

FLÁVIO AUGUSTO DIAS DE OLIVEIRA

**USO DA OXI-COMBUSTÃO EM EQUIPAMENTOS CONVENCIONAIS COMO
ALTERNATIVA A QUEIMA COM AR**

FLÁVIO AUGUSTO DIAS DE OLIVEIRA

USO DA OXI-COMBUSTÃO EM EQUIPAMENTOS CONVENCIONAIS COMO
ALTERNATIVA A QUEIMA COM AR

Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia do Campus de
Guaratinguetá, Universidade
Estadual Paulista, para a obtenção
do título de Doutor em Engenharia
Mecânica na área Transmissão e
Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Jr.
Co-orientador: Prof Dr. Pedro Magalhães Sobrinho

Guaratinguetá
2012

O48u

Oliveira, Flavio Augusto Dias de
Uso da oxi-combustão em equipamentos
convencionais com alternativa a queima com ar /
Flavio Augusto Dias de Oliveira. - Guaratinguetá :
[s.n.], 2012
136 f.: il.
Bibliografia: f. 135-136

Tese (Doutorado) – Universidade Estadual
Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá,
2012

Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Cavalho Jr.
Co-orientador: Prof Dr. Pedro Magalhães Sobrinho

1. Combustão 2. Simulação (Computação) I.
Título


CDU 662.9

FLAVIO AUGUSTO DIAS DE OLIVEIRA

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOÃO ANDRADE DE CARVALHO JUNIOR
Orientador Unesp-Feg


Prof. Dr. LUIZ ROBERTO CARROCCI
Unesp-Feg


Prof. Dr. JOSÉ NEDILO CARRINHO DE CASTRO
Unesp-Feg


Prof. Dr. CHRISTIAN JEREMI CORONADO RODRIGUEZ
UNIFEI


Prof. Dr. VALESKA ALVES CORRÊA
UNITAU

Agosto de 2012

DADOS CURRICULARES

FLÁVIO AUGUSTO DIAS DE OLIVEIRA

NASCIMENTO	20.08.1979	Caconde-SP
FILIAÇÃO	César Augusto Dias de Oliveira Dozolina Gervazoni de Oliveira	
1998/2003	Curso de Graduação Faculdade de Engenharia Química de Lorena -SP	
2004/2006	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia Química de Lorena	
2007/2012	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.	

Dedico este trabalho à minha família, pelo amor, esforço, dedicação e compreensão, que tiveram sempre comigo, sobretudo nestes últimos anos de realização dos meus estudos de pós-graduação

AGRADECIMENTOS

A Deus

A minha família, que sempre esteve do meu lado e cujo incentivo foi essencial para a realização deste trabalho.

Aos meus orientadores, os Professores Doutores João Andrade e Pedro Magalhães.

Ao pessoal do LCP-INPE: ao Ely, cujo suporte foi inestimável para a realização dos testes; ao Andrade pelas sábias sugestões; ao Chico, Chiquinho, Douglas, Marcelo e Soró pela valiosa ajuda na montagem do equipamento; a Adriane e José Carlos por sua paciência e pelo fornecimento de equipamentos; Ao Dr. Marco Aurélio por sua sugestão que culminou na otimização do processo.

Aos meus amigos Bruno Moritz e Luiz Fernando Villela por todo auxílio prestado.

Aos meus colegas da sala de estudantes e professores do Departamento de Energia.

Este trabalho contou com apoio da CAPES através da Bolsa de Estudos Institucional

OLIVEIRA, F. A. D., Uso da Oxi-Combustão em Equipamentos Convencionais Como Alternativa a Queima com Ar. 2012. 136f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

RESUMO

Este estudo apresenta uma simulação em computador do processo de queima com oxigênio puro de gás natural, Óleo 2A, diesel e GLP com a finalidade de se prever concentrações de reagentes e o comportamento da temperatura na câmara de combustão.

Posteriormente, realizou-se uma comparação experimental entre a queima com ar e com oxigênio utilizando para isto, gás GLP em uma câmara de combustão vertical. Os resultados mostram que é possível equiparar a oxi-combustão com a queima com ar em termos energéticos, porém mantendo-se os benefícios da alta eficiência e das emissões gasosas, isso porque na queima com oxigênio puro, as emissões de CO₂ são concentradas e as de NO_x são quase nulas. A substituição também é tecnicamente possível, com poucas modificações na câmara de combustão, apenas uma diminuição nas dimensões da mesma e uma melhoria no isolamento. Dos resultados também se observou que a oxi-combustão quando energeticamente equiparada a queima com ar leva a uma redução no volume de gases gerados, o que diminui a turbulência.

A decisão de substituir a queima com ar convencional pela oxi-combustão deve passar por um estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental do sistema particular. Com o protocolo de Kyoto, a oxi-combustão tornou-se objeto de discussão mundial e seu estudo e implementação hoje é necessária, uma vez que petróleo e seus derivados, por serem produtos não renováveis, tendem a aumentar seu preço e esse aumento tem-se intensificado nos últimos anos pela instabilidade política dos países produtores, fora o fato de suas emissões serem extremamente prejudiciais. O uso destes combustíveis de forma mais eficiente e menos poluente é de extrema importância no cenário atual, já que ainda não é possível a total substituição destas fontes energéticas pelas renováveis.

PALAVRAS-CHAVE: oxi-combustão, NO_x, eficiência, simulação computacional.

OLIVEIRA, F. A. D., Oxy-Combustion applied in Conventional Equipment as Alternative to Air Combustion. 2012. 136p. Doctorate Thesis in Mechanical Engineering - Guaratinguetá Campus of São Paulo State University (UNESP), 2012.

ABSTRACT

This study started with a computer simulation of combustion process with pure oxygen of natural gas, 2A oil, diesel and LPG in order to predict concentrations of reagents and temperature behavior in the chamber. After that, a experimental comparison was carried out between air combustion and oxy combustion using LPG in a vertical combustion chamber. The results show that it is possible to treat equally the oxy combustion with air combustion in terms of energy, but keeping the benefits of high efficiency and gaseous emissions, because with combustion with pure oxygen, CO₂ emissions are concentrated and NO_x are near zero. The substitution is also technically possible, with few modifications in the combustion chamber, only a decrease in its dimensions and an improvement in isolation. The results also revealed that when oxy combustion is equally treated energetically with air combustion leads to a decrease in gas volume generated, which reduces turbulence. The decision to replace the conventional air combustion with oxy combustion must pass a technical viability study, economic and environmental aspects of the particular system. With the Kyoto protocol, the oxy combustion became the subject of worldwide discussion and its study and implementation is now needed, since petrol oil and its derivatives, because they are non-renewable product, tends to have a price increase and this increase has intensified in recent years by political instability in producing countries, apart from the fact that their emissions are extremely harmful. The use of these fuels more efficiently and cleaner is extremely important in the current scenario, since it is not yet possible to fully replace these by renewable energy sources.

KEYWORDS: Oxy Combustion, NO_x, Efficiency, computer simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Enriquecimento com oxigênio em chama de pré-mistura, adaptado de Baukal (1998)	22
Figura 2 – Enriquecimento com oxigênio injetado direto chama, adaptado de Baukal (1998).....	23
Figura 3 – Queima com oxigênio puro conhecida como oxi-combustão, adaptado de Baukal (1998)	24
Figura 4 – Enriquecimento gradativo do processo até a oxi-combustão, adaptado de Baukal (1998)	25
Figura 5– Recirculação dos gases de exaustão em uma câmara de combustão	26
Figura 6 – Ilustração das reações em cadeia demonstradas acima, adaptado de Gardiner (1999)	27
Figura 7 – Energia de ativação para uma reação exotérmica, onde E_1 é a energia para a reação direta e E_2 a energia para a reação inversa.....	29
Figura 8 – Concentração dos produtos em função do grau de enriquecimento do oxidante	34
Figura 9 – Concentração dos radicais em função do grau de enriquecimento do oxidante	35
Figura 10 – Taxa de redução do consumo das misturas Gás Natural/Ox e Óleo 2A/Ox	46
Figura 11 – Tempo de residência relativo para Gás Natural e Óleo 2A	48
Figura 12 – Comportamento da temperatura interna da câmara para diferentes concentrações de diesel e taxa de alimentação de oxigênio constante.....	55
Figura 13 – Perfis de temperatura em uma reação de combustão com diesel a 0,0176mol/s (0,003kg/s) para alimentação de resíduo a 0,02; 0,015 e 0,01kg/s.....	61
Figura 14 – Perfis de temperatura em uma reação de combustão com diesel a 0,015mol/s (0,00255kg/s) para alimentação de resíduo a 0,02; 0,015 e 0,01kg/s.....	62
Figura 15 – Perfis de temperatura em uma reação de combustão com diesel a 0,01mol/s (0,017kg/s) para alimentação de resíduo a 0,02; 0,015 e 0,01kg/s.....	62
Figura 16 – Comparação entre o enriquecimento sem a razão de entalpia aplicada e enriquecimento com razão de entalpia aplicada.....	68

Figura 17 – Primeira montagem realizada na câmara de combustão para queima com oxigênio	69
Figura 18 – Foto da câmara na primeira montagem.....	70
Figura 19 – Dimensões da câmara de combustão na primeira montagem	71
Figura 20 – Montagem da câmara.....	71
Figura 21 – Primeiro teste com ar	72
Figura 22 – Chama gerada pela queima de GLP com ar.....	72
Figura 23 – Esquema do queimador de GLP	73
Figura 24 – Cilindros de GLP da National Gás Granel.....	74
Figura 25 – Manômetro diferencial em U para medição de vazão de GLP	74
Figura 26 – Painel de controle dos compressores e da bomba KSB	75
Figura 27 – Cilindro de oxigênio e placa de orifício conectados ao manômetro em U	76
Figura 28 – Sistema de análises de gases	77
Figura 29 – Analisadores de CO e CO ₂	77
Figura 30 – Analisador de NO _x	78
Figura 31 – Esquema da segunda montagem da câmara.....	79
Figura 32 – Esquema da terceira montagem da câmara.....	80
Figura 33 – Esquema da estrutura de saída	81
Figura 34 – Foto da terceira montagem.....	81
Figura 35 – Produção de CO ₂ em função do consumo de oxigênio presente no ar ...	82
Figura 36 – Concentração de oxigênio na exaustão e temperatura nos 3 experimentos.....	86
Figura 37 – Concentração de oxigênio na exaustão e temperatura do sistema para os seis testes	90
Figura 38 – Temperatura atingida nos testes durante a primeira bateria	94
Figura 39 – Concentração de oxigênio na exaustão e temperatura do sistema para os testes de 1 a 10 na segunda bateria	96
Figuras 40 – Concentração de oxigênio na exaustão e temperatura do sistema para os testes de 11 a 19 na segunda bateria	97
Figura 41 – Perfil de concentração de oxigênio na exaustão e temperaturas dos	

testes de 1 a 10 para a segunda bateria	103
Figura 42 – Perfil de concentração de oxigênio na exaustão e temperaturas dos testes de 11 a 20 para a segunda bateria	104
Figura 43 – Perfil de concentração de oxigênio na exaustão e temperaturas dos testes de 21 a 30 para a segunda bateria	105
Figura 44 – Perfil de concentração de oxigênio na exaustão e temperaturas dos testes de 31 a 40 para a segunda bateria	106
Figura 45 – Perfil de concentração de oxigênio na exaustão e temperaturas dos testes de 31 a 40 para a segunda bateria	107
Figura 46 – Concentração de oxigênio na exaustão nos testes da terceira bateria e a temperatura dos mesmos	117
Figura 47 – Comportamento da temperatura e concentração de oxigênio na exaustão para os testes de 1 a 6 para a terceira bateria de testes	120
Figura 48 – Comportamento da temperatura e concentração de oxigênio na exaustão para os testes de 7 a 12 para a terceira bateria de testes	121
Figura 49 – Comportamento da temperatura e concentração de oxigênio na exaustão para os testes de 13 a 18 para a terceira bateria de testes	122
Figura 50 – Comportamento da temperatura e concentração de oxigênio na exaustão para os testes de 19 a 22 para a terceira bateria de testes	123
Figuras 51 – Concentração de NOx na exaustão para os testes de 1 a 12 para a terceira bateria de testes.....	124
Figura 52 – Concentração de NOx na exaustão para os testes de 13 a 22 para a terceira bateria de testes.....	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição dos gases de exaustão para uma queima adiabática de diesel tendo como oxidante oxigênio puro	33
Tabela 2 – Composição dos reagentes Gás Natural/Ar	42
Tabela 3 – Dados da mistura Gás Natural/Ar.....	43
Tabela 4 – Dados dos produtos de combustão para a mistura Gás Natural/Ar.....	43
Tabela 5 – Composição da mistura gasosa na exaustão para Gás Natural/Ar	43
Tabela 6 – Composição dos reagentes Gás natural/O ₂	44
Tabela 7 – Dados da mistura Gás Natural/O ₂ , adaptado de Glassman (1996).....	45
Tabela 8 – Dados dos produtos de combustão para a mistura Gás Natural/O ₂	45
Tabela 9 – Entalpia de combustão e razão energética para mistura Gás Natural/O ₂	46
Tabela 10 – Energia fornecida em uma mistura Gás Natural/O ₂ com redução no consumo de 30%.....	47
Tabela 11 – Composição da mistura gasosa na exaustão para Gás Natural/O ₂	47
Tabela 12 – Composição dos reagentes Óleo 2A/Ar	49
Tabela 13 – Dados da mistura Óleo 2A/Ar	49
Tabela 14 – Dados dos produtos de combustão para a mistura Óleo 2A/Ar	49
Tabela 15 – Composição da mistura gasosa na exaustão para Óleo 2A/Ar.....	50
Tabela 16 – Composição dos reagentes Óleo 2A/O ₂	50
Tabela 17 – Dados da mistura Óleo 2A/O ₂	51
Tabela 18 – Propriedades de equilíbrio da mistura gasosa de exaustão da combustão.....	51
Tabela 19 – ΔH e razão ar/oxigênio para a combustão do óleo 2A para níveis de recirculação 0%, 10% e 20%	52
Tabela 20 – Taxa de redução de combustível 40%	52
Tabela 21 – Produtos da combustão da mistura Óleo 2A/O _x	52
Tabela 22 – Temperaturas obtidas com 0,374mol/s de oxigênio	54
Tabela 23 – Perfil de temperaturas para diesel 0,0176mol/s e resíduo a 0,02 kg/s....	56

Tabela 24 – Perfil de temperaturas para diesel 0,0176mol/s e resíduo a 0,015 kg/s..	57
Tabela 25 – Perfil de temperaturas para diesel 0,0176mol/s e resíduo a 0,01 kg/s....	57
Tabela 26 – Perfil de temperaturas para diesel 0,015mol/s e resíduo a 0,02 kg/s.....	58
Tabela 27 – Perfil de temperaturas para diesel 0,015mol/s e resíduo a 0,015 kg/s....	58
Tabela 28 – Perfil de temperaturas para diesel 0,015mol/s e resíduo a 0,01 kg/s.....	59
Tabela 29 – Perfil de temperaturas para diesel 0,01mol/s e resíduo a 0,02 kg/s.....	59
Tabela 30 – Perfil de temperaturas para diesel 0,01mol/s e resíduo a 0,015 kg/s.....	60
Tabela 31 – Perfil de temperaturas para diesel 0,01mol/s e resíduo a 0,01 kg/s.....	60
Tabela 32 – Condições de equilíbrio para queima com ar	63
Tabela 33 – Condições de equilíbrio para enriquecimento de 20%	64
Tabela 34 – Condições de equilíbrio para enriquecimento de 20% com a razão de entalpia aplicada	64
Tabela 35 – Condições de equilíbrio para enriquecimento de 40%	65
Tabela 36 – Condições de equilíbrio para enriquecimento de 40% com a razão de entalpia aplicada	65
Tabela 37 – Condições de equilíbrio para enriquecimento de 60%	66
Tabela 38 – Condições de equilíbrio para enriquecimento de 60% com a razão de entalpia aplicada	66
Tabela 39 – Condições de equilíbrio para oxigênio a 100%	67
Tabela 40 – Condições de equilíbrio para enriquecimento de 100% com a razão de entalpia aplicada	67
Tabela 41 – Concentração dos reagentes para queima com ar.....	86
Tabela 42 – Vazão volumétrica de água de refrigeração e sua variação de temperatura	87
Tabela 43 – Calor fornecido pelo GLP e absorvido pela água para cada caso	88
Tabela 44 – Calor total absorvido pelo sistema	88
Tabela 45 – Viscosidade média dos gases de exaustão e n° de Reynolds.....	88
Tabela 46 – Concentrações de oxigênio e GLP usados.....	89
Tabela 47 – Vazão volumétrica de água de refrigeração e sua variação de temperatura para testes com oxigênio puro	91

