,62	0,223957
-4651,04	-8935,70	7,29	6,45	23,08	-320,84	-94,76	-94,76	-94,76	0,226951

\dot{m}_{prudteo} (kg/s)	$\dot{m}_{\text{reagentes}}$ (kg/s)	\dot{m}_{reagteo} (kg/s)	\dot{m}_d (kg/h)	\dot{m}_g (kg/h)	\dot{m}_{ar} (kg/h)	M _{ar} (kg/kmol)	M _{C₁₂H₂₆} (kg/kmol)	M _{C_{18,74}H_{34,43}O₂} (kg/kmol)	M _{C₂H₆} (kg/kmol)
0,076867	0,202157	0,076735	1,74	13,92	860,00	28,97	170,33	291,8	30,07
0,090327	0,205353	0,090164	2,67	15,78	922,16	28,97	170,33	291,8	30,07
0,106907	0,215870	0,106681	3,30	18,3	1023,79	28,97	170,33	291,8	30,07
0,120243	0,223957	0,119967	3,92	20,25	1104,62	28,97	170,33	291,8	30,07
0,134590	0,22695	0,134256	4,74	22,18	1163,68	28,97	170,33	291,8	30,07

M _{C₃H₈} (kg/kmol)	M _{C₄H₁₀} (kg/kmol)	M _{CH₄} (kg/kmol)	M _{CO} (kg/kmol)	M _{CO₂} (kg/kmol)	M _{diesel blend} (kg/kmol)	M _{gas} (kg/kmol)	M _{H₂O} (kg/kmol)	M _{N₂} (kg/kmol)	M _{NO} (kg/kmol)
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	230	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	230	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	230	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	230	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	230	17,81	18,02	28,01	30,01

M _{NO₂} (kg/kmol)	M _{O₂} (kg/kmol)	M _S (kg/kmol)	M _{SO₂} (kg/kmol)	\dot{n}_d (kmol/s)	\dot{n}_g (kmol/s)	n _{moles_{prod}} (kmol)	\dot{n}_p (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt CO}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt H}_2\text{O}}$ (kmol/s)
46,01	32	32	64,06	2,00E-06	0,000217	0,007170	0,006523	0,000264	0,000536
46,01	32	32	64,06	3,00E-06	0,000246	0,007297	0,006565	0,000312	0,000626
46,01	32	32	64,06	4,00E-06	0,000285	0,007695	0,006829	0,000366	0,000749
46,01	32	32	64,06	5,00E-06	0,000316	0,007997	0,007031	0,000410	0,000846
46,01	32	32	64,06	6,00E-06	0,000346	0,008121	0,007056	0,000457	0,000950

$\dot{n}_{\text{pt N}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt SO}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_p \text{H}_2\text{O}$ (kmol/s)	$\dot{n}_t \text{O}_2$ (kmol/s)	\dot{n}_{O_2} (kmol/s)	PCI _{C₁₂H₂₆} (kJ/kg)	PCI _{C_{18,74}H_{34,43}O₂} (kJ/kg)	PCI _{C₂H₆} (kJ/kg)	PCI _{C₃H₈} (kJ/kg)	PCI _{C₄H₁₀} (kJ/kg)
0,001985	0	0,000536	0,000527	0,001417	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,002331	0	0,000626	0,000619	0,001434	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,00276	0	0,000749	0,000733	0,001498	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,003105	0	0,000846	0,000825	0,001548	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,003476	0	0,00095	0,000923	0,001561	44143,18	37388	47480	46360	45720

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B50 + gás natural**
(Potência de 40 a 120kW).(Continuação)

PCI _{CH4} (kJ/kg)	PCI _{CO2} (kJ/kg)	PCI _{N2} (kJ/kg)	PCI _{O2} (kJ/kg)	PCI _S (kJ/kg)	φ (%)	Pa (kPa)	Pp (kPa)	Pva (kPa)	Pvp (kPa)
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	2,47468	9,142665
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	2,57379	10,16241
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	3,021974	11,40397
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	3,261503	12,23759
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	3,517275	13,28603

Q̇ (kW)	rend (%)	R̄ (kJ/kmolK)	T _{ad} (C)	T _{ad,arteorico} (C)	T ₀ (K)	T _a (C)	T _d (C)	T _g (C)	T _{orvalho} (C)
-84,17	0,932	8,314	878,15	1732,5	298,15	32,7	44,8	32	44,05
-85,97	0,932	8,314	994,21	1775,8	298,15	33,4	50,7	31	46,11
-91,57	0,932	8,314	1088,43	1768,37	298,15	36,3	54,3	31	48,38
-92,73	0,932	8,314	1160,72	1773,85	298,15	37,7	56,3	32	49,80
-100,27	0,932	8,314	1256,64	1786,32	298,15	39,1	57,6	32	51,46

T _p (C)	T _{ref} (C)	w	Ẇ (kW)	W _{res} (kW)	X _{Air} (%)	$\bar{X} C_{12}H_{26}l_0$ (kJ/kmol)	$\bar{X} C_{12}H_{26},$ quim (kJ/kmol)	$\bar{X} C_{18,74}H_{34,43}O_2l_0$ (kJ/kmol)	$\bar{X} C_{18,74}H_{34,43}O_2l$ quim
353	25	0,016284	42,92	40	173,27	8059340	8059340	11700000	11700000
396	25	0,016954	64,38	60	135,45	8059340	8059340	11700000	11700000
430	25	0,020001	85,84	80	108,45	8059340	8059340	11700000	11700000
455	25	0,021642	107,3	100	91,82	8059340	8059340	11700000	11700000
472	25	0,023403	128,76	120	73,11	8059340	8059340	11700000	11700000

$\bar{X} C_2H_6 l_0$ (kJ/kmol)	$\bar{X} C_2H_6,$ quim (kJ/kmol)	$\bar{X} C_3H_8l_0$ (kJ/kmol)	$\bar{X} C_3H_8,$ quim (kJ/kmol)	$\bar{X} C_4H_{10}l_0$ (kJ/kmol)	$\bar{X} C_4H_{10},$ quim (kJ/kmol)	$\bar{X} CH_4$ quim (kJ/kmol)	$\bar{X} CO_2l_0$ (kJ/kmol)	$\bar{X} CO_2,$ quim (kJ/kmol)	$\bar{X} N_2l_0$ (kJ/kmol)
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720

$\bar{X} N_2,$ quim (kJ/kmol)	$\bar{X} O_2l_0$ (kJ/kmol)	$\bar{X} O_2,$ quim (kJ/kmol)	$\bar{X} SO_2l_0$ (kJ/kmol)	Ẋ (kW)	Ẋ _d (kW)	Ẋ _g (kW)	y _d C ₁₂ H ₂₆ (kmol/kmol)	y _d C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kmol)	y _{d s}
-10103,4	3970	-13706,9	303500	208,38	20,64	187,74	0,49265	0,5	0,00735
-10103,4	3970	-13706,9	303500	244,5	31,68	212,82	0,49265	0,5	0,00735
-10103,4	3970	-13706,9	303500	285,96	39,15	246,81	0,49265	0,5	0,00735
-10103,4	3970	-13706,9	303500	319,62	46,51	273,11	0,49265	0,5	0,00735
-10103,4	3970	-13706,9	303500	355,38	56,24	299,14	0,49265	0,5	0,00735

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B50 + gás natural**
(Potência de 40 a 120kW).(Continuação)

y_g C ₂ H ₆	y_g C ₃ H ₈	y_g C ₄ H ₁₀	y_g CH ₄	y_g CO ₂	y_g N ₂	y_g O ₂	y_p CH ₄	y_p CO	y_p CO ₂
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	1,00E-06	0,001454	0,039
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	1,00E-06	0,001527	0,046
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	1,00E-06	0,00154	0,052
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	0	0,001243	0,057
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	0	0,00074	0,064

y_p N ₂	y_p NO	y_p NO ₂	y_p O ₂	y_p SO ₂	η_{combCa}	η_{comb}	\dot{X} destruída (kW)	\dot{X}_p (kW)	\dot{X}_{p_quim} (kW)
0,817275	9,10E-05	3,00E-06	0,142174	2,00E-06	36,5935	63,249	135,1	26,39	2,743
0,82146	0,000154	8,00E-06	0,130846	4,00E-06	42,4714	63,658	143,1	32,95	3,347
0,825329	0,000211	1,10E-05	0,120903	4,00E-06	47,9728	64,2037	155,8	40,05	3,884
0,828352	0,000307	1,70E-05	0,113076	5,00E-06	52,1321	64,7419	162,6	45,39	3,843
0,832394	0,000617	3,00E-05	0,102213	6,00E-06	57,7651	66,6476	173,2	48,72	3,629

\dot{X}_{p_term} (kW)	\dot{X}_q (kW)
23,64	3,980
29,60	4,038
36,16	4,288
41,54	4,325
45,10	4,662

Apêndice B6

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B60 + gás natural** (Potência de 40 a 120kW).

AC kg de ar/kg de combust.	AC _i kg de ar/kg de	C _p C ₁₂ H ₂₆ (kJ/kg°C)	C _p C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kg°C)	C _p s (kJ/kg°C)	ε (%)	η _{PCI} (%)	E _{PCI} (kW)	fmolarPer (%)	fmolar H ₂ O _{vp} (%)
45,145	16,573	2,21	2,075	0,708	20,5533	21,5029	199,59	9,008334	0,090083
39,925	16,729	2,21	2,075	0,708	24,5574	25,6918	250,58	10,14973	0,101497
34,983	16,806	2,21	2,075	0,708	28,2485	29,5643	290,34	11,32416	0,113242
31,721	16,783	2,21	2,075	0,708	30,964	32,4104	331,05	12,09189	0,120919
29,285	17,054	2,21	2,075	0,708	34,1241	35,7233	360,42	13,33596	0,13336

hp CH ₄ (kJ/kg)	hp CO (kJ/kg)	hp CO ₂ (kJ/kg)	hp H ₂ O (kJ/kg)	hp N ₂ (kJ/kg)	hp NO (kJ/kg)	hp NO ₂ (kJ/kg)	hp O ₂ (kJ/kg)	hp SO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} CH ₄ (kJ/kg)
-3780,30	-3604,7	-8626,79	-12799,7	339,07	3345,46	1025,86	309,42	-4411,65	-1601,41
-3613,10	-3550,62	-8572,98	-12699,5	392,39	3397,23	1075,77	359,26	-4373,71	-1122,02
-3499,47	-3514,98	-8537,21	-12633,1	427,54	3431,36	1108,93	392,14	-4348,56	-562,87
-3397,25	-3483,58	-8505,53	-12574,4	458,5	3461,43	1138,29	421,11	-4326,32	-86,810
-3345,19	-3467,82	-8489,56	-12544,9	474,06	3476,53	1153,09	435,67	-4315,13	334,200

hp _{Tad} CO (kJ/kg)	hp _{Tad} CO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} H ₂ O (kJ/kg)	hp _{Tad} N ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} NO (kJ/kg)	hp _{Tad} NO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} O ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} SO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} teo CO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} teo H ₂ O (kJ/kg)
-2994,00	-7998,94	-11631,6	942,23	3929,56	1604,55	871,63	-3976,63	-6864,74	-9389,54
-2875,04	-7873,89	-11394,3	1059,91	4042,95	1718,60	980,53	-3892,16	-6857,39	-9374,39
-2739,88	-7731,39	-11121,0	1193,63	4171,59	1848,13	1104,02	-3796,78	-6829,83	-9317,45
-2627,25	-7612,38	-10890,2	1305,07	4278,65	1955,97	1206,79	-3717,81	-6784,59	-9223,78
-2529,15	-7508,61	-10687,1	1402,13	4371,78	2049,78	1296,22	-3649,37	-6814,06	-9284,83

hp _{Tad} teo N ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} teo SO ₂ (kJ/kg)	hra H ₂ O (kJ/kg)	hra N ₂ (kJ/kg)	hra O ₂ (kJ/kg)	hr C ₁₂ H ₂₆ (kJ/kg)	Hr C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kg)	hr C ₂ H ₆ (kJ/kg)	hr C ₃ H ₈ (kJ/kg)	hr C ₄ H ₁₀ (kJ/kg)
2003,41	-3227,71	-13408,7	7,710	6,82	-2039,03	-2154	-2796,05	-2336,3	-2151,26
2010,26	-3222,85	-13404,4	10,11	8,94	-2019,36	-2135	-2788,79	-2329,36	-2144,19
2036,00	-3204,61	-13401,4	11,77	10,41	-2010,30	-2127	-2785,13	-2325,86	-2140,62
2078,26	-3174,58	-13401,2	11,88	10,50	-2000,79	-2118	-2781,45	-2322,34	-2137,04
2050,73	-3194,16	-13395,4	15,11	13,36	-1995,49	-2113	-2777,76	-2318,81	-2133,44

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B60 + gás natural** (Potência de 40 a 120kW).(Continuação)

hr CH ₄ (kJ/kg)	hr CO ₂ (kJ/kg)	hr N ₂ (kJ/kg)	hr O ₂ (kJ/kg)	hr S (kJ/kg)	H _p (kW)	H _{pTad} (kW)	H _{pTadteo} (kW)	H _r (kW)	$\dot{m}_{\text{produtos}}$ (kg/s)
-4641,97	-8932,3	11,46	10,14	9,84	-186,45	-59,13	-59,13	-59,13	0,201756
-4632,87	-8928,88	15,63	13,82	16,14	-232,55	-74,25	-74,25	-74,25	0,224634
-4628,31	-8927,17	17,71	15,66	19,05	-270,63	-83,31	-83,31	-83,31	0,22939
-4623,74	-8925,45	19,8	17,5	22,09	-304,85	-88,55	-88,55	-88,55	0,238046
-4619,15	-8923,73	21,88	19,35	23,79	-344,39	-102,89	-102,89	-102,89	0,24009