Tabela 48 – Calor fornecido pelo GLP e absorvido pela água para cada caso de queima com oxigênio puro.	91
Tabela 49 – Calor total absorvido pelo sistema durante a queima com oxigênio puro.....	92
Tabela 50 – Viscosidade média dos gases de exaustão e n° de Reynolds.....	92
Tabela 51 – Comparação entre os testes realizados para a primeira bateria	93
Tabela 52 – Concentração dos reagentes para queima com ar na segunda bateria de testes	95
Tabela 53 – Vazão volumétrica de água de refrigeração e sua variação de temperatura para testes com oxigênio puro para a segunda bateria de testes.....	98
Tabela 54 – Calor fornecido pelo GLP e absorvido pela água para cada caso de queima com oxigênio puro para a segunda bateria de testes.....	99
Tabela 55 – Perfil Calor total absorvido pelo sistema.....	100
Tabela 56 – Viscosidade média dos gases de exaustão e n° de Reynolds.....	101
Tabela 57 – Concentrações de oxigênio e GLP usados para a segunda bateria de Testes	101
Tabela 58 – Vazão volumétrica de água de refrigeração e sua variação de temperatura para testes com oxigênio puro para a segunda bateria de testes.....	108
Tabela 59 – Energia Fornecida pelo combustível, calor absorvido pela água e eficiência do processo para a segunda bateria de testes	109
Tabela 60 – Calor total absorvido pelo sistema na segunda bateria de testes.....	111
Tabela 61 – Comparação entre os testes feitos com ar e testes feitos com oxigênio puro na segunda bateria	112
Tabela 62 – Concentrações de GLP e ar utilizados nos testes da terceira bateria....	116
Tabela 63 – Vazão volumétrica de água de refrigeração e sua variação de temperatura para testes com ar para a terceira bateria de testes	118
Tabela 64 – Energia Fornecida pelo combustível, calor absorvido pela água e eficiência do processo para a terceira bateria de testes	118
Tabela 65 – Calor total absorvido pelo sistema na terceira bateria de testes	119
Tabela 66 – Concentrações de oxigênio e GLP usados para a terceira bateria de testes	119

Tabela 67 – Vazão volumétrica de água de refrigeração e sua variação de temperatura para testes com oxigênio puro para a terceira bateria de testes.....	126
Tabela 68 – Energia Fornecida pelo combustível, calor absorvido pela água e eficiência do processo para a terceira bateria de testes	127
Tabela 69 – Calor total absorvido pelo sistema na terceira bateria de testes	128
Tabela 70 – Comparação entre os testes feitos com ar e testes feitos com oxigênio puro na terceira bateria de testes	129

LISTA DE SÍMBOLOS

AC	Relação ar/combustível	<i>mol/mol</i>
A	Constante pré exponencial	[1]
c	Coefficiente estequiométrico do ar/oxigênio	<i>mol/s</i>
CA	Relação combustível/ar	<i>mol/mol</i>
C _p	calor específico a pressão constante dos gases	<i>kJ/kg</i>
C _{pH₂O}	calor específico da água	<i>kJ/kg.°C</i>
C _{pCO₂}	calor específico do CO ₂	<i>kJ/kg.°C</i>
C _{pN₂}	calor específico do nitrogênio	<i>kJ/kg.°C</i>
C _{pO₂}	calor específico do O ₂	<i>kJ/kg.°C</i>
E	energia de ativação	<i>J/mol</i>
H _r	Entalpia de formação dos reagentes	<i>kJ</i>
H _p	Entalpia de formação dos produtos	<i>kJ</i>
k ₁	coeficiente da taxa de reação direta	<i>cm³/s</i>
k ₂	coeficiente da taxa de reação inversa	<i>cm³/s</i>
<i>m</i>	vazão mássica	<i>kg/s</i>
<i>m</i> _{O₂}	vazão mássica da oxigênio	<i>kg/s</i>
<i>m</i> _c	vazão mássica de combustível	<i>kg/s</i>
M	massa molar	<i>g/mol</i>
M _{ar}	massa molar do ar	<i>g/mol</i>
M _{O₂}	massa molar do O ₂	<i>g/mol</i>
m _{ar}	massa de ar	<i>kg</i>
m _{CO₂}	massa de CO ₂	<i>kg</i>
m _{O₂}	massa da oxigênio	<i>kg</i>
m _c	massa de combustível	<i>kg</i>
n	número de moles	<i>mol</i>
n _c	número de mols do combustível	<i>kmol</i>
P	pressão do sistema	<i>Pa</i>
R	constante do particular gás ideal	<i>J/mol.K</i>
Re	número de Reynolds	[1]

$r_{a/c}$	razão ar/combustível	[1]
r_1	taxa de reação	$mol.cm^3/s$
T	temperatura	$^{\circ}C$
T_f	temperatura final de combustão	$^{\circ}C$
T_i	temperatura inicial de combustão	$^{\circ}C$
t_r	tempo de residência	s
$t_{r,ar}$	tempo de residência para queima com ar	s
t_{r,O_2}	tempo de residência para queima com O_2	s
V	volume	l
X	taxa de recirculação de gases de exaustão	[1]
x	coeficiente estequiométrico do CO_2	mol/s
y	coeficiente estequiométrico da água	mol/s
α	excesso de oxidante	[1]
Ω	razão entre o fluxo de oxigênio no oxidante e o volume total de oxidante	[1]
ΔT	variação de temperatura da água	$^{\circ}C$
ΔH	entalpia de reação	kJ

SUMÁRIO

1 Introdução.....	19
1.1 A Oxi-combustão – Justificativa do Uso.....	19
1.2 O Ar como Oxidante e seu Enriquecimento com Oxigênio.....	20
1.2.1 Excesso de Oxidante.....	20
1.2.2 O Oxigênio	21
1.2.3 Métodos de Enriquecimento por Oxigênio	21
1.2.4 Recirculação dos Gases de Exaustão.....	25
1.3 Reações em Cadeia e Taxas de Reação.....	26
1.3.1 A Oxidação do Hidrogênio.....	30
1.3.2 A Oxidação do Monóxido de Carbono.....	31
1.3.3 A Oxidação de Hidrocarbonetos	31
1.4 Regimes de Operação na Oxi-combustão	32
1.5 Poluentes.....	35
1.5.1 Emissões de SO _x	36
1.5.2 Emissões de NO _x	37
1.5.3 Emissões de CO ₂	39
1.6 Vantagens da Oxi-combustão.....	39
2 Simulação Computacional.....	40
2.1 Teste para T 1300°C	42
2.1.1 Queima de Gás Natural com Ar	42
2.1.2 Queima Gás Natural com Oxigênio Puro.....	44
2.1.3 Calculo do Tempo de Residência para o Gás Natural.....	47
2.1.4 Queima de Óleo 2A com Ar.....	48
2.1.5 Queima de Óleo 2a com Oxigênio Puro.....	50
2.1.6 Calculo do Tempo de Residência.....	53
2.2 Simulação para Chama Adiabática.....	53
2.2.1 Teste com Alimentação de Oxigênio Fixa para Diesel	53
2.2.2 Teste com Alimentação Variável de Oxigênio para Diesel	56
2.2.3 Teste Com GLP	63

Experimentos	69
3.1 Descrição e Montagem dos Equipamentos	69
3.1.1 Primeira Montagem	69
3.1.2 Suprimento de Gás GLP	73
3.1.3 Suprimento de Ar/O ₂ de Combustão	75
3.1.4 Suprimento de Água de Refrigeração.....	76
3.1.5 Analisadores de Gases	76
3.1.6 Sistema de Aquisição de Dados	78
3.1.7 Segunda Montagem da Câmara.....	79
3.1.8 Terceira Montagem da Câmara	80
3.2 Caracterização do GLP	82
4 Tratamento e Discussão dos Resultados	84
4.1 Ensaio Preliminar	84
4.2 Primeira Bateria de Testes	86
4.2.1 Queima com Ar	86
4.2.2 Queima com Oxigênio Puro	89
4.3 Segunda Bateria de Testes.....	95
4.3.1 Queima com Ar	95
4.3.2 Queima com Oxigênio Puro	101
4.4 Terceira Bateria de Testes	116
4.4.1 Queima com Ar	116
4.4.2 Queima com Oxigênio Puro	119
5 Conclusão	131
Referências	135

1 INTRODUÇÃO

1.1 A OXI-COMBUSTÃO – JUSTIFICATIVA DO USO

O aquecimento global constitui-se hoje como um dos maiores desafios a serem superados pela humanidade. Segundo Seepana e Jayanti (2009), 80% de toda a energia no mundo é derivada de combustíveis fósseis e é esperado um aumento de 51% no total das emissões até 2030 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2007). Países com a economia crescente como a China, que alcançou o segundo lugar entre os maiores emissores em 2004 com 4,8Gt (18% das emissões mundiais de CO₂) devido ao largo uso de termelétricas (60% da energia do país provém da queima do carvão) (XIONG, 2009), são foco de preocupação devido a falta de cuidados com emissões dos mesmos. Portanto, se faz necessária novas regulamentações que visam a redução de gases de efeito estufa como o protocolo de Kyoto. Tais regulamentações levam ao desenvolvimento de novas tecnologias que focam a redução destes gases, segundo Arias, Pevida e Rubiera (2008). Uma das mais promissoras alternativas é o sequestro e posterior armazenagem de CO₂, onde o gás obtido a partir de queima de combustíveis fósseis é capturado, deixando de ser solto na atmosfera. Entretanto, a queima realizada com ar gera CO₂ com baixa concentração o que dificulta sua captura (o processo tem baixo rendimento e demanda quantidades altas de energia). A presença de NO_x e SO_x também é problemática no processo de seqüestro, segundo Seepana e Jayanti (2009). Estes problemas podem ser contornados utilizando-se uma atmosfera enriquecida de oxigênio ou o próprio puro ao invés de apenas ar como gás comburentes. O enriquecimento do ar com oxigênio é um meio interessante de otimizar as taxas de incineração em câmaras de combustão originalmente projetadas para operar apenas com ar, fixando-se parâmetros como temperatura de combustão, nível de turbulência e taxa de residência (WALL, 2007) e (MELO, LACAVA, CARVALHO, 1999). A oxi-combustão é um recurso tecnológico para a mitigação de gases de efeito estufa onde a queima de combustível é aprimorada pela substituição de ar por oxigênio puro.

1.2 O AR COMO OXIDANTE E SEU ENRIQUECIMENTO COM OXIGÊNIO

O ar é composto de 21% de O₂ e 79% de N₂ em volume; boa parte das indústrias que dependem de processos combustivos como fonte de energia o utilizam como oxidante. Em alguns processos o ar pode ser enriquecido com frações de oxigênio ou até mesmo substituído. Esta substituição no passado tinha seu custo e uma aplicabilidade específica, porém com o avanço tecnológico da extração do oxigênio do ar, esse custo foi reduzido, tornando possível o uso da oxí-combustão para demais áreas. Os altos níveis energéticos atingidos permitem a obtenção de elevadas taxas de geração de produtos industriais de interesse, bem como elevadas taxas de destruição de resíduos, somado a isso a possibilidade de operação com baixas taxas de geração de poluentes atmosféricos (CARVALHO e MCQUAY, 2007) e redução dos fluxos gasosos.

1.2.1 Excesso de Oxidante

O excesso de oxidante é necessário para garantir uma alta taxa de reação na combustão, sendo definido como uma porcentagem extra de O₂ (no caso da oxí combustão) ou ar acima da estequiométrica. Esta porcentagem varia com o estado físico do combustível, de 1 a 2% para combustíveis gasosos, 5 a 10% para líquidos e porcentagens de até 25% para sólidos. Uma forma de representar a relação ar/O₂ empregado em um processo e o respectivo combustível é a razão ar/combustível ou combustível/ar. Esta relação, mostrada a seguir, pode ser dada em base mássica ou molar e caracteriza-se em um número adimensional. (CARVALHO e MCQUAY, 2007)

$$AC = \frac{mc}{m_{ar}} \quad \text{e} \quad AC = \frac{mc}{m_{O_2}} \quad (1)$$

Ou

$$CA = \frac{m_{ar}}{mc} \quad \text{e} \quad CA = \frac{m_{O_2}}{mc} \quad (2)$$

1.2.2 O Oxigênio

O oxigênio é um gás inodoro, incolor e insípido a temperatura e pressão ambiente e o composto mais abundante da Terra e o quarto mais abundante do universo. Seu nome significa “formador de ácidos” devido a sua habilidade de se combinar com outros compostos para formar ácidos. É uma molécula diatômica em sua forma não combinada, de peso molecular 32. Torna-se um líquido azul transparente e inodoro sob temperaturas abaixo de -183°C e pressão atmosférica. Oxigênio puro é muito reativo, seu alto poder oxidante não o torna inflamável, mas pode acelerar consideravelmente a taxa de combustão.

O oxigênio é usado na formação de diversos metais e ligas dentro da indústria metalúrgica. É empregado na manufatura de vidros, cimento e na indústria mineral, assim como na formação de composto químicos. Dentro da área ambiental, é empregado no tratamento de dejetos líquidos e na incineração de resíduos. Ele pode ser empregado substituindo parcial ou totalmente o ar. Este emprego dependerá do caso em questão, como processos de eficiência termal baixa, demanda de altas temperaturas que ultrapassam 1400K e mais atualmente em processos que possuem um afluyente de gases nocivos, altas emissões de NOx (BAUKAL, 1998).

1.2.3 Métodos de Enriquecimento por Oxigênio.

O oxigênio pode ser usado de quatro formas: Pode ser adicionado na corrente de ar de acordo com a figura 1, injetado dentro de uma chama ar/combustível como mostrado na figura 2, substituindo totalmente o ar na queima como se encontra na figura 3 (Melo, Lacava e Carvalho, 1998) e ainda pode ser feito um enriquecimento gradativo até que se atinja 100% de oxigênio e 0% de ar na câmara como descrito na figura 4. No terceiro e quarto casos, o custo do uso de oxigênio puro é justificado pelas altas temperaturas alcançadas. A temperatura da chama aumenta consideravelmente quando o ar é substituído por oxigênio, pois o nitrogênio atua como um diluente, roubando o calor. Em uma queima padrão com ar, 70% do volume dos gases de

exaustão são constituídos de nitrogênio (MELO, LACAVA E CARVALHO, 1998). A seguir temos o detalhamento dos processos.

No enriquecimento de pré-mistura, o oxigênio é injetado junto com o suprimento de ar, como visto na figura 1, causando incremento na temperatura e encurtamento da chama. O aumento da temperatura tem seus benefícios, porém seu descontrole pode danificar o queimador, (BAUKAL, 1998).

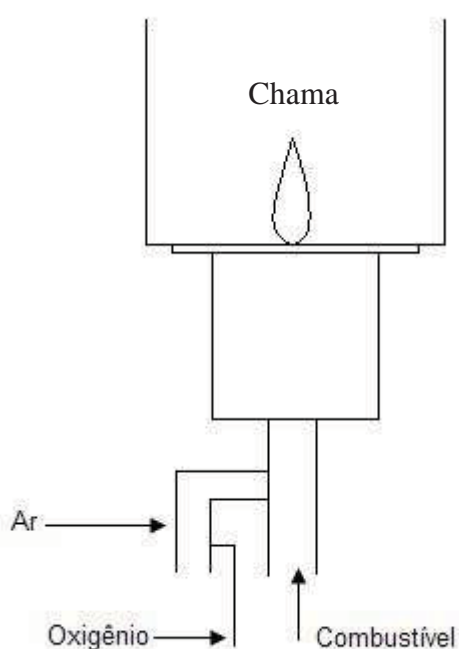


Figura 1 – Enriquecimento com oxigênio em chama de pré-mistura, adaptado de Baukal (1998).

Na injeção direta na chama, têm-se uma série de vantagens ao processo anterior. Não há necessidade de modificação no equipamento, as emissões de NO_x são mais reduzidas e a temperatura da chama é melhor distribuída. O oxigênio pode ser injetado entre a chama e a entrada de combustível, tendo o cuidado com o equipamento devido as altas temperaturas; ou ainda entre o queimador e o material a ser queimado, enriquecendo a queima porém em temperaturas mais baixas, poupando o equipamento (BAUKAL, 1998).

Um exemplo deste sistema pode ser visto na figura 2 abaixo:

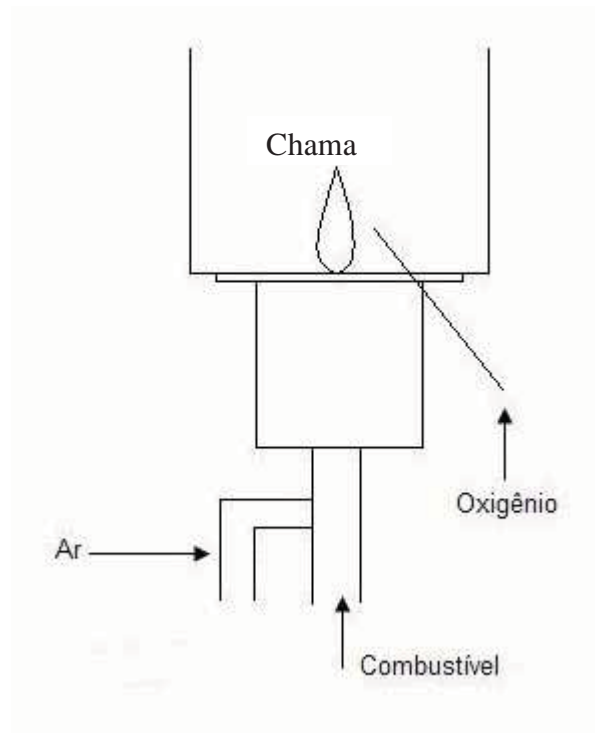


Figura 2 – Enriquecimento com oxigênio injetado direto chama, adaptado de Baukal (1998).

Além do enriquecimento, há também o uso de oxigênio puro descrito na figura 3, onde o combustível e o oxigênio mantêm-se separados, encontrando-se e reagindo apenas na saída do queimador. Segundo Baukal (1998), a ignição deve ser feita com a temperatura da câmara abaixo da temperatura de auto-ignição do combustível. Dependendo da geometria, a chama obtida pode ser quase invisível. O aumento do tempo de residência devido ao menor volume de gases no interior da câmara somada ao aumento da temperatura da chama pode danificar o equipamento.

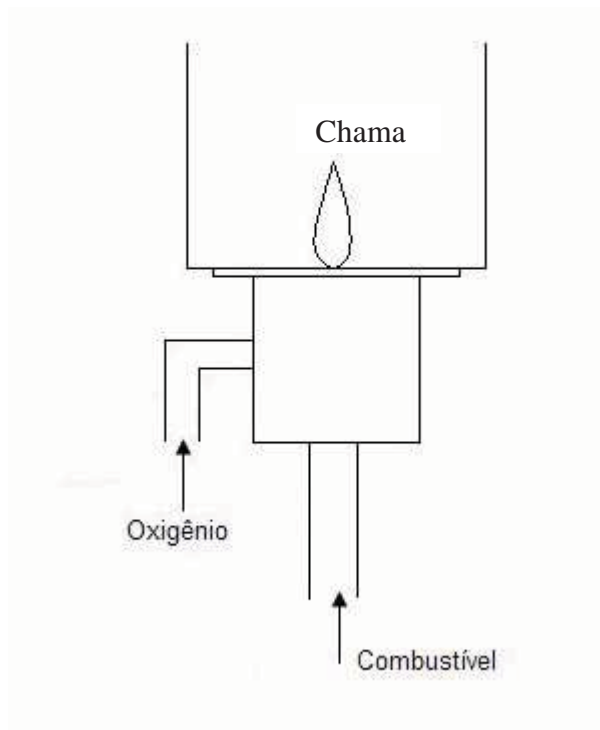


Figura 3 – Queima com oxigênio puro conhecida como oxi-combustão, adaptado de Baukal (1998).

O quarto método, que foi empregado neste trabalho, consiste em utilizar o sistema da figura 3 acima, porém empregando ar em conjunto com o oxigênio, injetados separadamente do combustível, com fins de manter a temperatura estável dentro da câmara. Utilizando ar puro no início e enriquecendo-o com oxigênio. Quanto mais oxigênio é introduzido, menos ar e combustível entra na câmara, tendo no final uma oxi-combustão. Este processo será mais detalhado no decorrer deste trabalho. Um exemplo do processo pode ser visto na figura 4 a seguir.

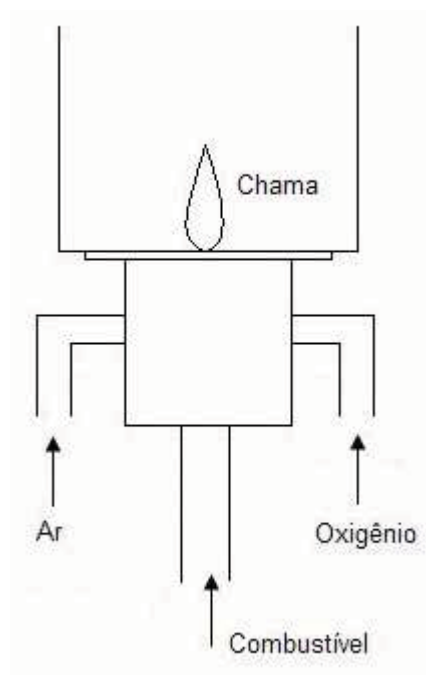


Figura 4 – Enriquecimento gradativo do processo até a oxi-combustão, adaptado de Baukal (1998).

Porém para todos os casos, se o calor não for bem distribuído, a radiação intensa da chama na oxi-combustão pode danificar as paredes refratárias. Para contornar este problema, uma porção dos gases de exaustão pode ser recirculada. Uma vez que o nitrogênio é eliminado, a corrente de gás é rica em CO_2 e a combustão se dá em um ambiente constituído de uma mistura de O_2/CO_2 (BAUKAL, 1998).

1.2.4 Recirculação dos Gases de Exaustão

A presença de CO_2 em altas concentrações dentro da câmara de combustão afeta a transferência de calor, ignição da chama e emissões. O alto valor do calor específico do CO_2 em comparação com o N_2 causa queda na temperatura dos gases (TAN, CROISSET, DOUGLAS E THAMBIMUTHU, 2008). Além de afetar a performance da combustão, a recirculação também altera a formação de poluentes como SO_2 , NO_x e

CO (Rathnam, 2009). Altas temperaturas favorecem a formação de NO_x , problema que pode ser reduzido utilizando-se oxigênio puro ao invés de ar enriquecido (sem considerar a possível presença de nitrogênio no combustível), ou mesmo através do controle da temperatura da chama enquanto que CO é convertido para CO_2 (LIU, ZAILANI E GIBBS, 2005).

A queima com oxigênio ao invés de ar também implica na redução do volume do fluxo de gases, o que leva a um tempo de residência maior (maior tempo de permanência dos gases na câmara, o que leva a uma maior transferência de calor para suas paredes), fato que pode ser reduzido com o redimensionamento da câmara de combustão ou mesmo com a recirculação dos gases de exaustão levando a uma diminuição no tempo de residência devido ao aumento de massa gasosa dentro da câmara. A recirculação pode ser vista na figura 5:

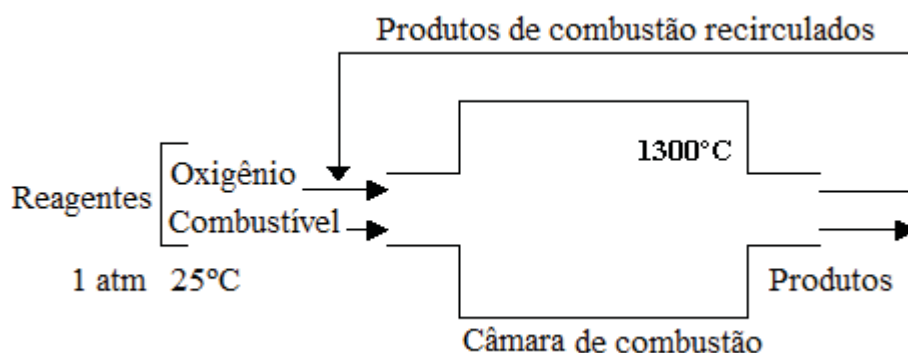


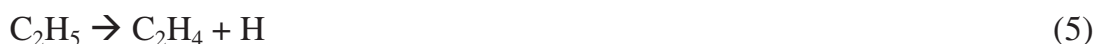
Figura 5 – Recirculação dos gases de exaustão em uma câmara de combustão.

A recirculação de gases também contribui para a redução da formação de NO_x devido ao decréscimo da concentração de O_2 na zona de combustão e pelo abaixamento da temperatura (CROISSET, THAMBIMUTHU, 2001).

1.3 REAÇÕES EM CADEIA E TAXAS DE REAÇÃO

Boa parte das reações químicas não ocorrem diretamente, ao invés disto elas ocorrem com a dissociação inicial das moléculas participantes para a forma de radicais que iniciam uma cadeia de reações. No caso das reações de combustão, têm-se mecanismos específicos que caracterizam uma reação química em cadeia.

Os produtos das reações anteriores servem como reagentes para uma ou mais reações que se seguem. Estes produtos, mais conhecidos como radicais livres, são caracterizados em átomos ou fragmentos de moléculas. Uma molécula de metano estável pode ser fragmentada em um átomo de hidrogênio com um elétron e um radical CH_3 com nove elétrons ou até mesmo radicais mais reativos como CH_2 . Segue abaixo uma seqüência de reações envolvendo radicais livres em uma queima de etano, (GARDINER, 2000):



Destas reações obtêm-se um resultante:



Este mecanismo reacional é representado na figura 6:

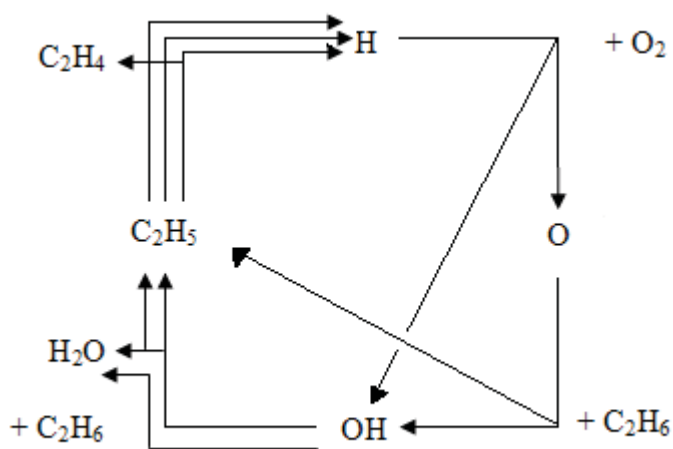


Figura 6 – Ilustração das reações em cadeia demonstradas acima, adaptado de Gardiner (2000).

Resumidamente, têm-se:



Dois radicais são criados para cada radical que é consumido. Um monoradical, H, criado pela quebra de uma ligação simples, reage com O_2 que possui uma estrutura

que contêm uma dupla ligação. Ou um biradical, O, formado pela quebra de uma dupla ligação, reage com moléculas como H₂ ou moléculas orgânicas quaisquer (moléculas do combustível). A quebra das ligações para a formação dos radicais é caracterizada como uma dissociação, processo altamente endotérmico. O término da reação em cadeia ocorre quando dois radicais se recombinaem ou quando um radical se combina com uma molécula formando outra molécula ou um radical de baixa reatividade. A atividade dos radicais em reações de combustão é alta; a gasolina, por exemplo, em um cilindro de um motor de combustão interna queima em questão de milisegundo. Ou seja, sua taxa de reação é extremamente alta, (GARDINER, 2000).

A taxa de reação é expressa no tempo em que a concentração muda ao invés da quantidade que reagiu. Por exemplo, a taxa com que o heptano queima é da ordem de $3,1 \cdot 10^4 \text{ mol cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ de acordo com Gardiner (2000). A taxa de reação depende do mecanismo da reação e da concentração do reagente (embora não há como prever isto) sendo este mais influente quando se trata de reações elementares como a reação (8). Então, a taxa para esta reação pode ser expressa:

$$r_1 = k_1[\text{H}][\text{O}_2] - k_2[\text{OH}][\text{O}] \quad (10)$$

Onde k_1 é o coeficiente da taxa de reação direta e k_2 o coeficiente da taxa de reação inversa (é comum nos processos combustivos que reações elementares ocorram em ambas direções, portanto a taxa é definida pela velocidade com que ocorre a reação direta menos a velocidade com que ocorre a reação inversa). Este coeficiente tem seu valor dependente das condições do sistema; entre estas condições, as mais importantes são a concentração dos reagentes, a temperatura, os efeitos de radiação e a presença de catalisador ou inibidor, (GARDINER, 2000).

Como o coeficiente é dependente da temperatura, e esta varia durante uma reação de combustão, o uso do termo “constante” para o coeficiente deve ser evitado. Arrhenius demonstrou uma simples teoria que afirma esta dependência da temperatura, onde somente moléculas que possuem energia maior que uma certa quantidade “E”, irão reagir. Assim estas moléculas adquirem uma energia adicional para colisões

induzidas pela temperatura, levando a formação de produtos, (GLASSMAN, 1996). A equação de Arrhenius pode ser vista abaixo:

$$k = A \exp(-E/RT) \quad (11)$$

Onde A é a constante que leva em conta o fator espacial e a frequência de colisões, R é a constante universal dos gases, T é a temperatura do sistema e E a energia de ativação da reação, ou seja, a barreira energética a ser vencida para que haja a formação dos complexos ativados intermediários que levam a formação de produtos. Um exemplo pode ser observado na figura 7.

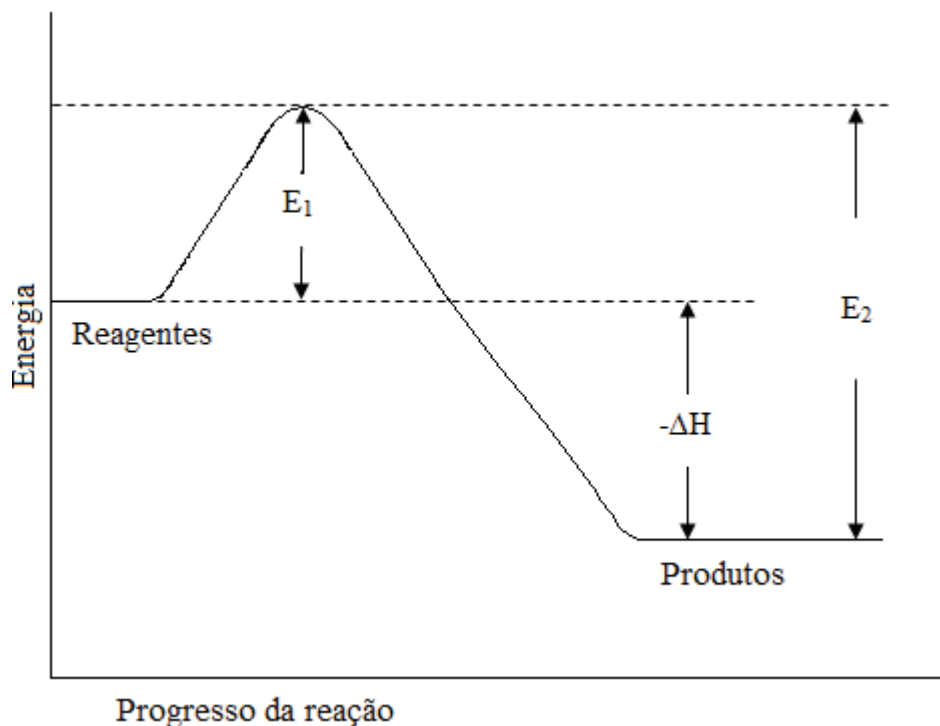


Figura 7 – Energia de ativação para uma reação exotérmica, onde E_1 é a energia para a reação direta e E_2 a energia para a reação inversa, adaptado de Glassman (1996).