\dot{m}_{prodteo} (kg/s)	$\dot{m}_{\text{reagentes}}$ (kg/s)	\dot{m}_{reagteo} (kg/s)	\dot{m}_d (kg/h)	\dot{m}_g (kg/h)	\dot{m}_{ar} (kg/h)	M _{ar} (kg/kmol)	M _{C₁₂H₂₆} (kg/kmol)	M _{C_{18,74}H_{34,43}O₂} (kg/kmol)	M _{C₂H₆} (kg/kmol)
0,076963	0,201756	0,076831	1,93	13,81	820,07	28,97	170,33	291,8	30,07
0,097503	0,224634	0,097312	2,42	17,34	918,78	28,97	170,33	291,8	30,07
0,113757	0,229389	0,113513	3,15	19,8	1008,48	28,97	170,33	291,8	30,07
0,129649	0,238045	0,129373	3,73	22,46	1134,76	28,97	170,33	291,8	30,07
0,143494	0,24009	0,143126	4,23	24,31	1129,75	28,97	170,33	291,8	30,07

M _{C₃H₈} (kg/kmol)	M _{C₄H₁₀} (kg/kmol)	M _{CH₄} (kg/kmol)	M _{CO} (kg/kmol)	M _{CO₂} (kg/kmol)	M _{diesel blend} (kg/kmol)	M _{gas} (kg/kmol)	M _{H₂O} (kg/kmol)	M _{N₂} (kg/kmol)	M _{NO} (kg/kmol)
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	242,4	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	242,4	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	242,4	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	242,4	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	242,4	17,81	18,02	28,01	30,01

M _{NO₂} (kg/kmol)	M _{O₂} (kg/kmol)	M _S (kg/kmol)	M _{SO₂} (kg/kmol)	\dot{n}_d (kmol/s)	\dot{n}_g (kmol/s)	n _{molesprod} (kmol)	\dot{n}_p (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt CO}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt H}_2\text{O}}$ (kmol/s)
46,01	32	32	64,06	2,00E-06	0,000215	0,007156	0,006511	0,000265	0,000535
46,01	32	32	64,06	3,00E-06	0,00027	0,007989	0,007178	0,000333	0,000684
46,01	32	32	64,06	4,00E-06	0,000309	0,008179	0,007253	0,000387	0,000801
46,01	32	32	64,06	4,00E-06	0,00035	0,008499	0,007471	0,000442	0,000911
46,01	32	32	64,06	5,00E-06	0,000379	0,008599	0,007452	0,000482	0,001023

$\dot{n}_{\text{pt N}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt SO}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{p H}_2\text{O}}$ (kmol/s)	$\dot{n}_t \text{O}_2$ (kmol/s)	\dot{n}_{O_2} (kmol/s)	PCI _{C₁₂H₂₆} (kJ/kg)	PCI _{C_{18,74}H_{34,43}O₂} (kg/kmol)	PCI _{C₂H₆} (kJ/kg)	PCI _{C₃H₈} (kJ/kg)	PCI _{C₄H₁₀} (kJ/kg)
0,001987	0	0,000535	0,000528	0,001414	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,002518	0	0,000684	0,000669	0,001567	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,002937	0	0,000801	0,00078	0,001592	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,003347	0	0,000911	0,000889	0,001647	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,003706	0	0,001023	0,000984	0,00165	44143,18	37388	47480	46360	45720

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B60 + gás natural**
(Potência de 40 a 120kW).(Continuação)

PCI _{CH4} (kJ/kg)	PCI _{CO2} (kJ/kg)	PCI _{N2} (kJ/kg)	PCI _{O2} (kJ/kg)	PCI _S (kJ/kg)	φ (%)	Pa (kPa)	Pp (kPa)	Pva (kPa)	Pvp (kPa)
50020	0	0	0	9259	50	96	101,33	2,433229	9,127695
50020	0	0	0	9259	50	96	101,33	2,76701	10,28422
50020	0	0	0	9259	50	96	101,33	3,021974	11,4742
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	3,038563	12,2521
50020	0	0	0	9259	50	96	101,33	3,593462	13,51266

Q̇ (kW)	rend (%)	R̄ (kJ/kmolK)	Tad (C)	Tad _{arteorico} (C)	T ₀ (K)	T _a (C)	T _d (C)	T _g (C)	T _{orvalho} (C)
-84,40	0,932	8,314	874,69	1727,04	298,15	32,4	38,9	36	44,02
-93,93	0,932	8,314	972,56	1732,39	298,15	34,7	47,8	40	46,34
-101,49	0,932	8,314	1082,43	1752,45	298,15	36,3	51,9	42	48,51
-109,01	0,932	8,314	1173,06	1785,35	298,15	36,4	56,2	44	49,82
-112,74	0,932	8,314	1251,38	1763,93	298,15	39,5	58,6	46	51,81

T _p (C)	T _{ref} (C)	w	Ẇ (kW)	Wres (kW)	X _{Air} (%)	X̄ C ₁₂ H ₂₆ l0 (kJ/kmol)	X̄ C ₁₂ H ₂₆ , quim (kJ/kmol)	X̄ C _{18,74} H _{34,43} O ₂ l0 (kJ/kmol)	X̄ C _{18,74} H _{34,43} O ₂ l quim
347	25	0,016175	42,92	40	172,41	8059340	8059340	11700000	11700000
396	25	0,01846	64,38	60	138,66	8059340	8059340	11700000	11700000
428	25	0,020216	85,84	80	108,16	8059340	8059340	11700000	11700000
456	25	0,020114	107,3	100	89	8059340	8059340	11700000	11700000
470	25	0,024188	128,76	120	71,72	8059340	8059340	11700000	11700000

X̄ C ₂ H ₆ l0 (kJ/kmol)	X̄ C ₂ H ₆ , quim (kJ/kmol)	X̄ C ₃ H ₈ l0 (kJ/kmol)	X̄ C ₃ H ₈ , quim (kJ/kmol)	X̄ C ₄ H ₁₀ l0 (kJ/kmol)	X̄ C ₄ H ₁₀ , quim (kJ/kmol)	X̄ CH ₄ quim (kJ/kmol)	X̄ CO ₂ l0 (kJ/kmol)	X̄ CO ₂ , quim (kJ/kmol)	X̄ N ₂ l0 (kJ/kmol)
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720

X̄ N ₂ , quim (kJ/kmol)	X̄ O ₂ l0 (kJ/kmol)	X̄ O ₂ , quim (kJ/kmol)	X̄ SO ₂ l0 (kJ/kmol)	Ẋ (kW)	Ẋ _d (kW)	Ẋ _g (kW)	yd C ₁₂ H ₂₆ (kmol/kmol)	yd C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kmol)	yd _s
-10103,4	3970	-13706,9	303500	208,82	22,56	186,25	0,39412	0,6	0,00588
-10103,4	3970	-13706,9	303500	262,15	28,29	233,86	0,39412	0,6	0,00588
-10103,4	3970	-13706,9	303500	303,86	36,82	267,04	0,39412	0,6	0,00588
-10103,4	3970	-13706,9	303500	346,52	43,61	302,91	0,39412	0,6	0,00588
-10103,4	3970	-13706,9	303500	377,31	49,45	327,86	0,39412	0,6	0,00588

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B60 + gás natural** (Potência de 40 a 120kW).(Continuação)

y_g C ₂ H ₆	y_g C ₃ H ₈	y_g C ₄ H ₁₀	y_g CH ₄	y_g CO ₂	y_g N ₂	y_g O ₂	y_p CH ₄	y_p CO	y_p CO ₂
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	1,00E-06	0,001743	0,039
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	1,00E-06	0,001397	0,045
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	1,00E-06	0,001407	0,052
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	0	0,001198	0,058
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	0	0,000707	0,064

y_p N ₂	y_p NO	y_p NO ₂	y_p O ₂	y_p SO ₂	η_{combCa}	η_{comb}	\dot{X} destruída (kW)	\dot{X}_p (kW)	\dot{X}_{p_quim} (kW)
0,817127	0,00010	3,00E-06	0,142024	2,00E-06	36,7096	63,7880	135,70	26,14	3,259
0,821113	0,00016	6,00E-06	0,132316	2,00E-06	41,9006	63,1770	157,60	35,68	3,278
0,825554	0,00024	4,00E-06	0,120788	3,00E-06	48,0408	64,5185	171,20	41,99	3,860
0,829403	0,00033	1,60E-05	0,111046	3,00E-06	52,9087	65,3372	185,50	48,45	4,120
0,833017	0,00065	4,10E-05	0,101583	4,00E-06	58,2343	67,0041	192,00	51,17	3,748

\dot{X}_{p_term} (kW)	\dot{X}_q (kW)
22,88	4,043
32,40	4,499
38,13	4,861
44,33	5,221
47,42	5,400

Apêndice B7

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B70 + gás natural** (Potência de 40 a 120kW).

AC kg de ar/kg de combust.	AC _i kg de ar/kg de	C _p C ₁₂ H ₂₆ (kJ/kg°C)	C _p C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kg°C)	C _p _s (kJ/kg°C)	ε (%)	η _{PCI} (%)	E _{PCI} (kW)	f _{molarPer} (%)	f _{molar} H ₂ O _{vp} (%)
47,570	16,360	2,21	2,075	0,708	20,071	20,9907	204,46	8,220435	0,082204
39,741	16,436	2,21	2,075	0,708	25,7515	26,947	238,91	9,644944	0,096449
34,758	16,441	2,21	2,075	0,708	30,2156	31,6289	271,39	10,69401	0,106940
32,151	16,684	2,21	2,075	0,708	33,0152	34,5621	310,44	11,83955	0,118396
29,647	16,907	2,21	2,075	0,708	35,7886	37,4755	343,57	13,01072	0,130107

hp CH ₄ (kJ/kg)	hp CO (kJ/kg)	hp CO ₂ (kJ/kg)	hp H ₂ O (kJ/kg)	hp N ₂ (kJ/kg)	hp NO (kJ/kg)	hp NO ₂ (kJ/kg)	hp O ₂ (kJ/kg)	hp SO ₂ (kJ/kg)	hp _{rad} CH ₄ (kJ/kg)
-3786,95	-3606,89	-8628,96	-12803,7	336,91	3343,36	1023,84	307,4	-4413,18	-1772,79
-3651,36	-3562,81	-8585,17	-12722,1	380,37	3385,56	1064,47	348,02	-4382,29	-1120,1
-3535,35	-3526,15	-8548,44	-12653,9	416,53	3420,67	1098,52	381,84	-4356,45	-550,61
-3434,06	-3494,82	-8516,88	-12595,4	447,42	3450,67	1127,77	410,75	-4334,29	-122,42
-3367,58	-3474,58	-8496,42	-12557,6	467,38	3470,06	1146,74	429,43	-4319,93	246,30

hp _{rad} CO (kJ/kg)	hp _{rad} CO ₂ (kJ/kg)	hp _{rad} H ₂ O (kJ/kg)	hp _{rad} N ₂ (kJ/kg)	hp _{rad} NO (kJ/kg)	hp _{rad} NO ₂ (kJ/kg)	hp _{rad} O ₂ (kJ/kg)	hp _{rad} SO ₂ (kJ/kg)	hp _{rad} te _o CO ₂ (kJ/kg)	hp _{rad} te _o H ₂ O (kJ/kg)
-3037,37	-8044,41	-11717,3	899,33	3888,18	1562,97	831,88	-4007,53	-6800,18	-9256,08
-2874,56	-7873,39	-11393,3	1060,38	4043,4	1719,05	980,96	-3891,82	-6781,12	-9216,58
-2736,96	-7728,3	-11115	1196,52	4174,37	1850,93	1106,69	-3794,73	-6743,77	-9139,03
-2635,61	-7621,22	-10907,4	1296,8	4270,71	1947,97	1199,17	-3723,65	-6758,46	-9169,55
-2549,53	-7530,17	-10729,5	1381,97	4352,44	2030,3	1277,65	-3663,56	-6805,34	-9266,77

hp _{rad} te _o N ₂ (kJ/kg)	hp _{rad} te _o SO ₂ (kJ/kg)	h _{ra} H ₂ O (kJ/kg)	h _{ra} N ₂ (kJ/kg)	h _{ra} O ₂ (kJ/kg)	h _r C ₁₂ H ₂₆ (kJ/kg)	H _r C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kg)	h _r C ₂ H ₆ (kJ/kg)	h _r C ₃ H ₈ (kJ/kg)	h _r C ₄ H ₁₀ (kJ/kg)
2063,70	-3184,94	-13416	3,65	3,23	-2037,48	-2152	-2805,04	-2344,86	-2160,00
2081,50	-3172,26	-13410,7	6,56	5,81	-2025,33	-2141	-2803,25	-2343,15	-2158,26
2116,39	-3147,36	-13409,2	7,40	6,54	-2016,71	-2133	-2803,25	-2343,15	-2158,26
2102,67	-3157,17	-13402,3	11,25	9,95	-2009,41	1406	-2801,46	-2341,45	-2156,51
2058,88	-3188,36	-13396,5	14,48	12,81	-2003,89	-2121	-2797,86	-2338,02	-2153,02

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B70 + gás natural**
(Potência de 40 a 120kW).(Continuação)

hr CH ₄ (kJ/kg)	hr CO ₂ (kJ/kg)	hr N ₂ (kJ/kg)	hr O ₂ (kJ/kg)	hr S (kJ/kg)	H _p (kW)	H _{pTad} (kW)	H _{pTadteo} (kW)	H _r (kW)	$\dot{m}_{\text{produtos}}$ (kg/s)
-4653,30	-8936,55	6,25	5,53	10,34	-181,44	-54,22	-54,22	-54,22	0,217350
-4651,04	-8935,70	7,29	6,45	14,23	-215,18	-62,11	-62,11	-62,11	0,213893
-4651,04	-8935,70	7,29	6,45	16,99	-243,56	-66,54	-66,54	-66,54	0,213756
-4648,77	-8934,85	8,33	7,37	19,33	-285,77	-79,40	-79,40	-79,40	0,226807
-4644,24	-8933,15	10,42	9,21	21,10	-326,25	-96,37	-96,37	-96,37	0,232493

\dot{m}_{prodteo} (kg/s)	$\dot{m}_{\text{reagentes}}$ (kg/s)	\dot{m}_{reagteo} (kg/s)	\dot{m}_d (kg/h)	\dot{m}_g (kg/h)	\dot{m}_{ar} (kg/h)	M _{ar} (kg/kmol)	M _{C₁₂H₂₆} (kg/kmol)	M _{C_{18,74}H_{34,43}O₂} (kg/kmol)	M _{C₂H₆} (kg/kmol)
0,077791	0,217350	0,077686	1,76	14,35	837,44	28,97	170,33	291,8	30,07
0,091687	0,213893	0,091541	2,51	16,39	928,03	28,97	170,33	291,8	30,07
0,104432	0,213756	0,104257	3,15	18,37	1028,08	28,97	170,33	291,8	30,07
0,121235	0,226807	0,120985	3,68	20,95	1132,53	28,97	170,33	291,8	30,07
0,136177	0,232492	0,135842	4,38	22,93	1134,45	28,97	170,33	291,8	30,07