Quanto mais exotérmica for a reação, mais baixa é a energia de ativação geralmente. A energia liberada durante a reação exotérmica em alguns casos é maior do que a energia de ativação, alimentando todo o processo e até mesmo promovendo a reação inversa. Porém, em outros casos, como por exemplo para a decomposição do

benzeno, a energia de ativação para a reação de decomposição é tão alta que mesmo se tratando de um processo exotérmico, a energia liberada não é suficiente para vencer essa barreira, (GLASSMAN, 1996).

1.3.1 A Oxidação do Hidrogênio

A oxidação do hidrogênio não pode ser deixada de lado em uma discussão sobre reações em cadeia. Trata-se de uma das mais simples reações de combustão que possui apenas água como produto apesar de apresentar um mecanismo complexo envolvendo quatro espécies ativas em seus passos elementares, O, H, OH, HO₂ e até mesmo H₂O₂ em alguns casos.

Segundo Glassman (1996), as chamas do hidrogênio geradas por sua combustão com o ar ou oxigênio exibem pouca ou nenhuma radiação visível. Quantidades consideráveis de OH podem ser detectadas, entretanto, apenas no ultravioleta. Suas chamas estequiométricas podem atingir até 2400K com ar e 3100K com oxigênio.

Para a oxidação do hidrogênio é necessário uma reação que inicialize a reação em cadeia, onde é possível os dois casos:



A reação inicial gera apenas poucas espécies ativas, a maioria dos centros ativos é formada posteriormente durante a reação. Os passos mais importantes são aqueles que suprem cadeia e promovem sua propagação. São as equações (8), (9) e a equação (14):



Quanto mais alta a temperatura, maior é a participação e importância destas reações em cadeia. As reações dos átomos de hidrogênio com O₂ constituem também em passos de grande importância, que inclui a recombinação de átomos de H e O e radicais OH, formação de radicais HO₂, menos reativos, e, a baixas temperaturas, a formação de H₂O₂, (GARDINER, 2000).





onde M representa espécies não reativas.

1.3.2 A Oxidação do Monóxido de Carbono

O uso do monóxido de carbono como combustível é mais conhecido quando se fala de gás d'água, onde atua como componente juntamente com o hidrogênio. O gás d'água era mais largamente empregado antes das técnicas modernas de produção do gás natural, atualmente o CO ainda é empregado na indústria sob a forma de gás de síntese.

Porém sua principal função é como um reagente intermediário na combustão de hidrocarbonetos:



A reação demonstrada na equação (19) é lenta quando comparada com as reações dos demais radicais, porém a taxa de oxidação do CO aumenta em presença de substâncias como água. Pequenas quantidades de hidrogênio são capazes de aumentar a taxa e oxidação do CO.

1.3.3 A Oxidação de Hidrocarbonetos

Hidrocarbonetos são empregados principalmente como combustíveis e se apresentam geralmente como misturas complexas. Estas misturas variam, apresentando diferenças uma com as outras devido às quantidades de alifáticos, olefinas e aromáticos presentes e quanto mais alta a ordem dos hidrocarbonetos (acima do propano) mais lenta a reação de oxidação. Entretanto, as diferenças mais importantes estão na oxidação dos hidrocarbonetos a baixas e altas temperaturas, acima de 1000K, (GARDINER, 2000).

Para baixas temperaturas, os simples mecanismos reativos descritos acima não explicam o período de indução (primeiros momentos da combustão, pouca massa de mistura já queimou ou está queimando), pois a taxa de reação é mais baixa do que a prevista por estes mecanismos. Ainda, grandes frações de combustível são convertidas para espécies estáveis parcialmente oxidadas antes destas liberarem uma quantidade significativa de energia. Gardiner (2000) descreve um mecanismo para a oxidação dos hidrocarbonetos:



A espécie ROO acumula para concentrações significativas antes da reação em cadeia se tornar importante. Após sua acumulação a auto aceleração da reação é observada.

Para reações a altas temperaturas, a decomposição de ROO pela reação inversa vista na equação (20) se torna mais rápida. A produção de H₂O₂ é mais significativa em altas temperaturas e sua presença substitui ROOH enquanto HO₂ e OH, que se tornam dominantes nas reações em cadeia, substituem ROO.

1.4 REGIMES DE OPERAÇÃO NA OXI-COMBUSTÃO

Há dois modos de operação na oxi-combustão, o enriquecimento de baixo nível e de alto nível. Para um queima com ar comum, a razão entre o fluxo de oxigênio no oxidante e o volume total de oxidante, dado pela equação 23, é sempre 0,21:

$$\Omega = \frac{\text{Volume total de O}_2 \text{ no oxidante}}{\text{Volume total de oxidante}} \quad (23)$$

Para uma queima de enriquecimento de baixo nível, estes valores da taxa de O₂ são $\Omega < 0,3$. Este tipo de enriquecimento é usado geralmente onde apenas algumas modificações são implementadas no equipamento para uma incrementação no

processo. Em alguns casos a taxa de produção pode ser significativamente aumentada com pequenas quantidades de oxigênio introduzidas, onde a câmara trabalha com frações de $\Omega = 0,28$.

De acordo com Baukal (1998), para concentrações acima de 0,28, a chama torna-se instável ou a temperatura torna-se muito elevada, exigindo modificações no equipamento ou no processo.

Para queima com enriquecimento de alto nível, oxigênio de alta pureza ($\Omega \geq 0,9$), é utilizado. Estas taxas são utilizadas para aplicações que exigem altas temperaturas, onde os benefícios justificam o alto custo. Neste caso uma modificação no equipamento se faz necessária devido as altas temperaturas. Mais de 70% do volume de gases de exaustão são constituídos de N_2 . Este volume é consideravelmente reduzido com a utilização de oxidante rico em O_2 . A composição final destes gases produzidos depende de uma série de fatores incluindo a razão Ω e a estequiometria do processo. A tabela 1 abaixo possui valores das concentrações dos gases de exaustão para uma simulação de queima adiabática de diesel utilizando O_2 puro.

Estes dados foram obtidos através de uso do programa CEA (Chemical Equilibrium with Applications) da NASA:

Tabela 1 – Composição dos gases de exaustão para uma queima adiabática de diesel tendo como oxidante oxigênio puro.

COMPOSIÇÃO DE EQUILIBRIO	
frações molares	
H(g)	3,66E-02
OH(g)	9,29E-02
HO2(g)	3,54E-05
H2(g)	3,91E-02
H2O(g)	0,2776
CO(g)	0,1787
CO2(g)	0,1735
O(g)	5,23E-02
O2(g)	0,1494

A medida em que o ar é enriquecido, estas espécies gasosas experimentam variações que estão representadas na figura 8:

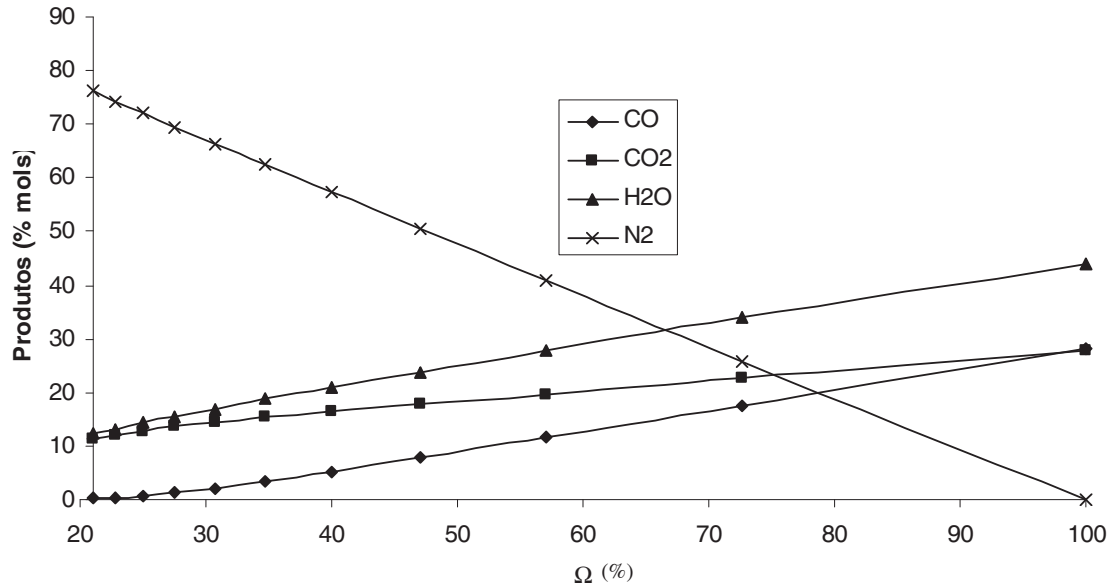


Figura 8 – Concentração dos produtos em função do grau de enriquecimento do oxidante.

Como é mostrado na figura 8, a medida que o nitrogênio é removido do oxidante, sua concentração também decai no exaustão dos produtos bem como de outras espécies derivadas do mesmo, causando um aumento na concentração de CO₂, H₂O e CO.

Segundo Baukal (1998), o aumento da presença de oxigênio favorece o aparecimento de radicais como H, O, OH. CO e H₂ oriundos de combustível não queimado e O₂ que não reagiu também têm sua concentração aumentada. Todas estas espécies, cujas concentrações podem ser vistas na tabela 1 acima, são originadas de dissociação química que ocorre devido as altas temperaturas. A figura 9 apresenta a variação das concentrações destas espécies com o grau de enriquecimento.

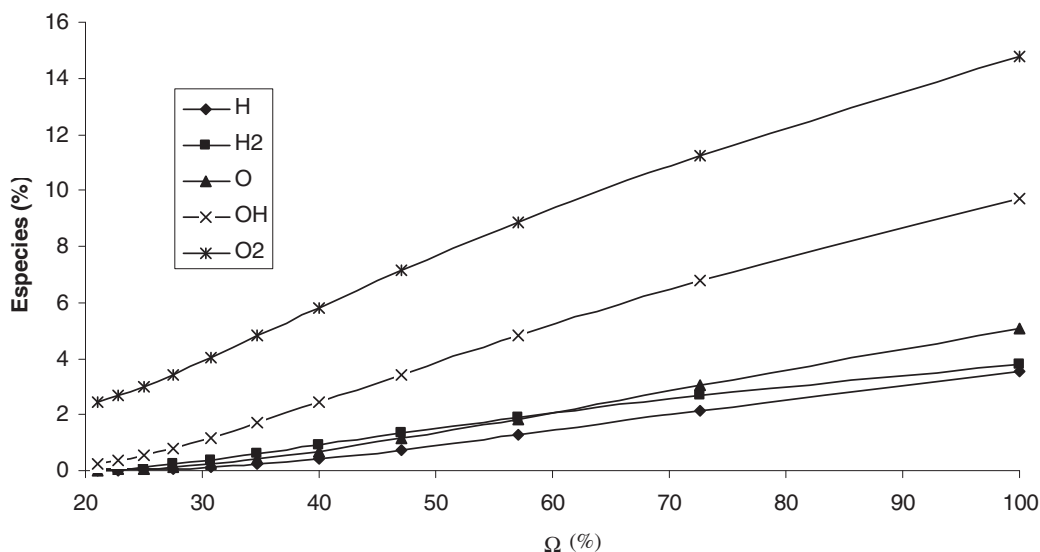


Figura 9 – Concentração dos radicais em função do grau de enriquecimento do oxidante.

Todos os dados foram simulados no computador pelo programa CEA (Chemical Equilibrium with Applications) para uma situação de chama adiabática, ou seja, sem perda de calor. Em uma situação normal a chama não atinge tal temperatura devido a perdas, seja para as paredes da câmara de combustão, ou para os gases de exaustão, sob a forma de radiação e/ou convecção. O objetivo da combustão é esse: transferir calor ou para os gases ou para a câmara de combustão, de forma mais eficiente o possível. Quanto mais eficiente, mais calor é transferido.

1.5 POLUENTES

A poluição é o efeito colateral do desenvolvimento humano. A partir da revolução industrial, onde o trabalho humano e animal foi substituído pelo trabalho de máquinas movidas a vapor que era gerado pela queima de combustíveis fósseis, a emissão de gases como SO₂ e NO_x se intensifica. A sociedade moderna não vive sem a energia térmica, e como consequência convive com as emissões do processos combustivo, que podem ser classificadas como (CARVALHO e LACAVA, 2003):

- Emissões atmosféricas; produtos que deixam o local do processo através do ar.
- Emissões em correntes líquidas; produtos que deixam o local do processo através de correntes de água.

- Resíduos sólidos; produtos que deixam o local do processo na forma sólida.
- Emissões térmicas; energia que aumenta a temperatura do meio circundante.

Poluentes atmosféricos possuem um grande volume por unidade de massa e são carregados a grandes distancias de forma incontrolada. Apesar do homem empregar a combustão como fonte de energia a centenas de anos, foi a partir do século XX que as emissões se intensificaram de forma que nos anos 70 a comunidade científica passou a se preocupar com a taxa de poluentes liberada na atmosfera. A solução para o problema não vem do banimento da combustão, mas sim de estudos e pesquisas para desenvolvimento de tecnologias que objetivam a mitigação de emissões, identificando os principais gases e convertendo-os para constituintes menos nocivos e até mesmo eliminando-os da corrente de exaustão quando possível, (CARVALHO e LACAVA, 2003).

A queima de combustíveis fósseis gera majoritariamente quatro principais poluentes, monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de nitrogênio e dióxidos de enxofre, que serão discutidos a seguir.

1.5.1 Emissões de SO_x

As estimativas das emissões de enxofre variam largamente, algo em torno de 60% do total vêm da queima de carvão, 30% da queima do petróleo e o restante provem da metalurgia (GARDINER, 1999). Boa parte das emissões se concentra no hemisfério norte, oriundos de uma série de compostos orgânicos e inorgânicos como H_2S , CS_2 e dimetil sulfetos e dissulfetos presentes nos combustíveis que oxidam formando SO_x (SO , S_2O , SO_2 , SO_3 , SO_4 , sendo SO_2 e SO_3 de maior destaque para a combustão). A Formação de SO_2 ocorre a altas temperaturas enquanto que SO_3 tende a se formar a temperaturas mais baixas.

A presença de cinzas, dióxido de silício e óxido de alumínio no fluxo gasoso da combustão catalisa a formação de SO_3 a partir de SO_2 (PURI, 2000).

Devido as altas temperatura dos processos combustivos, SO_2 é mais abundante e é considerado um poluente por:

- Atacar o sistema respiratório de humanos e animais.

- Quando entra em contato com a umidade atmosférica, oxida formando SO_3 que reage com a água formando ácido sulfúrico que precipita sob a forma de chuva ácida.

Uma vez que cai no solo, o ácido atinge plantas e animais em uma cadeia de eventos.

Algumas medidas podem ser tomadas para aliviar as emissões de óxidos de enxofre, como a remoção do gás sulfídrico por absorção presente no gás natural (H_2S é utilizado em baixas concentrações no gás natural por questões de segurança, para que este deixe de ser inodoro). Enxofre presente no carvão pode ser removido por meio de processos térmicos e/ou químicos e para combustíveis líquidos a remoção se dá por meio de dessulfurização catalítica. A remoção também pode ser feita em uma câmara de combustão que possua leito fluidizado contendo CaO , que reage com o SO_2 formando CaSO_4 , impedindo a saída do gás para a atmosfera.

O processo da oxi-combustão não altera o nível de formação de SO_2 , porém ela leva a um menor consumo do combustível que acarreta em um menor volume de fluxo gasoso gerado.

1.5.2 Emissões de NO_x

NO_x é o termo comum utilizado como referência para os gases NO e NO_2 , sendo o NO mais abundante devido a sua maior estabilidade. Estes gases são formados durante o processo de combustão a partir do nitrogênio presente no ar utilizado como comburente ou mesmo ligado aos combustíveis orgânico de origem fóssil. As principais fontes de NO_x são:

- **NO_x térmico ou mecanismo de Zeldovich**

Neste caso as moléculas NO vêm da fixação do nitrogênio do ar em chamas de alta temperatura, que causam o aumento da concentração de átomos O por dissociação, bem como de radicais OH , como mostrado a seguir:



A taxa de formação de NO é muito sensível a temperaturas e concentrações de radicais. A mitigação pode ser feita abaixando-se a temperatura do processo e/ou a diminuição do tempo de residência na câmara.