M _{C₃H₈} (kg/kmol)	M _{C₄H₁₀} (kg/kmol)	M _{CH₄} (kg/kmol)	M _{CO} (kg/kmol)	M _{CO₂} (kg/kmol)	M _{diesel blend} (kg/kmol)	M _{gas} (kg/kmol)	M _{H₂O} (kg/kmol)	M _{N₂} (kg/kmol)	M _{NO} (kg/kmol)
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	254,7	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	254,7	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	254,7	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	254,7	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	254,7	17,81	18,02	28,01	30,01

M _{NO₂} (kg/kmol)	M _{O₂} (kg/kmol)	M _S (kg/kmol)	M _{SO₂} (kg/kmol)	\dot{n}_d (kmol/s)	\dot{n}_g (kmol/s)	n _{molesprod} (kmol)	\dot{n}_p (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt CO}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt H}_2\text{O}}$ (kmol/s)
46,01	32	32	64,06	2,00E-06	0,000224	0,007689	0,007057	0,000271	0,000535
46,01	32	32	64,06	3,00E-06	0,000256	0,007591	0,006859	0,000319	0,000632
46,01	32	32	64,06	3,00E-06	0,000287	0,007602	0,006789	0,000363	0,000720
46,01	32	32	64,06	4,00E-06	0,000327	0,008091	0,007133	0,000416	0,000848
46,01	32	32	64,06	5,00E-06	0,000358	0,008318	0,007236	0,000461	0,000964

$\dot{n}_{\text{pt N}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt SO}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{p H}_2\text{O}}$ (kmol/s)	$\dot{n}_t \text{O}_2$ (kmol/s)	\dot{n}_{O_2} (kmol/s)	PCI _{C₁₂H₂₆} (kJ/kg)	PCI _{C_{18,74}H_{34,43}O₂} (kJ/kg)	PCI _{C₂H₆} (kJ/kg)	PCI _{C₃H₈} (kJ/kg)	PCI _{C₄H₁₀} (kJ/kg)
0,002007	0	0,000535	0,000533	0,001531	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,002366	0	0,000632	0,000628	0,001497	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,002695	0	0,00072	0,000716	0,001489	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,003129	0	0,000848	0,000831	0,001571	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,003516	0	0,000964	0,000934	0,001601	44143,18	37388	47480	46360	45720

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B70 + gás natural**
(Potência de 40 a 120kW).(Continuação)

PCI _{CH4} (kJ/kg)	PCI _{CO2} (kJ/kg)	PCI _{N2} (kJ/kg)	PCI _{O2} (kJ/kg)	PCI _S (kJ/kg)	φ (%)	Pa (kPa)	Pp (kPa)	Pva (kPa)	Pvp (kPa)
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	1,946709	8,329356
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	2,286352	9,77274
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	2,392381	10,83571
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	2,940199	11,99643
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	3,479708	13,18311

Q̇ (kW)	rend (%)	R̄ (kJ/kmolK)	Tad (C)	Tad _{arteorico} (C)	T ₀ (K)	T _a (C)	T _d (C)	T _g (C)	T _{orvalho} (C)
-84,30	0,932	8,314	838,70	1774,02	298,15	28,5	39,6	31	42,26
-88,69	0,932	8,314	972,94	1787,88	298,15	31,3	45,1	32	45,34
-91,18	0,932	8,314	1084,79	1815,00	298,15	32,1	49,0	32	47,37
-99,08	0,932	8,314	1166,36	1804,33	298,15	35,8	52,3	33	49,40
-101,13	0,932	8,314	1235,15	1770,27	298,15	38,9	54,8	35	51,30

T _p (C)	T _{ref} (C)	w	Ẇ (kW)	Wres (kW)	X _{Air} (%)	X̄ C ₁₂ H ₂₆ l0 (kJ/kmol)	X̄ C ₁₂ H ₂₆ , quim (kJ/kmol)	X̄ C _{18,74} H _{34,43} O ₂ l0 (kJ/kmol)	X̄ C _{18,74} H _{34,43} O ₂ l quim
345	25	0,012739	42,92	40	190,77	8059340	8059340	11700000	11700000
385	25	0,015015	64,38	60	141,79	8059340	8059340	11700000	11700000
418	25	0,015729	85,84	80	111,41	8059340	8059340	11700000	11700000
446	25	0,019443	107,3	100	92,71	8059340	8059340	11700000	11700000
464	25	0,023143	128,76	120	75,36	8059340	8059340	11700000	11700000

X̄ C ₂ H ₆ l0 (kJ/kmol)	X̄ C ₂ H ₆ , quim (kJ/kmol)	X̄ C ₃ H ₈ l0 (kJ/kmol)	X̄ C ₃ H ₈ , quim (kJ/kmol)	X̄ C ₄ H ₁₀ l0 (kJ/kmol)	X̄ C ₄ H ₁₀ , quim (kJ/kmol)	X̄ CH ₄ quim (kJ/kmol)	X̄ CO ₂ l0 (kJ/kmol)	X̄ CO ₂ , quim (kJ/kmol)	X̄ N ₂ l0 (kJ/kmol)
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720

X̄ N ₂ , quim (kJ/kmol)	X̄ O ₂ l0 (kJ/kmol)	X̄ O ₂ , quim (kJ/kmol)	X̄ SO ₂ l0 (kJ/kmol)	Ẋ (kW)	Ẋ d (kW)	Ẋ g (kW)	yd C ₁₂ H ₂₆ (kmol/kmol)	yd C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kmol)	yd _s
-10103,4	3970	-13706,9	303500	213,83	20,3	193,54	0,29559	0,7	0,00441
-10103,4	3970	-13706,9	303500	250	28,95	221,05	0,29559	0,7	0,00441
-10103,4	3970	-13706,9	303500	284,08	36,33	247,75	0,29559	0,7	0,00441
-10103,4	3970	-13706,9	303500	324,99	42,44	282,55	0,29559	0,7	0,00441
-10103,4	3970	-13706,9	303500	359,77	50,51	309,25	0,29559	0,7	0,00441

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B70 + gás natural**
(Potência de 40 a 120Kw).(Continuação)

Yg C2H6	Yg C3H8	Yg C4H10	Yg CH4	Yg CO2	Yg N2	Yg O2	Yp CH4	Yp CO	Yp CO2
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	1,00E-06	0,001391	0,037
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	1,00E-06	0,001439	0,045
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	1,00E-06	0,001486	0,052
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	0	0,001278	0,057
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	0	0,000767	0,063

Yp N2	Yp NO	Yp NO2	Yp O2	Yp SO2	η_{combCa}	η_{comb}	\dot{X} destruída (kW)	\dot{X}_p (kW)	\dot{X}_{p_quim} (kW)
0,815843	8,60E-05	5,00E-06	0,145673	1,00E-06	34,3916	62,2196	139,7	27,14	2,849
0,820880	0,000171	9,00E-06	0,132498	2,00E-06	41,3581	64,0716	148,8	32,61	3,323
0,825319	0,000242	2,50E-05	0,120925	2,00E-06	47,3004	65,2279	156,0	37,88	3,887
0,828513	0,000344	1,80E-05	0,112844	2,00E-06	51,8915	66,4781	168,3	44,63	4,030
0,831988	0,000605	4,90E-05	0,103588	3,00E-06	57,0266	66,9108	177,7	48,52	3,672

\dot{X}_{p_term} (kW)	\dot{X}_q (kW)
24,29	4,038
29,28	4,248
33,99	4,368
40,60	4,746
44,84	4,844

Apêndice B8

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B80 + gás natural** (Potência de 40 a 120kW).

AC kg de ar/kg de combust.	AC _i kg de ar/kg de	C _p C ₁₂ H ₂₆ (kJ/kg°C)	C _p C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kg°C)	C _p _s (kJ/kg°C)	ε (%)	η _{PCI} (%)	E _{PCI} (kW)	fmolarPer (%)	fmolar H ₂ Ovp (%)
48,822	16,608	2,21	2,075	0,708	19,7515	20,6598	207,74	8,675753	0,086758
39,825	16,629	2,21	2,075	0,708	25,2338	26,4032	243,83	10,07403	0,100740
34,868	16,740	2,21	2,075	0,708	28,5017	29,8277	287,78	11,30551	0,113055
31,729	16,862	2,21	2,075	0,708	31,3076	32,7625	327,50	12,31530	0,123153
29,157	16,816	2,21	2,075	0,708	34,3212	35,9324	358,33	13,01552	0,130155

hp CH ₄ (kJ/kg)	hp CO (kJ/kg)	hp CO ₂ (kJ/kg)	hp H ₂ O (kJ/kg)	hp N ₂ (kJ/kg)	hp NO (kJ/kg)	hp NO ₂ (kJ/kg)	hp O ₂ (kJ/kg)	hp SO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} CH ₄ (kJ/kg)
-3770,31	-3601,4	-8623,53	-12793,6	342,32	3348,61	1028,88	312,45	-4409,35	-1864,14
-3623,58	-3553,95	-8576,31	-12705,6	389,11	3394,04	1072,68	356,19	-4376,06	-1129,86
-3499,47	-3514,98	-8537,21	-12633,1	427,54	3431,36	1108,93	392,14	-4348,56	-563,78
-3412,01	-3488,08	-8510,08	-12582,8	454,07	3457,13	1134,08	416,96	-4329,51	-98,280
-3360,13	-3472,33	-8494,13	-12553,3	469,61	3472,21	1148,85	431,51	-4318,33	338,09

hp _{Tad} CO (kJ/kg)	hp _{Tad} CO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} H ₂ O (kJ/kg)	hp _{Tad} N ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} NO (kJ/kg)	hp _{Tad} NO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} O ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} SO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} teo CO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} teo H ₂ O (kJ/kg)
-3060,69	-8068,83	-11763,2	876,26	3865,92	1540,62	810,49	-4024,17	-6931,34	-9526,61
-2876,96	-7875,91	-11398,1	1058,01	4041,12	1716,76	978,77	-3893,51	-6850,61	-9360,37
-2740,1	-7731,62	-11121,4	1193,41	4171,38	1847,92	1103,82	-3796,94	-6827,24	-9312,10
-2629,94	-7615,23	-10895,8	1302,41	4276,09	1953,39	1204,34	-3719,69	-6813,29	-9283,24
-2528,25	-7507,65	-10685,3	1403,02	4372,63	2050,64	1297,04	-3648,75	-6780,65	-9215,60

hp _{Tad} teo N ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} teo SO ₂ (kJ/kg)	hra H ₂ O (kJ/kg)	hra N ₂ (kJ/kg)	hra O ₂ (kJ/kg)	hr C ₁₂ H ₂₆ (kJ/kg)	Hr C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kg)	hr C ₂ H ₆ (kJ/kg)	hr C ₃ H ₈ (kJ/kg)	hr C ₄ H ₁₀ (kJ/kg)
1941,22	-3271,61	-13406,4	8,96	7,92	-2025,55	-2141	-2792,43	-2332,84	-2147,73
2016,60	-3218,37	-13404,5	10,00	8,85	-2012,95	-2129	-2790,61	-2331,1	-2145,96
2038,42	-3202,90	-13401,2	11,88	10,50	-2002,56	-2119	-2785,13	-2325,86	-2140,62
2051,45	-3193,64	-13398,6	13,34	11,79	-2008,75	-2125	-2781,45	-2322,34	-2137,04
2081,94	-3171,95	-13398,2	13,54	11,98	-1996,60	-2114	-2779,61	-2320,58	-2135,24

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B80 + gás natural**
(Potência de 40 a 120kW).(Continuação)

hr CH ₄ (kJ/kg)	hr CO ₂ (kJ/kg)	hr N ₂ (kJ/kg)	hr O ₂ (kJ/kg)	hr S (kJ/kg)	H _p (kW)	H _{pTad} (kW)	H _{pTadteo} (kW)	H _r (kW)	$\dot{m}_{\text{produtos}}$ (kg/s)
-4637,42	-8930,59	13,54	11,98	14,16	-194,22	-67,71	-67,71	-67,71	0,227107
-4635,15	-8929,74	14,59	12,90	18,20	-226,09	-71,53	-71,53	-71,53	0,218982
-4628,31	-8927,17	17,71	15,66	21,52	-267,92	-82,33	-82,33	-82,33	0,227362
-4623,74	-8925,45	19,80	17,50	19,54	-307,65	-92,47	-92,47	-92,47	0,236009
-4621,45	-8924,59	20,84	18,43	23,43	-337,28	-96,25	-96,25	-96,25	0,238744

\dot{m}_{prodteo} (kg/s)	$\dot{m}_{\text{reagentes}}$ (kg/s)	\dot{m}_{reagteo} (kg/s)	\dot{m}_d (kg/h)	\dot{m}_g (kg/h)	\dot{m}_{ar} (kg/h)	M _{ar} (kg/kmol)	M _{C₁₂H₂₆} (kg/kmol)	M C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kg/kmol)	M _{C₂H₆} (kg/kmol)
0,080411	0,227107	0,080264	1,92	14,49	828,94	28,97	170,33	291,8	30,07
0,094745	0,218982	0,094562	2,53	16,78	918,66	28,97	170,33	291,8	30,07
0,112693	0,227362	0,112452	3,15	19,67	1016,29	28,97	170,33	291,8	30,07
0,129106	0,236009	0,128808	3,53	22,43	1108,67	28,97	170,33	291,8	30,07
0,141373	0,238744	0,141043	4,40	24,10	1123,35	28,97	170,33	291,8	30,07

M _{C₃H₈} (kg/kmol)	M _{C₄H₁₀} (kg/kmol)	M _{CH₄} (kg/kmol)	M _{CO} (kg/kmol)	M _{CO₂} (kg/kmol)	M _{diesel blend} (kg/kmol)	M _{gas} (kg/kmol)	M _{H₂O} (kg/kmol)	M _{N₂} (kg/kmol)	M _{NO} (kg/kmol)
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	267,1	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	267,1	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	267,1	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	267,1	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	267,1	17,81	18,02	28,01	30,01

M _{NO₂} (kg/kmol)	M _{O₂} (kg/kmol)	M _S (kg/kmol)	M _{SO₂} (kg/kmol)	\dot{n}_d (kmol/s)	\dot{n}_g (kmol/s)	$n_{\text{moles}_{\text{prod}}}$ (kmol)	\dot{n}_p (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt CO}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt H}_2\text{O}}$ (kmol/s)
46,01	32	32	64,06	2,00E-06	0,000226	0,008051	0,007353	0,000276	0,000562
46,01	32	32	64,06	3,00E-06	0,000262	0,007785	0,007001	0,000325	0,000662
46,01	32	32	64,06	3,00E-06	0,000307	0,008106	0,00719	0,000384	0,000793
46,01	32	32	64,06	4,00E-06	0,00035	0,008434	0,007395	0,000437	0,000915
46,01	32	32	64,06	5,00E-06	0,000376	0,00854	0,007428	0,000481	0,000998

$\dot{n}_{\text{pt N}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt SO}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{p H}_2\text{O}}$ (kmol/s)	$\dot{n}_i \text{ O}_2$ (kmol/s)	\dot{n}_{O_2} (kmol/s)	PCI _{C₁₂H₂₆} (kJ/kg)	PCI C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kg)	PCI _{C₂H₆} (kJ/kg)	PCI _{C₃H₈} (kJ/kg)	PCI _{C₄H₁₀} (kJ/kg)
0,002076	0	0,000562	0,000551	0,001593	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,002446	0	0,000662	0,00065	0,001528	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,002909	0	0,000793	0,000773	0,001578	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,003334	0	0,000915	0,000885	0,00163	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,003650	0	0,000998	0,000969	0,001645	44143,18	37388	47480	46360	45720

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B80 + gás natural**
(Potência de 40 a 120kW).(Continuação)

PCI _{CH4} (kJ/kg)	PCI _{CO2} (kJ/kg)	PCI _{N2} (kJ/kg)	PCI _{O2} (kJ/kg)	PCI _S (kJ/kg)	φ (%)	Pa (kPa)	Pp (kPa)	Pva (kPa)	Pvp (kPa)
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	2,602732	8,790707
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	2,751714	10,20751
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	3,038563	11,45531
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	3,279223	12,47848
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	3,314913	13,18798

Q̇ (kW)	rend (%)	R̄ (kJ/kmolK)	T _{ad} (C)	T _{ad,arteorico} (C)	T ₀ (K)	T _a (C)	T _d (C)	T _g (C)	T _{orvalho} (C)
-83,59	0,932	8,314	819,27	1678,46	298,15	33,6	45,0	38	43,29
-90,19	0,932	8,314	970,99	1737,33	298,15	34,6	50,7	39	46,19
-99,76	0,932	8,314	1082,25	1754,34	298,15	36,4	55,4	42	48,47
-107,89	0,932	8,314	1170,9	1764,49	298,15	37,8	52,6	44	50,19
-112,27	0,932	8,314	1252,1	1788,22	298,15	38,0	58,1	45	51,31

T _p (C)	T _{ref} (C)	w	Ẇ (kW)	W _{res} (kW)	X _{Air} (%)	X̄ C ₁₂ H ₂₆ l0 (kJ/kmol)	X̄ C ₁₂ H ₂₆ , quim (kJ/kmol)	X̄ C _{18,74} H _{34,43} O ₂ l0 (kJ/kmol)	X̄ C _{18,74} H _{34,43} O ₂ l quim
350	25	0,01715	42,92	40	193,96	8059340	8059340	11700000	11700000
393	25	0,01816	64,38	60	139,49	8059340	8059340	11700000	11700000
428	25	0,020114	85,84	80	108,29	8059340	8059340	11700000	11700000
452	25	0,021763	107,3	100	88,16	8059340	8059340	11700000	11700000
466	25	0,022009	128,76	120	73,39	8059340	8059340	11700000	11700000

X̄ C ₂ H ₆ l0 (kJ/kmol)	X̄ C ₂ H ₆ , quim (kJ/kmol)	X̄ C ₃ H ₈ l0 (kJ/kmol)	X̄ C ₃ H ₈ , quim (kJ/kmol)	X̄ C ₄ H ₁₀ l0 (kJ/kmol)	X̄ C ₄ H ₁₀ , quim (kJ/kmol)	X̄ CH ₄ quim (kJ/kmol)	X̄ CO ₂ l0 (kJ/kmol)	X̄ CO ₂ , quim (kJ/kmol)	X̄ N ₂ l0 (kJ/kmol)
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720

X̄ N ₂ , quim (kJ/kmol)	X̄ O ₂ l0 (kJ/kmol)	X̄ O ₂ , quim (kJ/kmol)	X̄ SO ₂ l0 (kJ/kmol)	Ẋ (kW)	Ẋ _d (kW)	Ẋ _g (kW)	y _d C ₁₂ H ₂₆ (kmol/kmol)	y _d C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kmol)	y _{d s}
-10103,4	3970	-13706,9	303500	217,29	21,87	195,42	0,19706	0,8	0,00294
-10103,4	3970	-13706,9	303500	255,13	28,82	226,31	0,19706	0,8	0,00294
-10103,4	3970	-13706,9	303500	301,16	35,88	265,29	0,19706	0,8	0,00294
-10103,4	3970	-13706,9	303500	342,72	40,21	302,51	0,19706	0,8	0,00294
-10103,4	3970	-13706,9	303500	375,15	50,12	325,03	0,19706	0,8	0,00294

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B80 + gás natural** (Potência de 40 a 120kW).(Continuação)

y_g C ₂ H ₆	y_g C ₃ H ₈	y_g C ₄ H ₁₀	y_g CH ₄	y_g CO ₂	y_g N ₂	y_g O ₂	y_p CH ₄	y_p CO	y_p CO ₂
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	1,00E-06	0,001528	0,036
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	1,00E-06	0,001434	0,045
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	1,00E-06	0,001464	0,052
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	0	0,001123	0,058
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	0	0,000717	0,064

y_p N ₂	y_p NO	y_p NO ₂	y_p O ₂	y_p SO ₂	η_{combCa}	η_{comb}	\dot{X} destruída (kW)	\dot{X}_p (kW)	\dot{X}_{p_quim} (kW)
0,815039	9,40E-05	1,00E-06	0,147337	1,00E-06	34,0178	60,8980	141,2	29,13	3,027
0,820877	0,000168	9,00E-06	0,13251	1,00E-06	41,7561	63,3912	152,0	34,44	3,283
0,825454	0,000242	8,00E-06	0,12083	1,00E-06	48,0102	64,4922	168,8	41,73	3,939
0,829428	0,000338	1,70E-05	0,111092	1,00E-06	53,1461	65,7063	183,0	47,23	3,880
0,832726	0,000638	4,10E-05	0,101876	2,00E-06	57,6734	67,2641	190,8	50,19	3,802

\dot{X}_{p_term} (kW)	\dot{X}_q (kW)
26,11	4,004
31,15	4,320
37,79	4,778
43,35	5,168
46,39	5,378

Apêndice B9

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B90 + gás natural** (Potência de 40 a 120kW).

AC kg de ar/kg de combust.	AC _i kg de ar/kg de de	C _p C ₁₂ H ₂₆ (kJ/kg°C)	C _p C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kg°C)	C _{p_s} (kJ/kg°C)	ε (%)	η _{PCI} (%)	E _{PCI} (kW)	fmolarPer (%)	fmolar H ₂ O _{vp} (%)
48,967	16,423	2,21	2,075	0,708	20,0128	20,9300	205,06	8,271820	0,082718
41,458	16,380	2,21	2,075	0,708	25,7227	26,9125	239,21	9,298634	0,092986
34,704	16,359	2,21	2,075	0,708	30,0927	31,4952	272,54	10,60637	0,106064
32,042	16,373	2,21	2,075	0,708	33,1317	34,6796	309,39	11,30403	0,113040
28,983	16,385	2,21	2,075	0,708	36,2330	37,9371	339,39	12,25306	0,122531

hp CH ₄ (kJ/kg)	hp CO (kJ/kg)	hp CO ₂ (kJ/kg)	hp H ₂ O (kJ/kg)	hp N ₂ (kJ/kg)	hp NO (kJ/kg)	hp NO ₂ (kJ/kg)	hp O ₂ (kJ/kg)	hp SO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} CH ₄ (kJ/kg)
-3770,31	-3601,40	-8623,53	-12793,6	342,32	3348,61	1028,88	312,45	-4409,35	-1869,85
-3634,02	-3557,28	-8579,63	-12711,8	385,83	3390,86	1069,60	353,12	-4378,4	-1291,80
-3510,27	-3518,33	-8540,59	-12639,3	424,23	3428,15	1105,80	389,05	-4350,93	-551,320
-3419,37	-3490,33	-8512,35	-12587,0	451,85	3454,97	1131,98	414,89	-4331,10	-161,710
-3356,40	-3471,20	-8492,99	-12551,2	470,72	3473,29	1149,91	432,55	-4317,53	362,540

hp _{Tad} CO (kJ/kg)	hp _{Tad} CO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} H ₂ O (kJ/kg)	hp _{Tad} N ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} NO (kJ/kg)	hp _{Tad} NO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} O ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} SO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tadteo} CO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tadteo} H ₂ O (kJ/kg)
-3062,15	-8070,36	-11766,1	874,82	3864,53	1539,22	809,15	-4025,21	-6859,27	-9378,26
-2916,80	-7917,84	-11478,0	1018,59	4003,16	1678,56	942,32	-3921,76	-6791,41	-9237,92
-2737,13	-7728,48	-11115,3	1196,36	4174,21	1850,77	1106,54	-3794,85	-6731,92	-9114,38
-2644,84	-7630,98	-10926,4	1287,67	4261,93	1939,13	1190,75	-3730,11	-6712,32	-9073,58
-2522,59	-7501,66	-10673,5	1408,62	4378,00	2056,05	1302,20	-3644,81	-6692,80	-9032,88

hp _{Tadteo} N ₂ (kJ/kg)	hp _{Tadteo} SO ₂ (kJ/kg)	hra H ₂ O (kJ/kg)	hra N ₂ (kJ/kg)	hra O ₂ (kJ/kg)	hr C ₁₂ H ₂₆ (kJ/kg)	Hr C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kg)	hr C ₂ H ₆ (kJ/kg)	hr C ₃ H ₈ (kJ/kg)	hr C ₄ H ₁₀ (kJ/kg)
2008,51	-3224,09	-13412,0	5,83	5,16	-2013,83	-2130	-2803,25	-2343,15	-2158,26
2071,89	-3179,11	-13411,5	6,15	5,44	-2006,10	-2123	-2803,25	-2343,15	-2158,26
2127,46	-3139,43	-13410,5	6,67	5,90	-2001,46	-2118	-2801,46	-2341,45	-2156,51
2145,77	-3126,30	-13409,6	7,19	6,36	-1998,58	-2116	-2801,46	-2341,45	-2156,51
2164,02	-3113,19	-13407,9	8,13	7,19	-1996,15	-2113	-2799,66	-2339,74	-2154,77

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B90 + gás natural**
(Potência de 40 a 120kW).(Continuação)

hr CH ₄ (kJ/kg)	hr CO ₂ (kJ/kg)	hr N ₂ (kJ/kg)	hr O ₂ (kJ/kg)	hr S (kJ/kg)	H _p (kW)	H _{pTad} (kW)	H _{pTadteo} (kW)	H _r (kW)	$\dot{m}_{\text{produtos}}$ (kg/s)
-4651,04	-8935,7	7,29	6,45	17,91	-184,51	-59,90	-59,90	-59,90	0,224851
-4651,04	-8935,7	7,29	6,45	20,39	-211,72	-63,21	-63,21	-63,21	0,223613
-4648,77	-8934,85	8,33	7,37	21,88	-241,42	-65,40	-65,40	-65,40	0,214819
-4648,77	-8934,85	8,33	7,37	22,80	-273,43	-71,86	-71,86	-71,86	0,225880
-4646,51	-8934,00	9,38	8,29	23,58	-303,90	-76,36	-76,36	-76,36	0,225375

\dot{m}_{prodteo} (kg/s)	$\dot{m}_{\text{reagentes}}$ (kg/s)	\dot{m}_{reagteo} (kg/s)	\dot{m}_d (kg/h)	\dot{m}_g (kg/h)	\dot{m}_{ar} (kg/h)	M _{ar} (kg/kmol)	M _{C₁₂H₂₆} (kg/kmol)	M _{C_{18,74}H_{34,43}O₂} (kg/kmol)	M _{C₂H₆} (kg/kmol)
0,078522	0,224850	0,078402	1,81	14,39	842,66	28,97	170,33	291,8	30,07
0,091675	0,223612	0,091532	2,44	16,52	918,47	28,97	170,33	291,8	30,07
0,104610	0,214819	0,104443	3,09	18,57	1008,47	28,97	170,33	291,8	30,07
0,118958	0,225880	0,118762	3,62	20,99	1108,58	28,97	170,33	291,8	30,07
0,130904	0,225374	0,130677	4,31	22,75	1102,16	28,97	170,33	291,8	30,07

M _{C₃H₈} (kg/kmol)	M _{C₄H₁₀} (kg/kmol)	M _{CH₄} (kg/kmol)	M _{CO} (kg/kmol)	M _{CO₂} (kg/kmol)	M _{diesel blend} (kg/kmol)	M _{gas} (kg/kmol)	M _{H₂O} (kg/kmol)	M _{N₂} (kg/kmol)	M _{NO} (kg/kmol)
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	279,4	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	279,4	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	279,4	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	279,4	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	279,4	17,81	18,02	28,01	30,01