- **NO_x Imediato**

Formação de NO atribuída a radicais dos hidrocarbonetos. Estes radicais são formados em zonas ricas em combustível por uma serie de reações de degradação. A mais importante delas é a reação dos radicais CH com o nitrogênio:



Se há O₂ presente em quantidade suficiente, os átomos N reagirão com ele formando NO.

- **Nitrogênio presente no combustível**

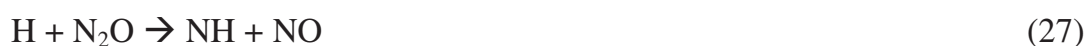
A formação de NO através da presença de nitrogênio nos combustíveis é particularmente importante no caso de queima de carvão e óleos pesados que podem conter até 2,5% de N₂, (GARDINER, 2000).

A taxa de formação de NO é fortemente dependente da taxa de mistura ar-combustível. Os níveis de NO crescem com o aumento de nitrogênio no combustível, mas principalmente pela estequiometria e a temperatura.

A quantidade de NO formada é independente da natureza química do combustível, uma vez que o nitrogênio acaba sendo convertido basicamente para HCN e NH₃. HCN influencia a formação de NO de forma similar ao mecanismo imediato.

- **Formação de NO a partir de N₂O**

N₂O intermediário formado na zona de combustão é convertido para NO a partir de sua reação com radicais H e O:



Este mecanismo pode ser o principal responsável pela formação de NO em baixas temperaturas.

A presença de NO_x na atmosfera leva a formação de chuva ácida assim como *smog* fotoquímico, névoa marrom amarelada típica de grandes centros urbanos, resultante da ação da luz solar e poluentes atmosféricos e constituída de NO_x, ozônio,

componentes orgânicos voláteis, SO_2 , aerossóis de material particulado (CARVALHO, LACAVA, 2003). *Smog* é prejudicial para pessoas, animais e plantas.

1.5.3 Emissões de CO_2

CO_2 é um gás sem cor, sem odor e inerte encontrado naturalmente na atmosfera em concentrações de 0,03% ou 300ppm, (BAUKAL 1998). É formado a partir de processos biológicos e de queima de combustível contendo carbono. Sua concentração tem aumentado nos últimos anos devido a queima de combustíveis fósseis (petróleo processado que mantinha uma grande quantidade de carbono aprisionado), essenciais para o fornecimento de energia. Estas quantidades são demasiadas para o meio ambiente possa absorver naturalmente. Como este gás absorve radiação infravermelha e é largamente emitido, tem contribuído grandemente com o aquecimento do ambiente em todo o globo. A oxi-combustão pode reduzir de forma significativa as emissões de CO_2 , uma vez que aumenta a eficiência do processo combustivo levando a uma economia de consumo de combustível. Ainda, após a remoção do vapor de água, os gases remanescentes como o CO_2 são capturados e podem ser comprimidos. SO_2 e NO_x são também liquefeitos, não havendo necessidade de desulfurização, enquanto que os demais gases são separados por processo *Flash* e liberados na atmosfera. SO_2 e NO_x também podem ser lavados com solução aquosa contendo peróxido de hidrogênio para formar H_2SO_4 e HNO_3 que podem ser reutilizados ou separados (LIÉMANS, ALBAN, TRANIER E DIANE, 2011). Os gases capturados também podem ser transportados para estocagem em aquíferos salinos profundos. O potencial de estocagem de CO_2 estimado em aquíferos é da ordem de 100 a 10000 Gt (NORMANN, 2009).

1.6 VANTAGENS DA OXI-COMBUSTÃO

A queima utilizando oxigênio puro possui uma série de vantagens em relação a queima com ar (apenas 21% do ar que é constituído de O_2 é realmente utilizado na

combustão), como por exemplo o aumento da produtividade devido ao aumento da temperatura de chama que por consequência aumenta a radiação para a câmara. Mais material pode ser processado em um sistema existente ou um novo sistema pode ser implementado de forma reduzida, fator importante em plantas onde o espaço é limitante e ainda representa uma redução de custos em sua fabricação.

A eliminação do N_2 do comburente também acarreta na diminuição do volume dos gases de exaustão, possibilitando a redução dos dutos de saída. Há ainda o aumento da eficiência do tratamento destes gases, pois os poluentes são gerados em altas concentrações, o que facilita sua remoção (MELO, LACAVA E CARVALHO, 1998).

Porém existe o custo ao se trabalhar com oxigênio puro. Seu uso pode ser validado devido às vantagens energéticas do processo. É possível empregar a oxidação com o mesmo patamar energético da combustão com ar reduzindo-se a quantidade de combustível e comburente que entram no processo. A queima possui uma eficiência energética maior do que uma queima normal e ainda com as vantagens da alta concentração dos poluentes na exaustão, baixa ou nula concentração de nitrogênio.

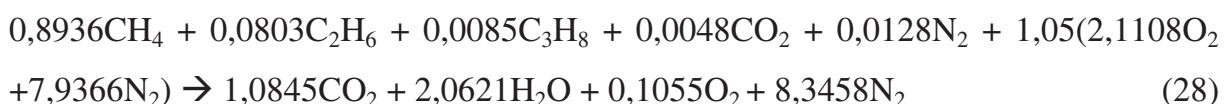
Sem este gás, boa parte do calor permanece na câmara, o que possibilita a redução do uso de combustível e oxigênio. A diminuição dos custos com combustível justifica o uso de oxigênio puro.

2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

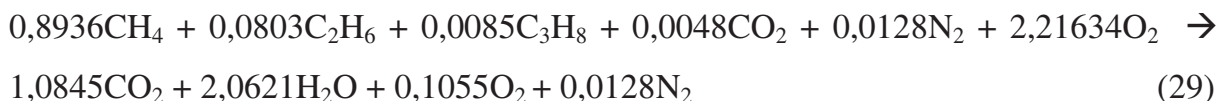
Antes dos testes experimentais, foi feita a simulação do processo descrito acima, empregando como combustíveis o gás natural(89.36%CH₄, 8.03%C₂H₆, 0.85%C₃H₈, 0.48%CO₂, 1.28%N₂, fonte: Comgás) e óleo 2A(C_{7,3612}H_{9,88}N_{0,0437}S_{0,035}) para uma queima com temperatura fixada em 1300°C. Também foi realizado um teste de chama adiabática com diesel para prever e controlar o processo em uma câmara de combustão de 1000L.

Nas simulações foram empregados os programas “Thermochemical Information and Equilibrium Calculations”(TCW) e “Chemical Equilibrium with Applications”(CEA). O output gerado foi tratado no software excel. Todas as simulações foram feitas fixando parâmetros como pressão na câmara a 1atmosfera. Para o teste com temperatura final fixa, foram feitos cálculos com diferentes taxas de recirculação dos gases de exaustão para cada combustível, tendo como ponto de referência as simulações de queima com ar pré aquecido pelos gases de exaustão entrando a 450°C. A partir disto foi feito um comparativo entre a referência e a combustão feita com oxigênio.

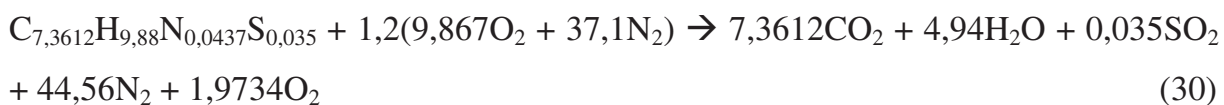
Na simulação com o gás natural foi empregado ar e oxigênio com 5% de excesso. A reação global para queima de 1 mol de gás com ar é:



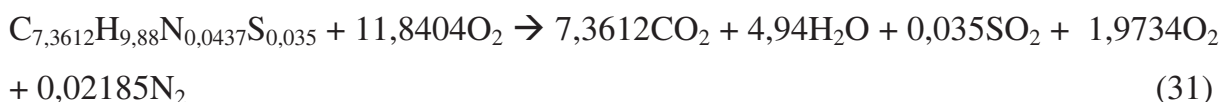
Com oxigênio:



Na simulação com o óleo 2A (PCI = 4019,33kJ/mol) foi empregado ar e oxigênio com 20% de excesso. A reação global para queima de 1 mol de óleo com ar é:



Com oxigênio:



Para o teste com chama adiabática, foi considerada uma perda de 5% para as paredes da câmara no momento do cálculo da entalpia do diesel. Água foi utilizada na simulação como resíduo para controle de temperatura. Toda a simulação foi baseada nos dados obtidos por Lacava (2000) onde a temperatura obtida para queima com ar foi de 1300°C aproximadamente para uma alimentação de 0,003kg/s de diesel e 0,01kg/s de água.

2.1 TESTE PARA T = 1300°C

2.1.1 Queima de Gás Natural com Ar

A seguir serão apresentadas tabelas com resultados para cada situação simulada para o gás natural. Primeiramente será apresentado na tabela 2 os reagentes envolvidos queima em presença de ar que servirá como ponto de referência para os demais cálculos envolvidos na queima com oxigênio puro. Todas as tabelas foram geradas pelo programa TCW.

Tabela 2 – Composição dos reagentes Gás Natural/Ar

Reagentes	Mole.%	Entalpia. kJ/kg mol	Temp.°C	Fase
CH4	8,0123	-74927	25	G
C2H6	0,72	-84581,3	25	G
C3H8	7,62E-02	-103844	25	G
CO2	4,30E-02	-393799	25	G
N2	0,1148	0	25	G
O2	19,872	13269,23	450	G
N2	71,1618	12654,6	450	G

Os compostos marcados em vermelho representam o gás natural a temperatura ambiente enquanto que os compostos em azul representam o ar entrando a 450°C.

Na tabela 3 pode ser visualizada a entalpia da mistura gasosa. A partir destes dados acrescidos dos valores de entalpia dos gases de exaustão apresentados na tabela 4, foi possível calcular o valor de ΔH da reação.

Tabela 3 – Dados da mistura Gás Natural/Ar

Razão Comb/Oxidante (peso)	0,0603
Razão de Equivalencia	0,9525
Razão Comb/Oxidante (molar)	0,0985
Entalpia dos Reagentes(kJ/kg)	171,2401
Entalpia Combustível (kJ/kg)	-4324,55
Entalpia do Oxidante (kJ/kg)	442,9634
Entalpia Reagentes (kJ)	53293,78

Tabela 4 – Dados dos produtos de combustão para a mistura Gás Natural/Ar

Pressão (atm)	1
Temperatura (°C)	1300
Massa esp.(g/ml)	0,000215
Entalpia (kJ/kg)	-1341,87
Entalpia (kJ)	-431647
Entropia (J/g-°C)	9,270413
Cp (J/g-°C)	1,442353
Kg/(kmol de gás)	27,7582
Mol. Peso. de gás	27,7582
d(lnV)/d(lnP)t	-1
d(lnV)/d(lnT)p	1,0005
Razão Cp/Cv	1,2627
Vel. Sônica (m/s)	771,316

Com os dados dos valores de entalpia no inicio e no fim da queima, podemos calcular: $H_p - H_r = -431647 - 53293,78 =$

$$\Delta H = -484940,78 \text{kJ} \quad (32)$$

Este valor será o ponto de referência para os cálculos da razão energética entre a queima com ar e oxigênio. A seguir, a tabela 5 apresenta os gases resultantes da combustão e suas respectivas concentrações expressas em fração molar.

Tabela 5 – Composição da mistura gasosa na exaustão para Gás Natural/Ar

OH(g)	9,1372E-05
H ₂ (g)	9,1518E-06
H ₂ O(g)	0,184
CO(g)	1,3811E-05
CO ₂ (g)	0,0968
NO(g)	0,00036916
N ₂ (g)	0,7095
O ₂ (g)	0,0092257

2.1.2-Queima de Gás Natural com Oxigênio Puro

A queima agora será feita com oxigênio ao invés de ar. A simulação será feita de forma que os gases de exaustão sejam recirculados para diminuir a temperatura da chama. A tabela 6 mostra os reagentes envolvidos no processo de combustão para 3 níveis de recirculação. Os gases de recirculação entram a 1300°C.

Tabela 6 – Composição dos reagentes Gás natural/O₂

Taxa de Recirculação de Exaustão 0%				
Reagentes	Mol %.	Entalpia kJ/kg mol	Temp.°C	Fase
CH ₄	27,7835	-74927	25	G
C ₂ H ₆	2,4967	-84581,3	25	G
C ₃ H ₈	0,2643	-103844	25	G
CO ₂	0,1492	-393799	25	G
N ₂	0,398	0	25	G
O ₂	68,9084	0	25	G

Taxa de Recirculação de Exaustão 10%				
Reagentes	Mol %.	Entalpia kJ/kg mol	Temp.°C	Fase
CH ₄	25,2228	-74927	25	G
C ₂ H ₆	2,2665	-84581,3	25	G
C ₃ H ₈	0,2399	-103844	25	G
CO ₂	0,1355	-393799	25	G
N ₂	0,3613	0	25	G
O ₂	62,5585	0	25	G
CO ₂	3,0611	-327795	1300	G
H ₂ O	5,8205	-190387	1300	G
O ₂	0,2978	43285,65	1300	G
N ₂	0,0361	40979,98	1300	G

Taxa de Recirculação de Exaustão 20%				
Reagentes	Mol %.	Entalpia kJ/kg mol	Temp.°C	Fase
CH ₄	23,0947	-74927	25	G
C ₂ H ₆	2,0753	-84581,3	25	G
C ₃ H ₈	0,2197	-103844	25	G
CO ₂	0,1241	-393799	25	G
N ₂	0,3308	0	25	G
O ₂	57,2794	0	25	G
CO ₂	5,6057	-327795	1300	G
H ₂ O	10,6588	-190387	1300	G
O ₂	0,5453	43285,65	1300	G
N ₂	0,0662	40979,98	1300	G

Dados como a energia do combustível e energia dos gases de exaustão para 3 níveis de recirculação são mostrados nas tabelas 7 e 8 geradas pelo programa TCW (Thermochemical Information and Equilibrium Calculations) respectivamente. A partir destes dados é possível o cálculo da energia que fica dentro da câmara de combustão, mostrado na tabela 9 para cada nível de recirculação.

Tabela 7 – Dados da mistura Gás Natural/O₂

Taxa de Recirculação de Exaustão	0%	10%	20%
Razão Comb/Oxidante (peso)	0,2495	0,2218	0,1996
Razão de Equivalência	0,9525	0,9525	0,9525
Razão Comb/Oxidante (molar)	0,4512	0,3933	0,3485
Entalpia Reagentes (kJ/kg)	-863,318	-1547,44	-2117,26
Entalpia Comb (kJ/kg)	-4324,55	-4324,55	-4324,55
Entalpia Oxidante (kJ/kg)	0	-931,144	-1676,39
Entalpia Reagentes (kJ)	-76466,7	-150767	-225038

Tabela 8 – Dados dos produtos de combustão para a mistura Gás Natural/O₂

Taxa de Recirculação de Exaustão	0%	10%	20%
Pressão (atm)	1	1	1
Temperatura (°C)	1300	1300	1300
Massa esp. (g/ml)	0,0002103	0,00021024	0,00021026
Entalpia (kJ/kg)	-8382,81	-8382,39	-8382,81
Entalpia (kJ)	-742467	-816673	-890961
Entropia (J/g-°C)	10,08349	10,08391	10,08349
Cp (J/g-°C)	1,895783	1,895783	1,895783
Kg/(kmol de gás)	27,1388	27,1389	27,1388
Mol. Peso. de gás	27,1388	27,1389	27,1388
d(lnV)/d(lnP)t	-1	-1	-1
d(lnV)/d(lnT)p	1,0012	1,0012	1,0012
Razão Cp/Cv	1,1934	1,1934	1,1934
Vel. Sônica (m/s)	758,3698	758,4033	758,3699

Com a entalpia no início e fim de cada processo, é possível calcular o calor liberado, e com o valor da entalpia obtida pela queima com ar na equação (32) foi calculado a razão energética entre os dois processos.

Tabela 9 – Entalpia de combustão e razão energética para mistura Gás Natural/O₂

Taxa de Recirculação de Exaustão	0%	10%	20%
ΔH (kJ)	-666001	-665906	-665923
Taxa Air/Ox	0,73	0,73	0,73

Com os dados dos valores de entalpia para os casos de queima de gás natural com ar e com oxigênio, pode ser calculado a razão energética entre os processos.

Assim é possível saber até que ponto o combustível e o oxigênio podem ser economizados, porém mantendo o mesmo nível energético de uma combustão com ar dentro da câmara de combustão. Os resultados estão na tabela 9.

Como pode ser visto, para o gás natural é possível uma redução no consumo de combustível e oxigênio de até no máximo 27%, independente de sua taxa de recirculação, mantendo o calor equivalente a queima do mesmo combustível com ar, exemplificado na figura 10. Acima desta porcentagem, o calor dentro da câmara passa a ser inferior à queima com ar, como observado na tabela 10. Com 30% de economia de combustível não é possível manter o nível que se tem em uma queima normal. Os produtos de combustão e suas concentrações são mostrados na tabela 11.

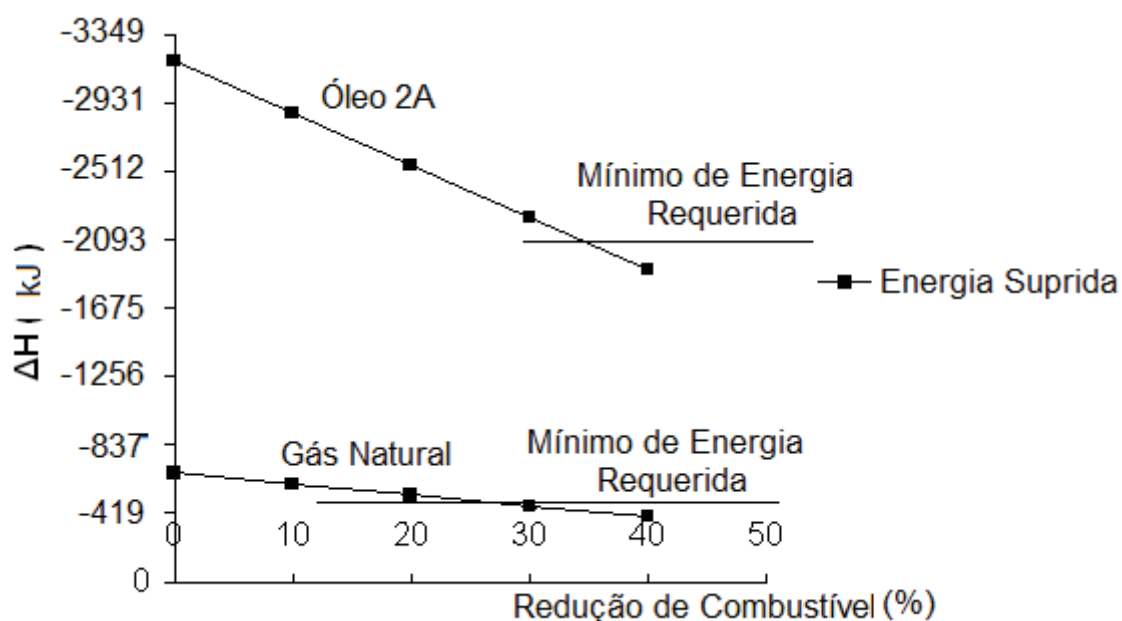


Figura 10 – Taxa de redução do consumo das misturas Gás Natural/Ox e Óleo 2A/Ox.

Tabela 10 – Energia fornecida em uma mistura Gás Natural/O₂ com redução no consumo de 30%

Taxa de Recirculação de Exaustão	30%
Razão Comb/Oxidante (peso)	0,1815
Razão de Equivalência	0,9525
Razão Comb/Oxidante (molar)	0,3129
Entalpia Reagentes (kJ/kg)	-2599,17
Entalpia Comb (kJ/kg)	-4324,55
Entalpia Oxidante (kJ/kg)	-2285,99
Entalpia Reagentes (kJ)	-209495
ΔH (kJ) oxigenio	-466116
ΔH (kJ) ar	-484915
Taxa Air/Ox	-

Tabela 11 – Composição da mistura gasosa na exaustão para Gás Natural/O₂

OH(g)	2,31E-04
H ₂ (g)	1,68E-05
H ₂ O(g)	0,6314
CO(g)	2,53E-05
CO ₂ (g)	0,3321
NO(g)	5,11E-05
N ₂ (g)	3,89E-03
O ₂ (g)	3,23E-02

Pode-se observar a formação de NO_x devido a presença de nitrogênio no combustível. Como as temperaturas do processo são altas, é natural que se forme NO_x, como descrito acima.

2.1.3 Cálculo do Tempo de Residência para o Gás Natural

O tempo de residência para a combustão com oxigênio será calculado em relação ao tempo de residência para combustão com ar. A partir da equação (33) a seguir, é obtida a relação entre os tempos de residência para os dois tipos de queima mostrada na equação (34):

$$t_R = \frac{VPM}{RTm} \quad (33)$$

onde V = volume, P = pressão, M = massa molar, R = constante universal dos gases, T = temperatura, \dot{m} = fluxo de massa. Todas as variáveis estão relacionadas com os gases produzidos pela queima de combustível. Para a equação (34), têm-se:

$$\frac{t_{R,O_2}}{t_{R,Ar}} = \frac{\dot{m}_{Ar} \overline{M}_{O_2}}{\dot{m}_{O_2} \overline{M}_{Ar} (1 + X)} \quad (34)$$

onde \dot{m}_{Ar} , \dot{m}_{O_2} , \overline{M}_{Ar} e \overline{M}_{O_2} são os fluxos mássicos e as massa molares dos produtos da queima de ar e oxigênio respectivamente e X é a taxa de recirculação de gases de exaustão. Então para cada taxa de recirculação é possível calcular o tempo de residência relativo, como é mostrado na figura 11.

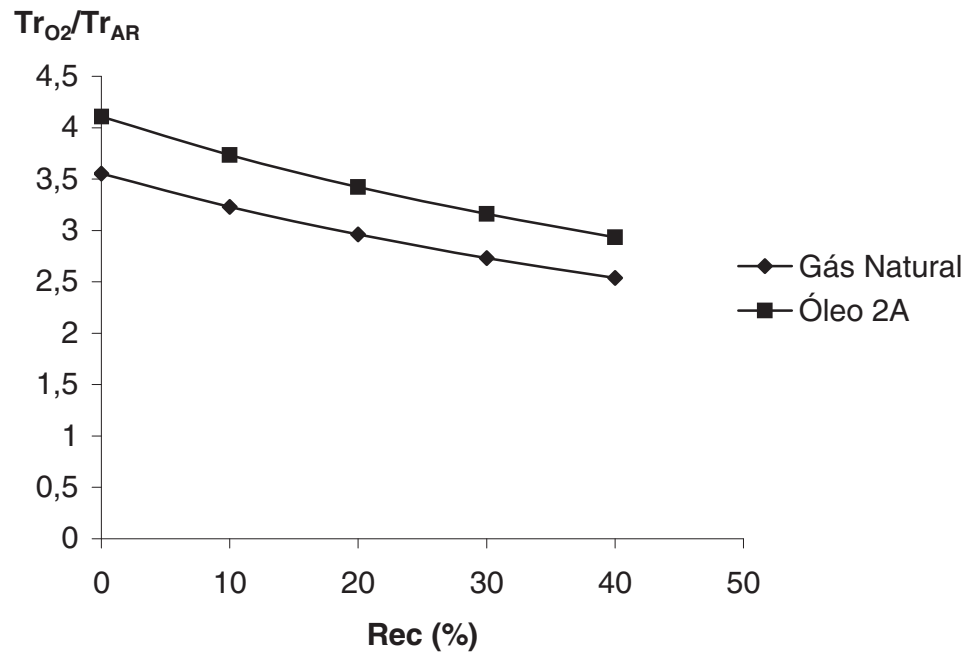


Figura 11 – Tempo de residência relativo para Gás Natural e Óleo 2A.

2.1.4 Queima de Óleo 2a com Ar

O mesmo procedimento será feito para o óleo 2A, portanto primeiramente será apresentada a simulação da queima deste combustível com ar, que servirá como ponto de referência no cálculo da taxa de redução de consumo de reagentes. A tabela 12

mostra composição do óleo 2A e demais reagentes e seus valores de entalpia e temperatura.

Tabela 12 – Composição dos reagentes Óleo 2A/Ar

Reagentes	Mols %	Entalpia kJ/kg mol	Temp.°C	Fase
C7.36H9.88N0.0437S0.03	1,7434	-85163,7	25	L
O2	20,6421	13269,23	450	G
N2	77,6145	12654,6	450	G

Na tabela 13 pode ser visualizada a entalpia da mistura gasosa. A partir destes dados acrescidos dos valores de entalpia dos gases de exaustão apresentados na tabela 14, foi possível calcular o valor de ΔH da reação de combustão do óleo com a ar.

Tabela 13 – Dados da mistura Óleo 2A/Ar

Razão Comb/Oxidante (peso)	0,0616
Razão de Equivalência	0,8333
Razão Comb/Oxidante (molar)	0,0177
Entalpia Reagentes (kJ/kg)	368,0197
Entalpia Comb (kJ/kg)	-850,758
Entalpia Oxidante (kJ/kg)	442,9634
Entalpia Reagentes (kJ)	635053,8

Tabela 14 – Dados dos produtos de combustão para a mistura Óleo 2A/Ar

Pressão (atm)	1
Temperatura (°C)	1300
Massa esp. (g/ml)	0,000227
Entalpia (kJ/kg)	-837,779
Entalpia (kJ)	-1440259
Entropia (J/g-K)	8,800654
Cp (J/g-K)	1,349824
Kg/(kmol de gás)	29,33
Mol. Peso. de gás	29,33
$d(\ln V)/d(\ln P)_t$	-1
$d(\ln V)/d(\ln T)_p$	1,0004
Razão Cp/Cv	1,2664
Vel. Sônica (m/s)	751,46

$$\text{Então temos: } H_p - H_r = -1440259 - 635053,8 =$$

$$\Delta H = -2075312,8 \text{ kJ} \quad (35)$$

Este valor será usado para o cálculo da razão entre as entalpias de queima do óleo 2A com ar e oxigênio. Os produtos de combustão e suas concentrações são mostrados na tabela 15.

Tabela 15 – Composição da mistura gasosa na exaustão para Óleo 2A/Ar

OH(g)	8,49E-05
H ₂ O(g)	8,39E-02
CO(g)	9,41E-06
CO ₂ (g)	0,1251
NO(g)	7,23E-04
N ₂ (g)	0,7565
O ₂ (g)	3,32E-02
SO ₂ (g)	5,92E-04

O óleo 2A também possui em sua composição a presença de nitrogênio, portanto mesmo para processos de queima com oxigênio puro, haverá a formação de NO_x.

2.1.5 Queima de Óleo 2A com Oxigênio Puro

A queima do óleo 2A com oxigênio será feita da mesma forma como foi feita para o gás natural. Como mostrado na tabela 16, a simulação será feita para 3 níveis de recirculação, 0%, 10% e 20%.

Tabela 16 – Composição dos reagentes Óleo 2A/O₂

Taxa de Recirculação de Exaustão 0%				
Reagentes	Mols %	Entalpia kJ/kg mol	Temp.°C	Fase
C7.36H9.88N0.0437S0.03	7,7879	-85163,7	25	L
O2	92,2121	0	25	G
Taxa de Recirculação de Exaustão 10%				
Reagentes	Mols %	Entalpia kJ/kg mol	Temp.°C	Fase
C7.36H9.88N0.0437S0.03	7,007	-85163,7	25	L
O2	82,9662	0	25	G
CO2	5,158	-327804	1300	G
H2O	3,4615	-190394	1300	G
SO2	2,45E-02	-230473	1300	G
O2	1,3828	43280,21	1300	G

Tabela 16 – Composição dos reagentes Óleo 2A/O₂

Taxa de Recirculação de Exaustão 20%				
Reagentes	Mols %	Entalpia kJ/kg mol	Temp.°C	Fase
C7.36H9.88N0.0437S0.03	6,3685	-85163,7	25	L
O2	75,4054	0	25	G
CO2	9,3759	-327804	1300	G
H2O	6,2921	-190394	1300	G
SO2	4,46E-02	-230473	1300	G
O2	2,5135	43280,21	1300	G

Os valores de entalpia dos reagentes e dos produtos de exaustão são mostrados nas tabelas 17 e 18 respectivamente. Com os dados é possível calcular o valor de ΔH da reação, mostrado na tabela 19.

Tabela 17 – Dados da mistura Óleo 2A/O₂

Taxa de Recirculação de Exaustão	0%	10%	20%
Razão Comb/Oxidante (peso)	0,2642	0,2346	0,211
Razão de Equivalência	0,8333	0,8333	0,8333
Razão Comb/Oxidante (molar)	8,45E-02	0,0754	0,068
Entalpia Reagentes (kJ/kg)	-177,939	-783,35	-1288,278
Entalpia Comb (kJ/kg)	-850,758	-850,758	-850,758
Entalpia Oxidante (kJ/kg)	0	-767,859	-1380,81
Entalpia Reagentes (kJ)	-85153,65	-412600,8	-740158,41

Tabela 18 – Propriedades de equilíbrio da mistura gasosa de exaustão da combustão Óleo/2A

Taxa de Recirculação de Exaustão	0%	10%	20%
Pressão (atm)	1	1	1
Temperatura (°C)	1300	1300	1300
Dens. (g/ml)	0,000259	0,000259	0,000259
Entalpia (kJ/kg)	-6836,626	-6837,463	-6838,3
Entalpia (kJ)	-3269284	-3596653,79	-3924103,42
Entropia (J/g-°C)	8,500879	8,50046	8,500041
Cp (J/g-°C)	1,565863	1,565863	1,565863
Kg/(kmol de gás)	33,4181	33,4188	33,4195
Mol. Peso. de gás	33,4181	33,4188	33,4195
d(lnV)/d(lnP)t	-1	-1	-1
d(lnV)/d(lnT)p	1,0011	1,0011	1,0011
Razão Cp/Cv	1,1895	1,1895	1,1895
Vel. Sônica (m/s)	682,3	682,3	682,3

Da mesma forma que foi feita para o gás natural, a tabela 19 a seguir apresenta a razão energética entre a queima com ar e com oxigênio, calculada a partir dos dados de entalpia de ambos processos mostrados acima.

Tabela 19 - ΔH e razão ar/oxigênio para a combustão do óleo 2A para níveis de recirculação 0%, 10% e 20%

Taxa de Recirculação de Exaustão	0%	10%	20%
ΔH (kJ)	-3184133	-3184053	-3183944
Taxa Air/Ox	0,65	0,65	0,65

De forma semelhante como foi observado para o gás natural, o consumo de óleo 2A e oxigênio pode ser reduzido em até no máximo 35%, de acordo com os valores da razão de queima Ar/Ox apresentados na tabela 19 e mantendo os mesmos níveis energéticos presentes em uma queima normal com ar. A redução no consumo de reagentes é mostrado na figura 10 da página 46. Acima de 35% não é possível manter o calor dentro da câmara no mesmo nível de uma queima normal, como visto na tabela 20 com taxa de redução de óleo de 40%. Os produtos formados na reação estão expostos na tabela 21.

Tabela 20 – Taxa de redução de combustível 40%.

Redução na Taxa comb.	40%
Razão Comb/Oxidante (peso)	0,1756
Razão de Equivalência	0,8333
Razão Comb/Oxidante (molar)	0,0569
Entalpia Reagentes (kJ/kg)	-2082,1
Entalpia Comb (kJ/kg)	-850,76
Entalpia Oxidante (kJ/kg)	-2298,13
Entalpia Reagentes (kJ)	-837218
ΔH (kJ) oxigenio	-1910156
ΔH (kJ) ar	-2075351
Taxa Air/Ox	-

Tabela 21 – Produtos da combustão da mistura Óleo 2A/Ox

OH(g)	0,000246
H ₂ O(g)	0,3445
CO(g)	1,9E-05
CO ₂ (g)	0,5136
NO(g)	6,54E-05
N ₂ (g)	0,001492
O ₂ (g)	0,1376
SO ₂ (g)	0,002418
SO ₃ (g)	2,37E-05

Além da presença de nitrogênio, têm-se também enxofre na composição do óleo 2A, o que explica as altas concentrações de SO_x na exaustão dos gases.