M _{NO₂} (kg/kmol)	M _{O₂} (kg/kmol)	M _S (kg/kmol)	M _{SO₂} (kg/kmol)	\dot{n}_d (kmol/s)	\dot{n}_g (kmol/s)	$n_{\text{moles}_{\text{prod}}}$ (kmol)	\dot{n}_p (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt CO}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt H}_2\text{O}}$ (kmol/s)
46,01	32	32	64,06	2,00E-06	0,000224	0,007958	0,007300	0,000272	0,000543
46,01	32	32	64,06	2,00E-06	0,000258	0,007930	0,007192	0,000319	0,000632
46,01	32	32	64,06	3,00E-06	0,00029	0,007637	0,006827	0,000365	0,000720
46,01	32	32	64,06	4,00E-06	0,000327	0,008041	0,007132	0,000414	0,000819
46,01	32	32	64,06	4,00E-06	0,000355	0,008036	0,007051	0,000456	0,000901

$\dot{n}_{\text{pt N}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt SO}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{p H}_2\text{O}}$ (kmol/s)	$\dot{n}_i \text{ O}_2$ (kmol/s)	\dot{n}_{O_2} (kmol/s)	PCI _{C₁₂H₂₆} (kJ/kg)	PCI _{C_{18,74}H_{34,43}O₂} (kJ/kg)	PCI _{C₂H₆} (kJ/kg)	PCI _{C₃H₈} (kJ/kg)	PCI _{C₄H₁₀} (kJ/kg)
0,002026	0	0,000543	0,000538	0,001582	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,002365	0	0,000632	0,000628	0,001567	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,002699	0	0,00072	0,000717	0,001498	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,003069	0	0,000819	0,000815	0,001571	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,003377	0	0,000901	0,000897	0,001561	44143,18	37388	47480	46360	45720

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B90 + gás natural**
(Potência de 40 a 120kW).(Continuação)

PCI _{CH4} (kJ/kg)	PCI _{CO2} (kJ/kg)	PCI _{N2} (kJ/kg)	PCI _{O2} (kJ/kg)	PCI _S (kJ/kg)	φ (%)	Pa (kPa)	Pp (kPa)	Pva (kPa)	Pvp (kPa)
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	2,196948	8,381422
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	2,234885	9,421841
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	2,299378	10,7469
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	2,365481	11,45381
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	2,488632	12,41541

Q̇ (kW)	rend (%)	R̄ (kJ/kmolK)	Tad (C)	Tad _{arteorico} (C)	T ₀ (K)	T _a (C)	T _d (C)	T _g (C)	T _{orvalho} (C)
-81,69	0,932	8,314	818,05	1731,02	298,15	30,6	50,3	32	42,38
-84,13	0,932	8,314	938,33	1780,4	298,15	30,9	53,8	32	44,63
-90,18	0,932	8,314	1084,66	1823,6	298,15	31,4	55,9	33	47,21
-94,27	0,932	8,314	1158,95	1837,81	298,15	31,9	57,2	33	48,47
-98,78	0,932	8,314	1256,6	1851,97	298,15	32,8	58,3	34	50,09

T _p (C)	T _{ref} (C)	w	Ẇ (kW)	Wres (kW)	X _{Air} (%)	X̄ C ₁₂ H ₂₆ l0 (kJ/kmol)	X̄ C ₁₂ H ₂₆ , quim (kJ/kmol)	X̄ C _{18,74} H _{34,43} O ₂ l0 (kJ/kmol)	X̄ C _{18,74} H _{34,43} O ₂ l quim
350	25	0,014414	42,92	40	198,17	8059340	8059340	11700000	11700000
390	25	0,014669	64,38	60	153,11	8059340	8059340	11700000	11700000
425	25	0,015102	85,84	80	112,14	8059340	8059340	11700000	11700000
450	25	0,015547	107,3	100	95,7	8059340	8059340	11700000	11700000
467	25	0,016378	128,76	120	76,89	8059340	8059340	11700000	11700000

X̄ C ₂ H ₆ l0 (kJ/kmol)	X̄ C ₂ H ₆ , quim (kJ/kmol)	X̄ C ₃ H ₈ l0 (kJ/kmol)	X̄ C ₃ H ₈ , quim (kJ/kmol)	X̄ C ₄ H ₁₀ l0 (kJ/kmol)	X̄ C ₄ H ₁₀ , quim (kJ/kmol)	X̄ CH ₄ quim (kJ/kmol)	X̄ CO ₂ l0 (kJ/kmol)	X̄ CO ₂ , quim (kJ/kmol)	X̄ N ₂ l0 (kJ/kmol)
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720

X̄ N ₂ , quim (kJ/kmol)	X̄ O ₂ l0 (kJ/kmol)	X̄ O ₂ , quim (kJ/kmol)	X̄ SO ₂ l0 (kJ/kmol)	Ẋ (kW)	Ẋ _d (kW)	Ẋ _g (kW)	yd C ₁₂ H ₂₆ (kmol/kmol)	yd C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kmol)	yd _s
-10103,4	3970	-13706,9	303500	214,45	20,38	194,08	0,09853	0,9	0,00147
-10103,4	3970	-13706,9	303500	250,28	27,47	222,80	0,09853	0,9	0,00147
-10103,4	3970	-13706,9	303500	285,24	34,79	250,45	0,09853	0,9	0,00147
-10103,4	3970	-13706,9	303500	323,85	40,76	283,09	0,09853	0,9	0,00147
-10103,4	3970	-13706,9	303500	355,35	48,53	306,82	0,09853	0,9	0,00147

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B90 + gás natural** (Potência de 40 a 120kW).(Continuação)

y_g C ₂ H ₆	y_g C ₃ H ₈	y_g C ₄ H ₁₀	y_g CH ₄	y_g CO ₂	y_g N ₂	y_g O ₂	y_p CH ₄	y_p CO	y_p CO ₂
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	1,00E-06	0,001272	0,036
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	1,00E-06	0,001332	0,043
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	1,00E-06	0,001412	0,052
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	0	0,001115	0,057
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	0	0,000689	0,064

y_p N ₂	y_p NO	y_p NO ₂	y_p O ₂	y_p SO ₂	η_{combCa}	η_{comb}	\dot{X} destruída (kW)	\dot{X}_p (kW)	\dot{X}_{p_quim} (kW)
0,815028	8,40E-05	7,00E-06	0,147607	0	33,5383	60,7679	139,2	28,38	2,594
0,819498	0,000165	1,20E-05	0,135992	0	39,5088	62,0838	147,5	34,40	3,146
0,825290	0,000239	2,20E-05	0,121036	1,00E-06	47,1386	64,5853	156,2	38,92	3,783
0,828419	0,000345	1,40E-05	0,113106	1,00E-06	51,0976	65,1494	167,3	44,75	3,813
0,832484	0,000713	5,60E-05	0,102057	1,00E-06	56,5325	67,0423	174,4	47,50	3,732

\dot{X}_{p_term} (kW)	\dot{X}_q (kW)
25,79	3,913
31,25	4,030
35,14	4,320
40,94	4,516
43,77	4,732

Apêndice B10

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B100 + gás natural** (Potência de 40 a 120Kw).

AC kg de ar/kg de combust.	AC _i kg de ar/kg de de	C _p C ₁₂ H ₂₆ (kJ/kg°C)	C _p C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kg°C)	C _p _s (kJ/kg°C)	ε (%)	η _{PCI} (%)	E _{PCI} (kW)	fmolarPer (%)	fmolar H ₂ Ovp (%)
50,396	16,605	2,21	2,075	0,708	19,3544	20,2380	212,07	8,50043	0,085004
39,702	16,527	2,21	2,075	0,708	25,2446	26,4113	243,75	9,943274	0,099433
34,734	16,51	2,21	2,075	0,708	29,4129	30,7756	278,91	10,91707	0,109171
31,601	16,601	2,21	2,075	0,708	32,2355	33,7319	318,08	11,8962	0,118962
29,014	16,522	2,21	2,075	0,708	35,2182	36,8733	349,18	12,56232	0,125623

hp CH ₄ (kJ/kg)	hp CO (kJ/kg)	hp CO ₂ (kJ/kg)	hp H ₂ O (kJ/kg)	hp N ₂ (kJ/kg)	hp NO (kJ/kg)	hp NO ₂ (kJ/kg)	hp O ₂ (kJ/kg)	hp SO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} CH ₄ (kJ/kg)
-3770,31	-3601,4	-8623,53	-12793,6	342,32	3348,61	1028,88	312,45	-4409,35	-1955,77
-3630,54	-3556,17	-8578,53	-12709,8	386,92	3391,92	1070,62	354,15	-4377,62	-1126,04
-3513,86	-3519,45	-8541,71	-12641,4	423,13	3427,08	1104,76	388,02	-4351,72	-551,24
-3423,05	-3491,45	-8513,48	-12589,1	450,74	3453,9	1130,92	413,85	-4331,9	-88,11
-3363,86	-3473,45	-8495,27	-12555,4	468,5	3471,14	1147,79	430,47	-4319,13	346,48

hp _{Tad} CO (kJ/kg)	hp _{Tad} CO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} H ₂ O (kJ/kg)	hp _{Tad} N ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} NO (kJ/kg)	hp _{Tad} NO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} O ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} SO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} teco CO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} teco H ₂ O (kJ/kg)
-3084,23	-8093,46	-11809,4	852,98	3843,44	1518,07	788,88	-4040,98	-6947,26	-9559,28
-2876,02	-7874,93	-11396,3	1058,94	4042,01	1717,66	979,63	-3892,85	-6828,32	-9314,32
-2737,11	-7728,46	-11115,3	1196,37	4174,23	1850,79	1106,56	-3794,83	-6771,27	-9196,15
-2627,55	-7612,70	-10890,8	1304,77	4278,36	1955,67	1206,51	-3718,02	-6761,62	-9176,12
-2526,31	-7505,60	-10681,2	1404,94	4374,48	2052,50	1298,81	-3647,39	-6730,96	-9112,37

hp _{Tad} teco N ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} teco SO ₂ (kJ/kg)	hra H ₂ O (kJ/kg)	hra N ₂ (kJ/kg)	hra O ₂ (kJ/kg)	hr C ₁₂ H ₂₆ (kJ/kg)	Hr C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kg)	hr C ₂ H ₆ (kJ/kg)	hr C ₃ H ₈ (kJ/kg)	hr C ₄ H ₁₀ (kJ/kg)
1926,35	-3282,07	-13406,6	8,85	7,83	-2037,26	-2152	-2792,43	-2332,84	-2147,73
2037,42	-3203,61	-13406,4	8,96	7,92	-2027,31	-2143	-2792,43	-2332,84	-2147,73
2090,70	-3165,71	-13406,4	8,96	7,92	-2000,35	-2117	-2792,43	-2332,84	-2147,73
2099,71	-3159,27	-13403,6	10,52	9,31	-2014,05	-2130	-2792,43	-2332,84	-2147,73
2128,36	-3138,78	-13403,4	10,63	9,40	-2004,77	-2121	-2790,61	-2331,10	-2145,96

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B100 + gás natural**
(Potência de 40 a 120kW).(Continuação)

hr CH ₄ (kJ/kg)	hr CO ₂ (kJ/kg)	hr N ₂ (kJ/kg)	hr O ₂ (kJ/kg)	hr S (kJ/kg)	H _p (kW)	H _{pTad} (kW)	H _{pTadteo} (kW)	H _r (kW)	$\dot{m}_{\text{produtos}}$ (kg/s)
-4637,42	-8930,59	13,54	11,98	10,41	-197,8	-70,58	-70,58	-70,58	0,239135
-4637,42	-8930,59	13,54	11,98	13,59	-223,9	-68,97	-68,97	-68,97	0,218659
-4637,42	-8930,59	13,54	11,98	22,23	-252,99	-72,23	-72,23	-72,23	0,219861
-4637,42	-8930,59	13,54	11,98	17,84	-291,25	-81,67	-81,67	-81,67	0,228932
-4635,15	-8929,74	14,59	12,90	20,82	-319,93	-85,18	-85,18	-85,18	0,232444

\dot{m}_{prodteo} (kg/s)	$\dot{m}_{\text{reagentes}}$ (kg/s)	\dot{m}_{reagteo} (kg/s)	\dot{m}_d (kg/h)	\dot{m}_g (kg/h)	\dot{m}_{ar} (kg/h)	M _{ar} (kg/kmol)	M _{C₁₂H₂₆} (kg/kmol)	M _{C_{18,74}H_{34,43}O₂} (kg/kmol)	M _{C₂H₆} (kg/kmol)
0,082059	0,239134	0,081911	1,77	14,98	842,68	28,97	170,33	291,8	30,07
0,094331	0,218658	0,09416	2,48	16,86	911,83	28,97	170,33	291,8	30,07
0,107933	0,219861	0,107737	2,94	19,21	1014,15	28,97	170,33	291,8	30,07
0,123842	0,228932	0,123597	3,45	21,83	1076,89	28,97	170,33	291,8	30,07
0,135972	0,232443	0,135702	4,44	23,44	1124,4	28,97	170,33	291,8	30,07

M _{C₃H₈} (kg/kmol)	M _{C₄H₁₀} (kg/kmol)	M _{CH₄} (kg/kmol)	M _{CO} (kg/kmol)	M _{CO₂} (kg/kmol)	M _{diesel blend} (kg/kmol)	M _{gas} (kg/kmol)	M _{H₂O} (kg/kmol)	M _{N₂} (kg/kmol)	M _{NO} (kg/kmol)
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	291,8	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	291,8	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	291,8	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	291,8	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	291,8	17,81	18,02	28,01	30,01

M _{NO₂} (kg/kmol)	M _{O₂} (kg/kmol)	M _S (kg/kmol)	M _{SO₂} (kg/kmol)	\dot{n}_d (kmol/s)	\dot{n}_g (kmol/s)	n _{moles_{prod}} (kmol)	\dot{n}_p (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt CO}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt H}_2\text{O}}$ (kmol/s)
46,01	32	32	64,06	2,00E-06	0,000234	0,008474	0,007754	0,000281	0,000575
46,01	32	32	64,06	2,00E-06	0,000263	0,007769	0,006997	0,000325	0,000657
46,01	32	32	64,06	3,00E-06	0,0003	0,007826	0,006972	0,000372	0,000751
46,01	32	32	64,06	3,00E-06	0,00034	0,008167	0,007195	0,000425	0,000866
46,01	32	32	64,06	4,00E-06	0,000366	0,008299	0,007256	0,00047	0,000946