2.1.6 Cálculo do Tempo de Residência

O mesmo procedimento para o cálculo do tempo de residência feito para o gás natural será feito para o óleo combustível, utilizando para isto a equação (2) descrita acima. Os resultados foram mostrados na figura 11.

2.2 SIMULAÇÃO PARA CHAMA ADIABÁTICA

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos pela simulação de um processo de combustão de diesel e GLP em uma câmara de 1m^3 para chama adiabática. Para o cálculo da entalpia dos combustíveis, foi considerada uma perda de 5% do calor para a parede refratária, mostrado na tabela 22 a seguir. Como resíduo a ser queimado, foi levado em consideração a água, que também atua como agente de resfriamento no caso do diesel, enquanto que para o GLP foi considerado apenas a água circulando nas paredes da câmara. Dados como alimentação de diesel, do ar, oxigênio e resíduo foram obtidos dos experimentos realizados por Lacava (2000).

Foram feitos dois testes para o diesel, um com a concentração de oxigênio fixa e estequiométrica de valor $0,37\text{mol/s}$ e o outro com sua concentração variando entre $0,4\text{mol/s}$ a $0,2\text{mol/s}$ e testes com

2.2.1 Teste com Alimentação de Oxigênio Fixa para Diesel

A tabela 22 abaixo foi gerada variando a alimentação do diesel entre $0,0176\text{mol/s}$ ($0,003\text{kg/s}$) a $0,005\text{mol/s}$ (aproximadamente $0,001\text{kg/s}$). A concentração de diesel $0,00176$ é a mesma utilizada por Lacava (2000), uma vez que a simulação foi feita tendo como base a câmara utilizada em seu experimento. Como já dito acima, o resíduo simulado foi água em várias vazões.

Tabela 22 – Temperaturas obtidas com 0,374mol/s de oxigênio.

Diesel (mol)	residuo(kg/s)	residuo(mols)	temp(°C)
0,0176	0,020	1,11	1209
	0,015	0,833	1583
	0,010	0,556	2014
	0,005	0,278	2391
	0,003	0,167	2536
0,015	0,020	1,11	976
	0,015	0,833	1337
	0,010	0,556	1817
	0,005	0,278	2301
	0,003	0,167	2471
0,01	0,020	1,11	448
	0,015	0,833	767
	0,010	0,556	1217
	0,005	0,278	1895
	0,003	0,167	2194
0,005	0,020	1,11	90
	0,015	0,833	91
	0,010	0,556	377
	0,005	0,278	961
	0,003	0,167	1323

Para melhor interpretação dos dados obtidos, foi gerado o gráfico da figura 12. Neste gráfico também foram geradas as curvas de tendência para cada caso de variação na concentração de combustível.

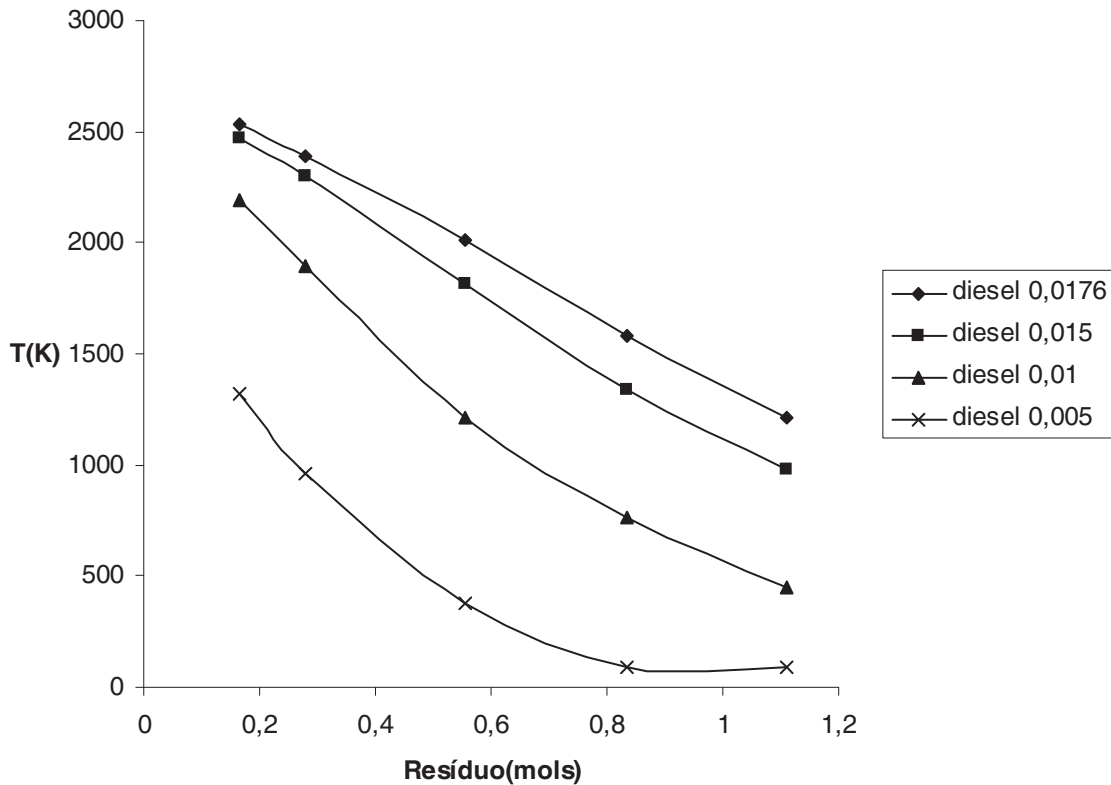


Figura 12 – Comportamento da temperatura interna da câmara para diferentes concentrações de diesel e taxa de alimentação de oxigênio constante.

Para cada concentração de diesel, têm-se uma equação que descreve aproximadamente o comportamento da temperatura:

$$\text{Para diesel a } 0,0176 \text{ mol/s (0,003 kg/s)} \rightarrow T(\text{K}) = -1418,4C + 3055,3 \quad (36)$$

$$\text{Para diesel a } 0,015 \text{ mol/s} \rightarrow T(\text{K}) = -1616,2C + 3005,3 \quad (37)$$

$$\text{Para diesel a } 0,01 \text{ mol/s} \rightarrow T(\text{K}) = 1141C^2 - 3304,7C + 2988,8 \quad (38)$$

$$\text{Para diesel a } 0,005 \text{ mol/s} \rightarrow T(\text{K}) = 2000,6C^2 - 3841,6C + 2166,2 \quad (39)$$

onde T é a temperatura da câmara e C a concentração de resíduo em mols.

Como pode ser observado, o comportamento das curvas para concentrações altas de diesel tende a uma linear enquanto para concentrações menores o comportamento é polinomial. Através delas, pode-se prever a quantidade de resíduo a ser queimado para controlar a temperatura da câmara para um valor desejado. Por exemplo, para uma alimentação de 0,003 kg/s de diesel e temperatura desejada de 1200°C (1473K), é calculado o valor de 1,11 mol/s (0,020 kg/s) de resíduo.

2.2.2 Teste com Alimentação Variável de Oxigênio para Diesel

Esta simulação se assemelha a anterior, porém a alimentação de oxigênio agora varia com o intuito de se obter leituras de temperatura em diversas condições de mistura. A simulação foi feita da seguinte forma: As concentrações de diesel usadas foram de 0,0176; 0,015 e 0,01mol/s. Para o oxigênio as concentrações variam entre 0,4mol/s (0,013kg/s) a 0,2mol/s (0,0064kg/s), indo de uma combustão rica, passando por razões estequiométricas até misturas pobres. As variações para a concentração de resíduo permanecem iguais ao teste anterior. A seguir serão apresentadas uma seqüência de tabelas de 23 a 31 com resultados obtidos nas situações descritas anteriormente, bem como as curvas obtidas para cada caso.

Tabela 23 – Perfil de temperaturas para diesel 0,0176mol/s e resíduo a 0,02 kg/s

Diesel (mols)	resíduo(kg/s)	Oxigênio (mols)	Temperatura (°C)
0,0176	0,020	0,4	1195
		0,39	1200
		0,38	1205
		0,37	1210
		0,36	1215
		0,35	1221
		0,34	1226
		0,33	1231
		0,32	1199
		0,31	1134
		0,3	1069
		0,29	1002
		0,28	935
		0,27	866
		0,26	796
		0,25	725
		0,24	652
0,23	578		
0,22	506		
0,21	454		
0,2	416		

Tabela 24 – Perfil de temperaturas para diesel 0,0176mol/s e resíduo a 0,015 kg/s

Diesel (mols)	resíduo(kg/s)	Oxigênio	
		(mols)	Temperatura (°C)
0,0176	0,015	0,4	1564
		0,39	1572
		0,38	1579
		0,37	1586
		0,36	1594
		0,35	1601
		0,34	1608
		0,33	1612
		0,32	1587
		0,31	1519
		0,3	1446
		0,29	1371
		0,28	1295
		0,27	1218
		0,26	1139
		0,25	1059
		0,24	978
		0,23	895
0,22	810		
0,21	724		
0,2	637		

Tabela 25 – Perfil de temperaturas para diesel 0,0176mol/s e resíduo a 0,01 kg/s

Diesel (mols)	resíduo(kg/s)	Oxigênio	
		(mols)	Temperatura (°C)
0,0176	0,010	0,4	2000
		0,39	2006
		0,38	2012
		0,37	2017
		0,36	2021
		0,35	2024
		0,34	2024
		0,33	2021
		0,32	2011
		0,31	1989
		0,3	1947
		0,29	1884
		0,28	1807
		0,27	1721
		0,26	1631
		0,25	1538
		0,24	1442
		0,23	1344
0,22	1244		
0,21	1142		
0,2	1038		

Tabela 26 – Perfil de temperaturas para diesel 0,015mol/s e resíduo a 0,02 kg/s

Diesel (mols)	resíduo(kg/s)	Oxigênio	
		(mols)	Temperatura (°C)
0,015	0,020	0,4	963
		0,39	968
		0,38	972
		0,37	976
		0,36	981
		0,35	985
		0,34	990
		0,33	994
		0,32	999
		0,31	1004
		0,3	1008
		0,29	1013
		0,28	1018
		0,27	967
		0,26	896
		0,25	823
		0,24	749
		0,23	673
0,22	595		
0,21	516		
0,2	446		

Tabela 27 – Perfil de temperaturas para diesel 0,015mol/s e resíduo a 0,015 kg/s

Diesel (mols)	resíduo(kg/s)	Oxigênio	
		(mols)	Temperatura (°C)
0,015	0,015	0,4	1319
		0,39	1326
		0,38	1332
		0,37	1339
		0,36	1346
		0,35	1353
		0,34	1361
		0,33	1368
		0,32	1375
		0,31	1383
		0,3	1390
		0,29	1398
		0,28	1404
		0,27	1350
		0,26	1270
		0,25	1189
		0,24	1105
		0,23	1021
0,22	934		
0,21	846		
0,2	755		

Tabela 28 - Perfil de temperaturas para diesel 0,015mol/s e resíduo a 0,01 kg/s

Diesel (mols)	resíduo(kg/s)	Oxigênio	
		(mols)	Temperatura (°C)
0,015	0,010	0,4	1792
		0,39	1803
		0,38	1812
		0,37	1822
		0,36	1831
		0,35	1841
		0,34	1850
		0,33	1859
		0,32	1867
		0,31	1875
		0,3	1881
		0,29	1884
		0,28	1881
		0,27	1860
		0,26	1801
		0,25	1716
		0,24	1621
		0,23	1522
0,22	1421		
0,21	1316		
0,2	1209		

Tabela 29 - Perfil de temperaturas para diesel 0,01mol/s e resíduo a 0,02 kg/s

Diesel (mols)	resíduo(kg/s)	Oxigênio	
		(mols)	Temperatura (°C)
0,01	0,020	0,4	442
		0,39	444
		0,38	447
		0,37	448
		0,36	451
		0,35	453
		0,34	455
		0,33	457
		0,32	459
		0,31	462
		0,3	464
		0,29	467
		0,28	469
		0,27	472
		0,26	474
		0,25	477
		0,24	479
		0,23	482
0,22	484		
0,21	487		
0,2	490		

Tabela 30 - Perfil de temperaturas para diesel 0,01 mol/s e resíduo a 0,015 kg/s

Diesel (mols)	resíduo(kg/s)	Oxigênio	
		(mols)	Temperatura (°C)
0,01	0,015	0,4	756
		0,39	760
		0,38	765
		0,37	769
		0,36	774
		0,35	778
		0,34	783
		0,33	788
		0,32	792
		0,31	797
		0,3	802
		0,29	807
		0,28	812
		0,27	817
		0,26	822
		0,25	828
		0,24	833
		0,23	838
0,22	844		
0,21	850		
0,2	855		

Tabela 31 - Perfil de temperaturas para diesel 0,01 mol/s e resíduo a 0,01 kg/s

Diesel (mols)	resíduo(kg/s)	Oxigênio	
		(mols)	Temperatura (°C)
0,01	0,010	0,4	1195
		0,39	1203
		0,38	1212
		0,37	1220
		0,36	1229
		0,35	1238
		0,34	1247
		0,33	1256
		0,32	1266
		0,31	1275
		0,3	1285
		0,29	1294
		0,28	1304
		0,27	1314
		0,26	1324
		0,25	1335
		0,24	1345
		0,23	1356
0,22	1367		
0,21	1378		
0,2	1389		

Através destes perfis foram obtidos as figuras 13, 14 e 15 que representam cada caso:

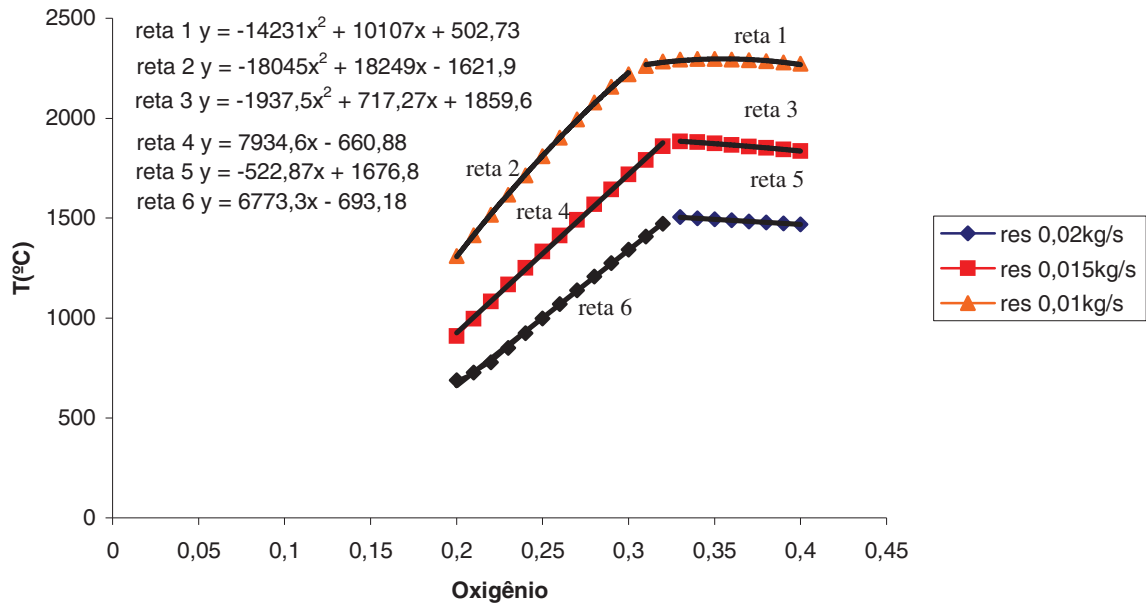


Figura 13 – Perfis de temperatura em uma reação de combustão com diesel a $0,0176 \text{ mol/s}$ ($0,003 \text{ kg/s}$) para alimentação de resíduo a $0,02$; $0,015$ e $0,01 \text{ kg/s}$.