$\dot{n}_{\text{pt N}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt SO}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{p H}_2\text{O}}$ (kmol/s)	$\dot{n}_t \text{O}_2$ (kmol/s)	\dot{n}_{O_2} (kmol/s)	PCI _{C₁₂H₂₆} (kJ/kg)	PCI _{C_{18,74}H_{34,43}O₂} (kJ/kg)	PCI _{C₂H₆} (kJ/kg)	PCI _{C₃H₈} (kJ/kg)	PCI _{C₄H₁₀} (kJ/kg)
0,002118	0	0,000575	0,000563	0,001679	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,002434	0	0,000657	0,000647	0,001527	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,002785	0	0,000751	0,00074	0,00153	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,003196	0	0,000866	0,000849	0,001586	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,003508	0	0,000946	0,000932	0,001606	44143,18	37388	47480	46360	45720

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B100 + gás natural**
(Potência de 40 a 120Kw).(Continuação)

PCI_{CH_4} (kJ/kg)	PCI_{CO_2} (kJ/kg)	PCI_{N_2} (kJ/kg)	PCI_{O_2} (kJ/kg)	PCI_s (kJ/kg)	ϕ (%)	Pa (kPa)	Pp (kPa)	Pva (kPa)	Pvp (kPa)
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	2,588226	8,613061
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	2,602732	10,07502
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	2,602732	11,06172
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	2,828937	12,05382
50020	0	0	0	9259	50	97	101,33	2,844604	12,72877

\dot{Q} (kW)	rend (%)	\bar{R} (kJ/kmolK)	Tad (C)	Tad _{arteorico} (C)	T ₀ (K)	T _a (C)	T _d (C)	T _g (C)	T _{orvalho} (C)
-84,31	0,932	8,314	799,61	1666,83	298,15	33,5	39,7	38	42,90
-90,55	0,932	8,314	971,75	1753,56	298,15	33,6	44,2	38	45,94
-94,93	0,932	8,314	1084,67	1795,03	298,15	33,6	56,4	38	47,78
-102,28	0,932	8,314	1172,81	1802,04	298,15	35,1	50,2	38	49,49
-106,00	0,932	8,314	1253,64	1824,3	298,15	35,2	54,4	39	50,59

T _p (C)	T _{ref} (C)	w	\dot{W} (kW)	Wres (kW)	X _{Air} (%)	$\bar{x}_{C_{12}H_{26}l_0}$ (kJ/kmol)	$\bar{x}_{C_{12}H_{26}, quim}$ (kJ/kmol)	$\bar{x}_{C_{18,74}H_{34,43}O_2l_0}$ (kJ/kmol)	$\bar{x}_{C_{18,74}H_{34,43}O_2l_0 quim}$ (kJ/kmol)
350	25	0,017052	42,92	40	203,5	8059340	8059340	11700000	11700000
391	25	0,01715	64,38	60	140,22	8059340	8059340	11700000	11700000
424	25	0,01715	85,84	80	110,37	8059340	8059340	11700000	11700000
449	25	0,018685	107,3	100	90,36	8059340	8059340	11700000	11700000
465	25	0,018792	128,76	120	75,6	8059340	8059340	11700000	11700000

$\bar{x}_{C_2H_6 l_0}$ (kJ/kmol)	$\bar{x}_{C_2H_6, quim}$ (kJ/kmol)	$\bar{x}_{C_3H_8 l_0}$ (kJ/kmol)	$\bar{x}_{C_3H_8, quim}$ (kJ/kmol)	$\bar{x}_{C_4H_{10} l_0}$ (kJ/kmol)	$\bar{x}_{C_4H_{10}, quim}$ (kJ/kmol)	$\bar{x}_{CH_4, quim}$ (kJ/kmol)	$\bar{x}_{CO_2 l_0}$ (kJ/kmol)	$\bar{x}_{CO_2, quim}$ (kJ/kmol)	$\bar{x}_{N_2 l_0}$ (kJ/kmol)
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720

$\bar{x}_{N_2, quim}$ (kJ/kmol)	$\bar{x}_{O_2 l_0}$ (kJ/kmol)	$\bar{x}_{O_2, quim}$ (kJ/kmol)	$\bar{x}_{SO_2 l_0}$ (kJ/kmol)	\dot{X} (kW)	\dot{X}_d (kW)	\dot{X}_g (kW)	y _d _{C₁₂H₂₆} (kmol/kmol)	y _d _{C_{18,74}H_{34,43}O₂} (kJ/kmol)	y _{d s}
-10103,4	3970	-13706,9	303500	221,75	19,72	202,03	0	1	0
-10103,4	3970	-13706,9	303500	255,02	27,63	227,39	0	1	0
-10103,4	3970	-13706,9	303500	291,83	32,75	259,08	0	1	0
-10103,4	3970	-13706,9	303500	332,85	38,43	294,42	0	1	0
-10103,4	3970	-13706,9	303500	365,59	49,46	316,13	0	1	0

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição da **mistura B100 + gás natural**
(Potência de 40 a 120kW).(Continuação)

y_g C ₂ H ₆	y_g C ₃ H ₈	y_g C ₄ H ₁₀	y_g CH ₄	y_g CO ₂	y_g N ₂	y_g O ₂	y_p CH ₄	y_p CO	y_p CO ₂
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	0	0,001243	0,035
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	0	0,001447	0,045
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	1,00E-05	0,001393	0,052
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	1,00E-06	0,001074	0,058
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	1,00E-05	0,000697	0,064

y_p N ₂	y_p NO	y_p NO ₂	y_p O ₂	y_p SO ₂	η_{combCa}	η_{comb}	\dot{X} destruída (kW)	\dot{X}_p (kW)	\dot{X}_{p_quim} (kW)
0,814409	8,20E-05	2,00E-06	0,149264	0	32,9484	59,9932	144,8	29,98	2,519
0,820874	0,000159	9,00E-06	0,132511	0	41,6283	63,5603	152,2	34,13	3,323
0,825476	0,000224	1,00E-05	0,120887	0	47,5342	64,8096	161,8	39,68	3,803
0,829304	0,000351	2,10E-05	0,111249	0	52,5323	65,8874	175,4	45,24	3,768
0,832448	0,000665	4,10E-05	0,102139	0	56,9461	67,2300	183,0	48,71	3,824

\dot{X}_{p_term} (kW)	\dot{X}_q (kW)
27,46	4,038
30,81	4,337
35,88	4,547
41,47	4,899
44,89	5,077

Apêndice B11

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição de **diesel comercial B5**
(Potência de 40 a 120kW)

AC kg de ar/kg de combust.	AC _i kg de ar/kg de combust.	C _p C ₁₂ H ₂₆ (kJ/kg°C)	C _p C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kg°C)	C _p _s (kJ/kg°C)	ε (%)	η _{PCI} (%)	E _{PCI} (kW)	fmolarPer (%)	fmolar H ₂ O _v p (%)
59,296	15,658	2,21	2,075	0,708	26,4809	28,3995	151,12	6,050496	0,060505
50,888	15,727	2,21	2,075	0,708	30,2259	32,4158	198,6	6,772432	0,067724
44,596	15,786	2,21	2,075	0,708	33,0285	35,4215	242,33	7,464561	0,074646
41,215	15,842	2,21	2,075	0,708	33,3141	35,7278	300,32	7,956349	0,079563
37,659	15,924	2,21	2,075	0,708	33,6321	36,0687	356,97	8,589392	0,085894

hp CH ₄ (kJ/kg)	hp CO (kJ/kg)	hp CO ₂ (kJ/kg)	hp H ₂ O (kJ/kg)	hp N ₂ (kJ/kg)	hp NO (kJ/kg)	hp NO ₂ (kJ/kg)	hp O ₂ (kJ/kg)	hp SO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} CH ₄ (kJ/kg)
-3753,58	-3595,91	-8618,09	-12783,4	347,74	3353,87	1033,93	317,51	-4405,51	-2495,6
-3637,5	-3558,38	-8580,74	-12713,9	384,74	3389,8	1068,57	352,1	-4379,18	-2071,15
-3506,67	-3517,22	-8539,46	-12637,3	425,33	3429,22	1106,85	390,08	-4350,14	-1643,26
-3352,67	-3470,07	-8491,85	-12549,1	471,83	3474,37	1150,97	433,59	-4316,73	-1330,05
-3185,26	-3420,23	-8441,17	-12455,4	521,01	3522,11	1197,89	479,58	-4281,27	-1000,61

hp _{Tad} CO (kJ/kg)	hp _{Tad} CO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} H ₂ O (kJ/kg)	hp _{Tad} N ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} NO (kJ/kg)	hp _{Tad} NO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} O ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} SO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} te _o CO ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} te _o H ₂ O (kJ/kg)
-3226,52	-8241,71	-12086,1	712,31	3707,48	1381,95	658,12	-4142,77	-6999,39	-9666,02
-3114,11	-8124,68	-11867,9	823,43	3814,91	1489,45	761,45	-4062,33	-6932,22	-9528,43
-3004,54	-8010	-11652,4	931,79	3919,5	1594,43	861,97	-3984,14	-6877,63	-9416,13
-2926,26	-7927,79	-11496,9	1009,23	3994,14	1669,48	933,66	-3928,48	-6837,18	-9332,63
-2845,39	-7842,67	-11334,7	1089,24	4071,19	1747,02	1007,64	-3871,18	-6832,32	-9322,6

hp _{Tad} te _o N ₂ (kJ/kg)	hp _{Tad} te _o SO ₂ (kJ/kg)	hra H ₂ O (kJ/kg)	hra N ₂ (kJ/kg)	hra O ₂ (kJ/kg)	hr C ₁₂ H ₂₆ (kJ/kg)	hr C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kg)	hr C ₂ H ₆ (kJ/kg)	hr C ₃ H ₈ (kJ/kg)	hr C ₄ H ₁₀ (kJ/kg)
1877,68	-3316,29	-13408,7	7,71	6,82	-2032,4	-2147	-2858,18	-2395,15	-2211,55
1940,39	-3272,19	-13406,6	8,85	7,83	-2028,86	-2144	-2858,18	-2395,15	-2211,55
1991,36	-3236,23	-13404,9	9,79	8,66	-2024,22	-2140	-2858,18	-2395,15	-2211,55
2029,15	-3209,48	-13403,4	10,63	9,4	-2014,94	1401	-2858,18	-2395,15	-2211,55
2033,68	-3206,26	-13401,4	11,77	10,41	-2010,3	-2127	-2858,18	-2395,15	-2211,55

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição de **diesel comercial B5**
(Potência de 40 a 120kW) (Continuação)

hr CH ₄ (kJ/kg)	hr CO ₂ (kJ/kg)	hr N ₂ (kJ/kg)	hr O ₂ (kJ/kg)	hr S (kJ/kg)	H _p (kW)	H _{pTad} (kW)	H _{pTadteo} (kW)	H _r (kW)	$\dot{m}_{\text{produtos}}$ (kg/s)
-4722,62	-8962,24	-25,97	-23,11	11,97	-128,52	-50,19	-50,19	-50,19	0,20953
-4722,62	-8962,24	-25,97	-23,11	13,1	-168,1	-60,89	-60,89	-60,89	0,236956
-4722,62	-8962,24	-25,97	-23,11	14,58	-202,73	-69,23	-69,23	-69,23	0,254072
-4722,62	-8962,24	-25,97	-23,11	17,56	-244,41	-81,18	-81,18	-81,18	0,291518
-4722,62	-8962,24	-25,97	-23,11	19,05	-285,27	-96,38	-96,38	-96,38	0,317325

\dot{m}_{prodteo} (kg/s)	$\dot{m}_{\text{reagentes}}$ (kg/s)	\dot{m}_{reagteo} (kg/s)	\dot{m}_d (kg/h)	\dot{m}_g (kg/h)	\dot{m}_{ar} (kg/h)	M _{ar} (kg/kmol)	M _{C₁₂H₂₆} (kg/kmol)	M _{C_{18,74}H_{34,43}O₂} (kg/kmol)	M _{C₂H₆} (kg/kmol)
0,057987	0,209529	0,057886	12,51	0	795,25	28,97	170,33	291,8	30,07
0,076526	0,236956	0,076385	16,44	0	905,35	28,97	170,33	291,8	30,07
0,09372	0,254071	0,093538	20,06	0	1016,64	28,97	170,33	291,8	30,07
0,116542	0,291517	0,116305	24,86	0	1144,25	28,97	170,33	291,8	30,07
0,139216	0,317324	0,138915	29,55	0	1284,67	28,97	170,33	291,8	30,07

M _{C₃H₈} (kg/kmol)	M _{C₄H₁₀} (kg/kmol)	M _{CH₄} (kg/kmol)	M _{CO} (kg/kmol)	M _{CO₂} (kg/kmol)	M _{diesel blend} (kg/kmol)	M _{gas} (kg/kmol)	M _{H₂O} (kg/kmol)	M _{N₂} (kg/kmol)	M _{NO} (kg/kmol)
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	174,5	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	174,5	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	174,5	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	174,5	17,81	18,02	28,01	30,01
44,1	58,12	16,04	28,01	44,01	174,5	17,81	18,02	28,01	30,01

M _{NO₂} (kg/kmol)	M _{O₂} (kg/kmol)	M _S (kg/kmol)	M _{SO₂} (kg/kmol)	\dot{n}_d (kmol/s)	\dot{n}_g (kmol/s)	$n_{\text{moles}_{\text{prod}}}$ (kmol)	\dot{n}_p (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt CO}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt H}_2\text{O}}$ (kmol/s)
46,01	32	32	64,06	2,00E-05	0	0,007343	0,006898	0,000242	0,000309
46,01	32	32	64,06	2,60E-05	0	0,00831	0,007748	0,000319	0,000411
46,01	32	32	64,06	3,20E-05	0	0,008917	0,008251	0,000389	0,000506
46,01	32	32	64,06	4,00E-05	0	0,010238	0,009423	0,000482	0,000633
46,01	32	32	64,06	4,70E-05	0	0,011153	0,010195	0,000573	0,000762

$\dot{n}_{\text{pt N}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{pt SO}_2}$ (kmol/s)	$\dot{n}_{\text{p H}_2\text{O}}$ (kmol/s)	$\dot{n}_t \text{O}_2$ (kmol/s)	\dot{n}_{O_2} (kmol/s)	PCI _{C₁₂H₂₆} (kJ/kg)	PCI _{C_{18,74}H_{34,43}O₂} (kJ/kg)	PCI _{C₂H₆} (kJ/kg)	PCI _{C₃H₈} (kJ/kg)	PCI _{C₄H₁₀} (kJ/kg)
0,00149	0	0,000309	0,000396	0,001476	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,001966	0	0,000411	0,000523	0,001663	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,002408	0	0,000506	0,000641	0,001777	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,002995	1,00E-06	0,000633	0,000797	0,002033	44143,18	37388	47480	46360	45720
0,003579	1,00E-06	0,000762	0,000952	0,002206	44143,18	37388	47480	46360	45720

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição de **diesel comercial B5**
(Potência de 40 a 120kW) (continuação)

PCI _{CH4} (kJ/kg)	PCI _{CO2} (kJ/kg)	PCI _{N2} (kJ/kg)	PCI _{O2} (kJ/kg)	PCI _S (kJ/kg)	φ (%)	Pa (kPa)	Pp (kPa)	Pva (kPa)	Pvp (kPa)
50020	0	0	0	9259	50	95	101,33	2,433229	6,130665
50020	0	0	0	9259	50	95	101,33	2,588226	6,862166
50020	0	0	0	9259	50	95	101,33	2,72134	7,563467
50020	0	0	0	9259	50	95	101,33	2,844604	8,061771
50020	0	0	0	9259	50	95	101,33	3,021974	8,703201

Q̇ (kW)	rend (%)	R̄ (kJ/kmolK)	T _{ad} (C)	T _{ad,arteorico} (C)	T ₀ (K)	T _a (C)	T _d (C)	T _g (C)	T _{orvalho} (C)
-35,41	0,932	8,314	679,52	1628,7	298,15	32,4	41,9	0	36,56
-42,84	0,932	8,314	774,58	1677,81	298,15	33,5	43,5	0	38,64
-47,66	0,932	8,314	865,95	1717,64	298,15	34,4	45,6	0	40,46
-55,93	0,932	8,314	930,56	1747,11	298,15	35,2	49,8	0	41,64
-60,14	0,932	8,314	996,77	1750,64	298,15	36,3	51,9	0	43,1

T _p (C)	T _{ref} (C)	w	Ẇ (kW)	W _{res} (kW)	X _{Air} (%)	X̄ C ₁₂ H ₂₆ l0 (kJ/kmol)	X̄ C ₁₂ H ₂₆ , quim (kJ/kmol)	X̄ C _{18,74} H _{34,43} O ₂ l0 (kJ/kmol)	X̄ C _{18,74} H _{34,43} O ₂ l quim (kJ/kmol)
355	25	0,01635	42,92	40	278,7	8059340	8059340	11700000	11700000
389	25	0,017421	64,38	60	223,58	8059340	8059340	11700000	11700000
426	25	0,018343	85,84	80	182,5	8059340	8059340	11700000	11700000
468	25	0,0192	107,3	100	160,16	8059340	8059340	11700000	11700000
512	25	0,020436	128,76	120	136,5	8059340	8059340	11700000	11700000

X̄ C ₂ H ₆ l0 (kJ/kmol)	X̄ C ₂ H ₆ , quim (kJ/kmol)	X̄ C ₃ H ₈ l0 (kJ/kmol)	X̄ C ₃ H ₈ , quim (kJ/kmol)	X̄ C ₄ H ₁₀ l0 (kJ/kmol)	X̄ C ₄ H ₁₀ , quim (kJ/kmol)	X̄ CH ₄ quim (kJ/kmol)	X̄ CO ₂ l0 (kJ/kmol)	X̄ CO ₂ , quim (kJ/kmol)	X̄ N ₂ l0 (kJ/kmol)
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720
1504360	1497851	2163190	2147231	2818930	2803263	836232,8	20140	9980,51	720

X̄ N ₂ , quim (kJ/kmol)	X̄ O ₂ l0 (kJ/kmol)	X̄ O ₂ , quim (kJ/kmol)	X̄ SO ₂ l0 (kJ/kmol)	Ẋ (kW)	Ẋ _d (kW)	Ẋ _g (kW)	y _d C ₁₂ H ₂₆ (kmol/kmol)	y _d C _{18,74} H _{34,43} O ₂ (kJ/kmol)	y _{d s}
-10103,4	3970	-13706,9	303500	162,07	162,07	0	0,936035	0,05	0,013965
-10103,4	3970	-13706,9	303500	212,99	212,99	0	0,936035	0,05	0,013965
-10103,4	3970	-13706,9	303500	259,89	259,89	0	0,936035	0,05	0,013965
-10103,4	3970	-13706,9	303500	322,07	322,07	0	0,936035	0,05	0,013965
-10103,4	3970	-13706,9	303500	382,84	382,84	0	0,936035	0,05	0,013965

Dados obtidos a partir do modelo matemático para condição de **diesel comercial B5**
(Potência de 40 a 120kW) (continuação)

Yg C2H6	Yg C3H8	Yg C4H10	Yg CH4	Yg CO2	Yg N2	Yg O2	Yp CH4	Yp CO	Yp CO2
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	0	0,001285	0,036
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	0	0,001090	0,043
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	0	0,000907	0,051
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	0	0,001117	0,059
0,0724	0,0016	0,0018	0,8942	0,0166	0,0127	0,0008	0	0,000694	0,065

Yp N2	Yp NO	Yp NO2	Yp O2	Yp SO2	η_{combCa}	η_{comb}	\dot{X} destruída (kW)	\dot{X} p (kW)	\dot{X} p _{quim} (kW)
0,804407	0,000394	1,50E-05	0,160007	4,00E-05	26,4064	51,8306	92,15	25,31	0,9903
0,806898	0,000446	2,10E-05	0,151475	4,70E-05	30,9045	53,987	112,6	33,95	1,478
0,809359	0,000558	2,50E-05	0,142901	5,40E-05	35,3987	55,0879	128,7	43,03	2,081
0,810982	0,00067	2,60E-05	0,137148	5,90E-05	38,4383	54,352	153,9	58,21	2,851
0,813041	0,000746	3,20E-05	0,129961	6,40E-05	42,2839	52,9163	177	74,19	3,777

\dot{X} p _{term} (kW)	\dot{X} q (kW)
24,32	1,696
32,47	2,052
40,95	2,283
55,36	2,679
70,41	2,881

Apêndice C1

Cálculo da massa específica do ar e do gás natural e vazão mássica de ar e de gás natural

- ✓ Cálculo da massa específica do ar

$$\rho_{\text{ar}} = \frac{P \cdot 10^5}{R \cdot T}$$

- ✓ Cálculo da massa específica do gás natural

$$\rho_{\text{gnv}} = \rho_{\text{rel.gnv}} \cdot \rho_{\text{doar}}$$

- ✓ Vazão de ar (kg/h) = Vazão de ar (m³/h). ρ_{ar}

- ✓ Vazão de gás natural (kg/h) = Vazão de gás natural (m³/h). ρ_{gnv}

B10 + Gás natural

Potência (kW)	P.atm (bar)	Cte gases (J/kg.K)	Temperatura		ρ_{ar} (kg/m ³)	$\rho_{\text{relat. gnv}}$ (kg/m ³)	ρ_{gnv} (kg/m ³)	Vazão volumétrica de ar (m ³ /h)	Vazão mássica de ar (kg/h)	Vazão volumétrica de gás (m ³ /h)	Vazão mássica de gás (kg/h)
			°C	K							
40	0,95	287,05	31,8	304,95	1,0853	0,65	0,7054	764,10	829,25	21,20	14,96
60	0,95	287,05	31,8	304,95	1,0853	0,65	0,7054	844,56	916,57	24,20	17,07
80	0,95	287,05	32,0	305,15	1,0846	0,65	0,7050	900,80	976,97	28,30	19,95
100	0,95	287,05	32,1	305,25	1,0842	0,65	0,7047	995,08	1078,87	30,50	21,49
120	0,95	287,05	32,2	305,35	1,0838	0,65	0,7045	1017,28	1102,58	33,10	23,32

B20 + Gás natural

Potência (kW)	P.atm (bar)	Cte gases (J/kg.K)	Temperatura		ρ_{ar} (kg/m ³)	$\rho_{relat. gnv}$ (kg/m ³)	ρ_{gnv} (kg/m ³)	Vazão volumétrica de ar (m ³ /h)	Vazão mássica de ar (kg/h)	Vazão volumétrica de gás (m ³ /h)	Vazão mássica de gás (kg/h)
			°C	K							
40	0,95	287,05	30,30	303,45	1,0906	0,65	0,7089	771,92	841,88	19,20	13,61
60	0,95	287,05	30,60	303,75	1,0896	0,65	0,7082	832,9	907,49	24,50	17,35
80	0,95	287,05	30,80	303,95	1,0888	0,65	0,7077	910,30	991,17	28,20	19,96
100	0,95	287,05	31,10	304,25	1,0878	0,65	0,7070	964,82	1049,50	32,10	22,70
120	0,95	287,05	31,30	304,45	1,0871	0,65	0,7066	1017,64	1106,23	32,20	22,75

B30 + Gás natural

Potência (kW)	P.atm (bar)	Cte gases (J/kg.K)	Temperatura		ρ_{ar} (kg/m ³)	$\rho_{relat. gnv}$ (kg/m ³)	ρ_{gnv} (kg/m ³)	Vazão volumétrica de ar (m ³ /h)	Vazão mássica de ar (kg/h)	Vazão volumétrica de gás (m ³ /h)	Vazão mássica de gás (kg/h)
			°C	K							
40	0,95	287,05	31,80	304,95	1,0853	0,65	0,7054	758,44	823,11	19,40	13,69
60	0,95	287,05	31,80	304,95	1,0853	0,65	0,7054	845,82	917,94	25,70	18,13
80	0,95	287,05	32,00	305,15	1,0846	0,65	0,7050	918,58	996,25	28,00	19,74
100	0,95	287,05	32,10	305,25	1,0842	0,65	0,7047	1064,96	1154,63	31,90	22,48
120	0,95	287,05	32,20	305,35	1,0838	0,65	0,7045	1058,14	1146,86	32,40	22,83

B40 + Gás natural

Potência (kW)	P.atm (bar)	Cte gases (J/kg.K)	Temperatura		ρ_{ar} (kg/m ³)	$\rho_{relat. gnv}$ (kg/m ³)	ρ_{gnv} (kg/m ³)	Vazão volumétrica de ar (m ³ /h)	Vazão mássica de ar (kg/h)	Vazão volumétrica de gás (m ³ /h)	Vazão mássica de gás (kg/h)
			°C	K							
40	0,97	287,05	31,80	304,95	1,1081	0,65	0,7203	767,24	850,19	19,20	13,83
60	0,97	287,05	31,80	304,95	1,1081	0,65	0,7203	862	955,20	23,30	16,78
80	0,98	287,05	32,00	305,15	1,1188	0,65	0,7272	943,80	1055,93	27,10	19,71
100	0,98	287,05	32,10	305,25	1,1184	0,65	0,7270	1034,34	1156,85	28,20	20,50
120	0,98	287,05	32,20	305,35	1,1181	0,65	0,7267	1034,96	1157,16	31,90	23,18

B50 + Gás natural

Potência (kW)	P.atm (bar)	Cte gases (J/kg.K)	Temperatura		ρ_{ar} (kg/m ³)	$\rho_{relat. gnv}$ (kg/m ³)	ρ_{gnv} (kg/m ³)	Vazão volum. de ar (m ³ /h)	Vazão mássica de ar (kg/h)	Vazão volum. de gás (m ³ /h)	Vazão mássica de gás (kg/h)
			°C	K							
40	0,97	287,05	31,30	304,45	1,1099	0,65	0,7215	774,82	860,00	19,30	13,92
60	0,97	287,05	31,60	304,75	1,1088	0,65	0,7207	831,64	922,16	21,90	15,78
80	0,97	287,05	31,70	304,85	1,1085	0,65	0,7205	923,60	1023,79	25,40	18,30
100	0,97	287,05	31,70	304,85	1,1085	0,65	0,7205	996,52	1104,62	28,10	20,25
120	0,97	287,05	31,80	304,95	1,1081	0,65	0,7203	1050,14	1163,68	30,80	22,18

B60 + Gás natural

Potência (kW)	P.atm (bar)	Cte gases (J/kg.K)	Temperatura		ρ_{ar} (kg/m ³)	$\rho_{relat. gnv}$ (kg/m ³)	ρ_{gnv} (kg/m ³)	Vazão volumétrica de ar (m ³ /h)	Vazão mássica de ar (kg/h)	Vazão volumétrica de gás (m ³ /h)	Vazão mássica de gás (kg/h)
			°C	K							
40	0,96	287,05	27,40	300,55	1,1127	0,65	0,7233	736,98	820,07	19,10	13,81
60	0,96	287,05	27,80	300,95	1,1113	0,65	0,7223	826,78	918,78	24,00	17,34
80	0,96	287,05	27,60	300,75	1,1120	0,65	0,7228	906,90	1008,48	27,40	19,80
100	0,97	287,05	28,10	301,25	1,1217	0,65	0,7291	1011,62	1134,76	30,80	22,46
120	0,96	287,05	28,20	301,35	1,1098	0,65	0,7214	1017,98	1129,75	33,70	24,31

B70 + Gás natural

Potência (kW)	P.atm (bar)	Cte gases (J/kg.K)	Temperatura		ρ_{ar} (kg/m ³)	$\rho_{relat. gnv}$ (kg/m ³)	ρ_{gnv} (kg/m ³)	Vazão volumétrica de ar (m ³ /h)	Vazão mássica de ar (kg/h)	Vazão volumétrica de gás (m ³ /h)	Vazão mássica de gás (kg/h)
			°C	K							
40	0,96	287,05	28,30	301,45	1,1094	0,65	0,7211	754,84	837,44	19,90	14,35
60	0,96	287,05	28,00	301,15	1,1105	0,65	0,7218	835,66	928,03	22,70	16,39
80	0,96	287,05	27,50	300,65	1,1124	0,65	0,7230	924,22	1028,08	25,40	18,37
100	0,97	287,05	28,80	301,95	1,1191	0,65	0,7274	1011,98	1132,53	28,80	20,95
120	0,96	287,05	28,30	301,45	1,1094	0,65	0,7211	1022,56	1134,45	31,80	22,93

B80 + Gás natural

Potência (kW)	P.atm (bar)	Cte gases (J/kg.K)	Temperatura		ρ_{ar} (kg/m ³)	$\rho_{relat. gnv}$ (kg/m ³)	ρ_{gnv} (kg/m ³)	Vazão volumétrica de ar (m ³ /h)	Vazão mássica de ar (kg/h)	Vazão volumétrica de gás m ³ /h)	Vazão mássica de gás (kg/h)
			°C	K							
40	0,96	287,05	29,80	302,95	1,1039	0,65	0,7176	750,90	828,94	20,20	14,49
60	0,96	287,05	30,00	303,15	1,1032	0,65	0,7171	832,72	918,66	23,40	16,78
80	0,96	287,05	29,60	302,75	1,1047	0,65	0,7180	920,00	1016,29	27,40	19,67
100	0,97	287,05	28,40	301,55	1,1206	0,65	0,7284	989,34	1108,67	30,80	22,43
120	0,96	287,05	28,10	301,25	1,1102	0,65	0,7216	1011,88	1123,35	33,40	24,10

B90 + Gás natural

Potência (kW)	P.atm (bar)	Cte gases (J/kg.K)	Temperatura		ρ_{ar} (kg/m ³)	$\rho_{relat. gnv}$ (kg/m ³)	ρ_{gnv} (kg/m ³)	Vazão volumétrica de ar (m ³ /h)	Vazão mássica de ar (kg/h)	Vazão volumétrica de gás (m ³ /h)	Vazão mássica de gás (kg/h)
			°C	K							
40	0,96	287,05	27,40	300,55	1,1127	0,65	0,7233	757,28	842,66	19,90	14,39
60	0,96	287,05	28,20	301,35	1,1098	0,65	0,7214	827,60	918,47	22,90	16,52
80	0,96	287,05	28,80	301,95	1,1076	0,65	0,7199	910,48	1008,44	25,80	18,57
100	0,97	287,05	29,30	302,45	1,1173	0,65	0,7262	992,22	1108,58	28,90	20,99
120	0,96	287,05	29,70	302,85	1,1043	0,65	0,7178	998,06	1102,16	31,70	22,75

B100 + Gás natural

Potência (kW)	P.atm (bar)	Cte gases (J/kg.K)	Temperatura		ρ_{ar} (kg/m ³)	$\rho_{relat. gnv}$ (kg/m ³)	ρ_{gnv} (kg/m ³)	Vazão volumétrica de ar (m ³ /h)	Vazão mássica de ar (kg/h)	Vazão volumétrica de gás (m ³ /h)	Vazão mássica de gás (kg/h)
			°C	K							
40	0,96	287,05	30,10	303,25	1,1028	0,65	0,7168	764,10	842,68	20,90	14,98
60	0,96	287,05	29,80	302,95	1,1039	0,65	0,7176	825,98	911,83	23,50	16,86
80	0,96	287,05	29,00	302,15	1,1069	0,65	0,7195	916,24	1014,15	26,70	19,21
100	0,97	287,05	28,70	301,85	1,1195	0,65	0,7277	961,94	1076,89	30,00	21,83
120	0,96	287,05	28,30	301,45	1,1094	0,65	0,7211	1013,5	1124,40	32,50	23,44

Apêndice D1

Cálculo do custo específico do combustível

O custo específico do combustível é calculado da seguinte forma:

$$\text{Custo específico} = \frac{\text{Custo total do combustível}}{\text{Custo da energia elétrica na mesma potência}}$$

onde, o custo total do combustível é dado pela soma dos custos das parcelas de cada combustível utilizado:

$$\text{Custo total do combustível} = \text{Custo da parcela comb. diesel} + \text{Custo da parcela comb. biodiesel} + \text{Custo da parcela comb. gnv}$$

O custo dos combustíveis é calculado pelo consumo volumétrico ($\dot{v} = \dot{m}/\rho$) multiplicado pelo preço do combustível em US\$:

$$\text{Custo do combustível diesel} = \left(\frac{\dot{m}_d}{\rho_d} \times 1000 \frac{\text{litros}}{\text{h}} \right) \times \left(\text{Preço diesel} \frac{\text{US\$}}{\text{litros}} \right)$$

$$\text{Custo do combustível biodiesel} = \left(\frac{\dot{m}_{bd}}{\rho_{bd}} \times 1000 \frac{\text{litros}}{\text{h}} \right) \times \left(\text{Preço biodiesel} \frac{\text{US\$}}{\text{litros}} \right)$$

$$\text{Custo do combustível gás natural} = \left(\frac{\dot{m}_g}{\rho_g} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \right) \times \left(\text{Preço gás natural} \left(\frac{\text{US\$}}{\text{m}^3} \right) \right)$$

O custo da energia elétrica na mesma potência do motor é dado por:

$$\text{Custo da energia elétrica na mesma potência} = W \left(\frac{\text{kWh}}{\text{h}} \right) \times \text{Preço da Energia} \left(\frac{\text{US\$}}{\text{kWh}} \right)$$

Cálculo do custo específico

	Diesel	Biodiesel	Gas	Energia	Cotação dolar	2,0225	Potência (kW)	40
Preço (R\$)	2,3200	2,4391	1,8100	0,2708	Data:	26/04/2013	Custo energia (US\$ /kWh)	5,3557
Preço (US\$)	1,1471	1,2060	0,8949	0,1339				

Mistura	Diesel			Biodiesel			Gas			Custo específico US\$/kWh
	m	ρ (kg/m ³)	c	m	ρ (kg/m ³)	c	m	ρ (kg/m ³)	c	
Diesel	12,540	834,40	17,2394							3,2189
B10	1,575	834,40	2,1652	0,1750	886,20	0,2381	14,96	0,7054	18,980	3,9925
B20	1,520	834,40	2,0896	0,3800	886,20	0,5171	13,61	0,7089	17,182	3,6948
B30	1,372	834,40	1,8862	0,5880	886,20	0,8002	13,69	0,7054	17,368	3,7445
B40	1,158	834,40	1,5920	0,7720	886,20	1,0506	13,83	0,7203	17,183	3,7017
B50	0,870	834,40	1,1960	0,8700	886,20	1,1839	13,92	0,7215	17,266	3,6682
B60	0,772	834,40	1,0613	1,1580	886,20	1,5759	14,35	0,7233	17,755	3,8076
B70	0,528	834,40	0,7259	1,2320	886,20	1,6766	14,35	0,7211	17,809	3,7738
B80	0,384	834,40	0,5279	1,5360	886,20	2,0903	14,49	0,7176	18,071	3,8629
B90	0,181	834,40	0,2488	1,6290	886,20	2,2168	14,39	0,7233	17,805	3,7848
B100		834,40		1,7700	886,20	2,4087	14,98	0,7168	18,703	3,9418

m= massa em kg/h

c= custo do combustível em US\$/litro

Análises realizadas pelo laboratório da QUALITEX engenharia e serviços Ltda, em 01/10/2012.

Massa específica do DIESEL a 20°C=834,4 kg/m³
 Massa específica do BIODIESEL a 20°C=886,2 kg/m³

Apêndice D1

(Continuação)

Potência de 60 kW

Custo da energia = 8,0336 (US\$ /kWh)

Mistura	Diesel			Biodiesel			Gas			Custo específico US\$/kWh
	m	ρ (kg/m ³)	c	m	ρ (kg/m ³)	c	m	ρ (kg/m ³)	c	
Diesel	17,200	834,40	23,6458			0,000			0,000	2,9434
B10	2,259	834,40	3,1056	0,2510	886,20	0,3416	17,07	0,7054	21,656	3,1248
B20	2,112	834,40	2,9035	0,5280	886,20	0,7185	17,35	0,7082	21,925	3,1800
B30	1,813	834,40	2,4924	0,7770	886,20	1,0574	18,13	0,7054	23,001	3,3050
B40	1,506	834,40	2,0704	1,0040	886,20	1,3663	16,78	0,7203	20,848	3,0229
B50	1,335	834,40	1,8353	1,3350	886,20	1,8167	15,78	0,7207	19,595	2,8937
B60	0,968	834,40	1,3308	1,4520	886,20	1,9759	17,34	0,7223	21,484	3,0859
B70	0,753	834,40	1,0352	1,7570	886,20	2,3910	16,39	0,7218	20,321	2,9560
B80	0,506	834,40	0,6956	2,0240	886,20	2,7544	16,78	0,7171	20,941	3,0361
B90	0,244	834,40	0,3354	2,1960	886,20	2,9884	16,52	0,7214	20,494	2,9648
B100		834,40	0,0000	2,4800	886,20	3,3749	16,86	0,7176	21,026	3,0374

Apêndice D1

(Continuação)

Potência de 80 kW

Custo da energia = 10,7115 (US\$ /kWh)

Mistura	Diesel			Biodiesel			Gas			Custo específico US\$/kWh
	m	ρ (kg/m³)	c	m	ρ (kg/m³)	c	m	ρ (kg/m³)	c	
Diesel	21,080	834,40	28,9798			0,000			0,000	2,7055
B10	2,610	834,40	3,5881	0,2900	886,20	0,3946	19,95	0,7054	25,310	2,7347
B20	2,608	834,40	3,5854	0,6520	886,20	0,8873	19,96	0,7089	25,198	2,7700
B30	2,191	834,40	3,0121	0,9390	886,20	1,2778	19,74	0,7054	25,044	2,7385
B40	1,854	834,40	2,5488	1,2360	886,20	1,6820	19,71	0,7203	24,489	2,6812
B50	1,650	834,40	2,2683	1,6500	886,20	2,2454	18,30	0,7215	22,699	2,5405
B60	1,260	834,40	1,7322	1,8900	886,20	2,5720	19,80	0,7233	24,498	2,6889
B70	0,960	834,40	1,3198	2,2400	886,20	3,0483	18,37	0,7211	22,798	2,5362
B80	0,630	834,40	0,8661	2,2520	886,20	3,0646	19,67	0,7176	24,531	2,6571
B90	0,309	834,40	0,4248	2,7810	886,20	3,7845	18,57	0,7233	22,976	2,5380
B100		834,40	0,0000	2,9400	886,20	4,0009	19,21	0,7168	23,984	2,6126

Apêndice D1

(Continuação)

Potência de 100 kW

Custo da energia = 13,3894 (US\$ /kWh)

Mistura	Diesel			Biodiesel			Gas			Custo específico US\$/kWh
	m	ρ (kg/m ³)	c	m	ρ (kg/m ³)	c	m	ρ (kg/m ³)	c	
Diesel	25,070	834,40	34,4651			0,000			0,000	2,5741
B10	3,105	834,40	4,2686	0,345	886,20	0,4695	21,49	0,7054	27,264	2,3901
B20	2,928	834,40	4,0253	0,732	886,20	0,9961	22,70	0,7089	28,657	2,5153
B30	2,569	834,40	3,5317	1,101	886,20	1,4983	22,48	0,7054	28,520	2,5057
B40	2,064	834,40	2,8375	1,376	886,20	1,8725	20,50	0,7203	25,470	2,2540
B50	1,960	834,40	2,6945	1,960	886,20	2,6673	20,25	0,7215	25,118	2,2764
B60	1,492	834,40	2,0511	2,2380	886,20	3,0456	22,46	0,7233	27,790	2,4561
B70	1,104	834,40	1,5177	2,5760	886,20	3,5055	20,95	0,7211	26,000	2,3170
B80	0,706	834,40	0,9706	2,8240	886,20	3,8430	22,43	0,7176	27,973	2,4487
B90	0,362	834,40	0,4977	3,2580	886,20	4,4336	20,99	0,7233	25,971	2,3080
B100		834,40	0,0000	3,450	886,20	4,6949	21,83	0,7168	27,255	2,3862

Apêndice D1

(Continuação)

Potência de 120 kW

Custo da energia = (US\$ /kWh)

Mistura	Diesel			Biodiesel			Gas			Custo específico US\$/kWh
	m	ρ	c	m	ρ	c	m	ρ	c	
Diesel	30,210	834,40	41,5313			0,000			0,000	2,5848
B10	3,978	834,40	5,4688	0,442	886,20	0,6015	23,32	0,7054	29,586	2,2192
B20	3,728	834,40	5,1251	0,932	886,20	1,2683	22,75	0,7089	28,720	2,1854
B30	3,297	834,40	4,5326	1,413	886,20	1,9229	22,83	0,7054	28,964	2,2045
B40	2,586	834,40	3,5551	1,724	886,20	2,3461	23,18	0,7203	28,800	2,1597
B50	2,370	834,40	3,2582	2,370	886,20	3,2252	22,18	0,7215	27,512	2,1158
B60	1,692	834,40	2,3261	2,5380	886,20	3,4538	24,31	0,7233	30,079	2,2318
B70	1,314	834,40	1,8064	3,0660	886,20	4,1724	22,93	0,7211	28,458	2,1433
B80	0,880	834,40	1,2098	3,5200	886,20	4,7902	24,10	0,7176	30,056	2,2440
B90	0,431	834,40	0,5925	3,8790	886,20	5,2787	22,75	0,7233	28,148	2,1173
B100		834,40	0,0000	4,440	886,20	6,0422	23,44	0,7168	29,265	2,1975

Apêndice D1

(Continuação)

Valor do custo específico por mistura diesel/biodiesel em função da potência

Potência (kW)	B10 US\$/kWh	B20 US\$/kWh	B30 US\$/kWh	B40 US\$/kWh	B50 US\$/kWh	B60 US\$/kWh	B70 US\$/kWh	B80 US\$/kWh	B90 US\$/kWh	B100 US\$/kWh	Diesel (B5) US\$/kWh
40	3,9925	3,6948	3,7445	3,7017	3,6682	3,8076	3,7738	3,8629	3,7848	3,9418	3,2189
60	3,1248	3,1800	3,3050	3,0229	2,8937	3,0859	2,9560	3,0361	2,9648	3,0374	2,9434
80	2,7347	2,7700	2,7385	2,6812	2,5405	2,6889	2,5362	2,6571	2,5380	2,6126	2,7055
100	2,3901	2,5153	2,5057	2,2540	2,2764	2,4561	2,3170	2,4487	2,3080	2,3862	2,5741
120	2,2192	2,1854	2,2045	2,1597	2,1158	2,2318	2,1433	2,2440	2,1173	2,1975	2,5848