Como pode ser visto, na região de combustão pobre as temperaturas são consideravelmente baixas, a partir de uma combustão rica temos um leve aumento na temperatura a medida que a mistura se aproxima das proporções estequiométricas.

Para melhor entendimento do processo os gráficos foram divididos em duas partes, onde cada parte é descrita por uma equação. Com isto é possível prever teoricamente a temperatura de combustão para uma dada razão oxigênio/combustível, assim então se torna possível a obtenção da temperatura desejada na câmara.

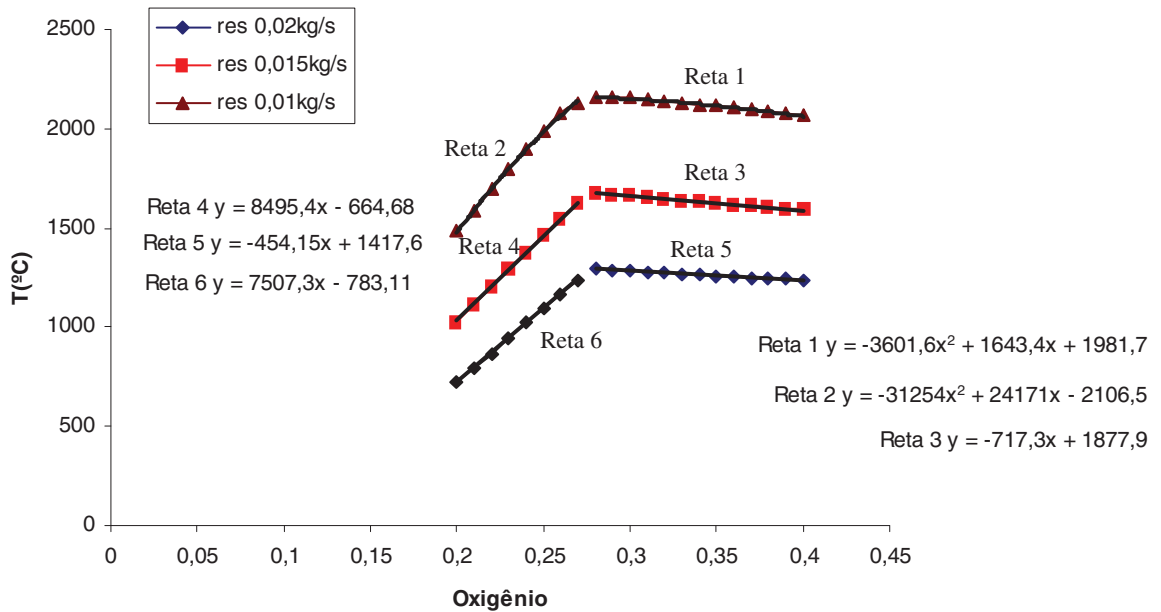


Figura 14 – Perfis de temperatura em uma reação de combustão com diesel a 0,015 mol/s (0,0255 kg/s) para alimentação de resíduo a 0,02; 0,015 e 0,01 kg/s.

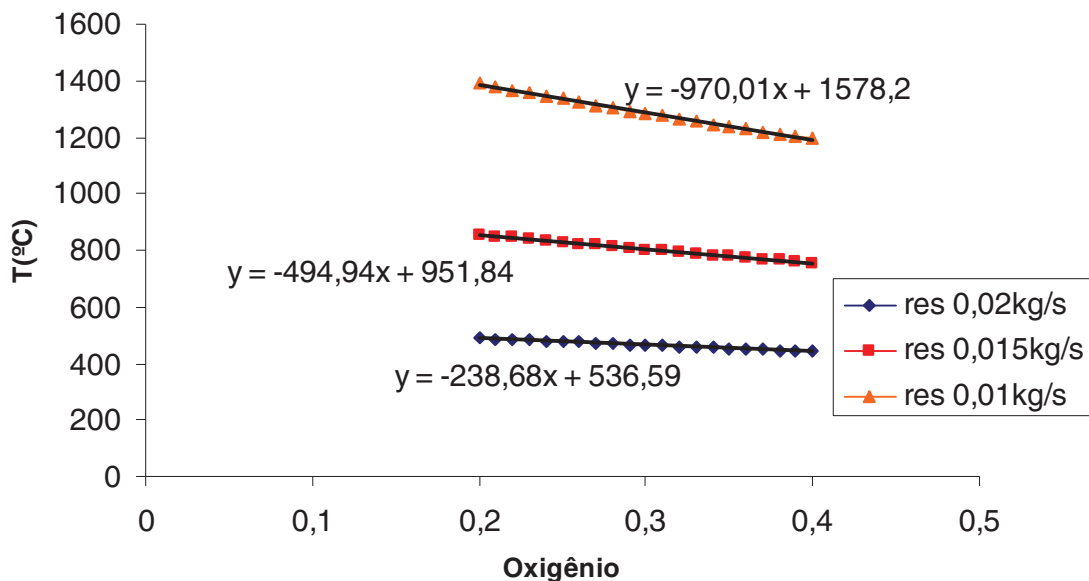


Figura 15 – Perfis de temperatura em uma reação de combustão com diesel a 0,01 mol/s (0,017 kg/s) para alimentação de resíduo a 0,02; 0,015 e 0,01 kg/s.

O comportamento das retas na figura 15 é diferente das demais figuras pelo fato de nunca atingirem a razão estequiométrica, ou seja, a mistura neste caso sempre é rica. O diesel fornecido é insuficiente para atingir a zona de combustão pobre para as concentrações de oxigênio usadas.

A medida que a concentração de diesel diminui e a de oxigênio permanece a mesma, a tendência observada é de um aumento na região de combustão rica, além da diminuição de temperatura. O ideal é trabalhar em faixas onde a concentração de

diesel seja suficiente para manter a temperatura na câmara semelhante à encontrada em processos combustivos convencionais, e em geral essa temperatura é encontrada em zonas de combustão pobre. A partir destes dados, é possível ter uma estimativa do comportamento experimental da combustão na câmara. Foi observado que para todas as simulações que atingiram a temperatura de 1200°C a razão oxigênio\combustível foi maior ou igual a 10.

2.2.3 Teste com GLP

Os testes com GLP foram realizados com o intuito de serem aplicados experimentalmente. Não foi feita recirculação de gases de exaustão e sem entrada de resíduo aquoso. Foi simulado o enriquecimento gradativo do ar a temperatura ambiente até atingir 100% de oxigênio na linha. Para a simulação foi usado o programa CEA e as concentrações para queima com ar mostradas na equação 45.

Na tabela 32 têm-se a queima com ar:

Tabela 32 – Condições de equilíbrio para queima com ar

PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS	
P, BAR	1,0132
T, °C	1891
RHO, KG/CU M	1,60E-01
H, KJ/KG	-148,83
U, KJ/KG	-782,59
G, KJ/KG	-20781,4
S, KJ/(KG)(K)	9,5365
FRAÇÕES MOLARES	
CO	0,00308
CO2	0,10407
H	0,00013
H2	0,00077
H2O	0,13366
NO	0,0038
N2	0,72645
O	0,00033
OH	0,00324
O2	0,02446

Para 20% de enriquecimento, têm-se a tabela 33 usando as concentrações da equação 46:

Tabela 33 – Condições de equilíbrio para enriquecimento de 20%

PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS	
P, BAR	1,0132
T, °C	2067
RHO, KG/CU M	1,47E-01
H, KJ/KG	-173,62
U, KJ/KG	-861,28
G, KJ/KG	-23006,6
S, KJ/(KG)(K)	9,7564
FRAÇÕES MOLARES	
*CO	0,00975
*CO2	0,11489
*H	0,00056
*H2	0,00226
H2O	0,15221
*NO	0,006
*N2	0,67575
*O	0,00108
*OH	0,00715
*O2	0,03034

Comparando os valores de entalpia da queima com ar com a queima enriquecida com 20% de oxigênio, têm-se a razão de entalpia de $-148,83/-173,62 = 0,857$.

Aplicando esta razão ao balanço de massa para o enriquecimento de 20% foi feita uma nova simulação, obtendo assim os seguintes dados na tabela 34:

Tabela 34 – Condições de equilíbrio para enriquecimento de 20% com a razão de entalpia aplicada

PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS	
P, BAR	1,0132
T, K	1887
RHO, KG/CU M	1,63E-01
H, KJ/KG	-166,28
U, KJ/KG	-787,48
G, KJ/KG	-20758,3
S, KJ/(KG)(K)	9,5327
FRAÇÕES MOLARES	
CO	0,00123
CO2	0,10692
H2O	0,13672
NO	0,00851
NO2	0,00001
N2	0,58606
OH	0,00512
O2	0,15423

Como pode ser observado, as temperaturas para queima com ar e com enriquecimento a 20% após aplicada a razão são semelhantes.

Para 40% de enriquecimento sem redução de GLP, têm-se a tabela 35:

Tabela 35 – Condições de equilíbrio para enriquecimento de 40%

PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS	
P, BAR	1,0132
T, °C	2243
RHO, KG/CU M	1,36E-01
H, KJ/KG	-208,63
U, KJ/KG	-954,67
G, KJ/KG	-25479,3
S, KJ/(KG)(K)	10,0455
FRAÇÕES MOLARES	
*CO	0,02437
*CO2	0,12404
H2O	0,00001
*H2	0,0055
H2O	0,1747
*NO	0,0091
*N2	0,6017
*O	0,00314
*OH	0,01465
*O2	0,0408

Aplicando a razão calculada de $-148,83/-208,63 = 0,71$ obtêm-se um novo balanço de massa da equação 47 e os dados obtidos na tabela 36:

Tabela 36 – Condições de equilíbrio para enriquecimento de 40% com a razão de entalpia aplicada

PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS	
P, BAR	1,0132
T, °C	1891
RHO, KG/CU M	1,6566E-1
H, KJ/KG	-191,81
U, KJ/KG	-803,45
G, KJ/KG	-20735,6
S, KJ/(KG)(K)	9,4928
FRAÇÕES MOLARES	
*CO	0,00094
*CO2	0,10885
*H2	0,00024
H2O	0,14153
*NO	0,01021
NO2	0,00002
*N2	0,44256
*OH	0,00619
*O2	0,28824

Para 60% de enriquecimento sem redução de GLP, têm-se os dados obtidos em sua simulação mostrada na tabela 37.

Tabela 37 – Condições de equilíbrio para enriquecimento de 60%

PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS	
P, BAR	1,0132
T, °C	2416
RHO, KG/CU M	1,25E-01
H, KJ/KG	-261,39
U, KJ/KG	-1074,91
G, KJ/KG	-28361,2
S, KJ/(KG)(K)	10,451
FRAÇÕES MOLARES	
*CO	0,05054
*CO2	0,13175
HO2	0,00001
*H2	0,01163
H2O	0,20288
*NO	0,01297
NO2	0,00001
*N2	0,48985
*OH	0,02823
*O2	0,05806

Aplicando a razão calculada de 0,569 e usando as concentrações da equação 48 para uma nova simulação, têm-se a tabela 38:

Tabela 38 – Condições de equilíbrio para enriquecimento de 60% com a razão de entalpia aplicada

PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS	
P, BAR	1,0132
T, °C	1890
RHO, KG/CU M	1,69E-01
H, KJ/KG	-229,68
U, KJ/KG	-830,85
G, KJ/KG	-20607,3
S, KJ/(KG)(K)	9,4198
FRAÇÕES MOLARES	
*CO	0,00078
*CO2	0,11008
HO2	0,00001
*H2	0,0002
H2O	0,14745
*NO	0,01014
NO2	0,00002
*N2	0,29659
*OH	0,00694
*O2	0,42634

Para 100% de oxigênio sem redução de GLP, têm-se a tabela 39 com os dados da simulação:

Tabela 39 – Condições de equilíbrio para oxigênio a 100%

PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS	
P, BAR	1,0132
T, °C	2793
RHO, KG/CU M	9,58E-02
H, KJ/KG	-528,94
U, KJ/KG	-1586,9
G, KJ/KG	-37727
S, KJ/(KG)(K)	12,1321
FRAÇÕES MOLARES	
*CO	0,17003
*CO2	0,15352
HO2	0,00006
*H2	0,04353
H2O	0,29611
*OH	0,10267
*O2	0,14134

Aplicando a razão calculada de 0,28 ao balanço de massa sem redução de GLP, foi possível gerar equação 49 e obter os dados de sua simulação mostrados na tabela 40:

Tabela 40 – Condições de equilíbrio para enriquecimento de 100% com a razão de entalpia aplicada

PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS	
P, BAR	1,0132
T, °C	1881
RHO, KG/CU M	1,74E-01
H, KJ/KG	-418,66
U, KJ/KG	-1001
G, KJ/KG	-20196,3
S, KJ/(KG)(K)	9,1797
FRAÇÕES MOLARES	
*CO	0,00057
*CO2	0,11078
HO2	0,00002
*H2	0,00017
H2O	0,17224
*OH	0,0082
*O2	0,70627

Os dados obtidos nesta simulação serão usados para todos os experimentos. A seguir têm-se a figura 16 que resume os dados mostrados nas tabelas.

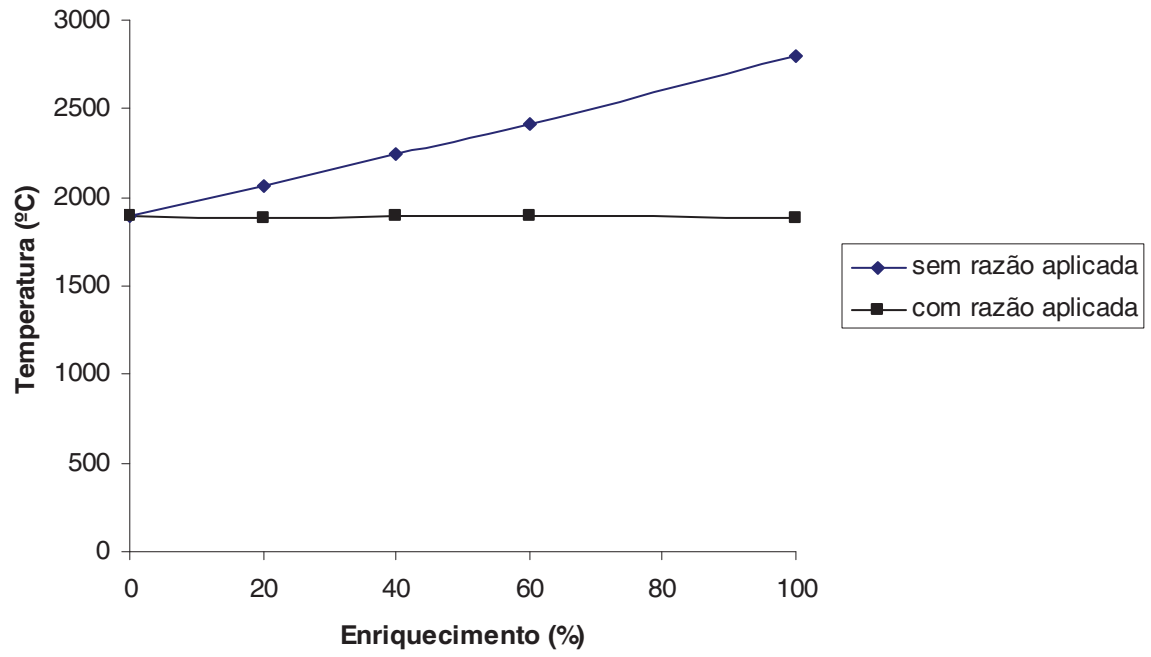


Figura 16 – Comparação entre o enriquecimento sem a razão de entalpia aplicada e enriquecimento com razão de entalpia aplicada.

3 EXPERIMENTOS

3.1 DESCRIÇÃO E MONTAGEM DOS EQUIPAMENTOS

3.1.1 Primeira Montagem

A parte experimental foi realizada nas instalações do Laboratório Associado de Combustão e Propulsão (LCP), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em Cachoeira Paulista, SP. Foi utilizada uma câmara de combustão de paredes frias cujo esquema será ilustrado a seguir. A câmara se encontrava desmontada, havendo então a necessidade de remontá-la e adequá-la para os testes com oxigênio, uma vez que esta foi projetada para operar apenas com ar. Na Figura 17 se observa um diagrama esquemático da câmara e equipamentos utilizados na primeira modificação.

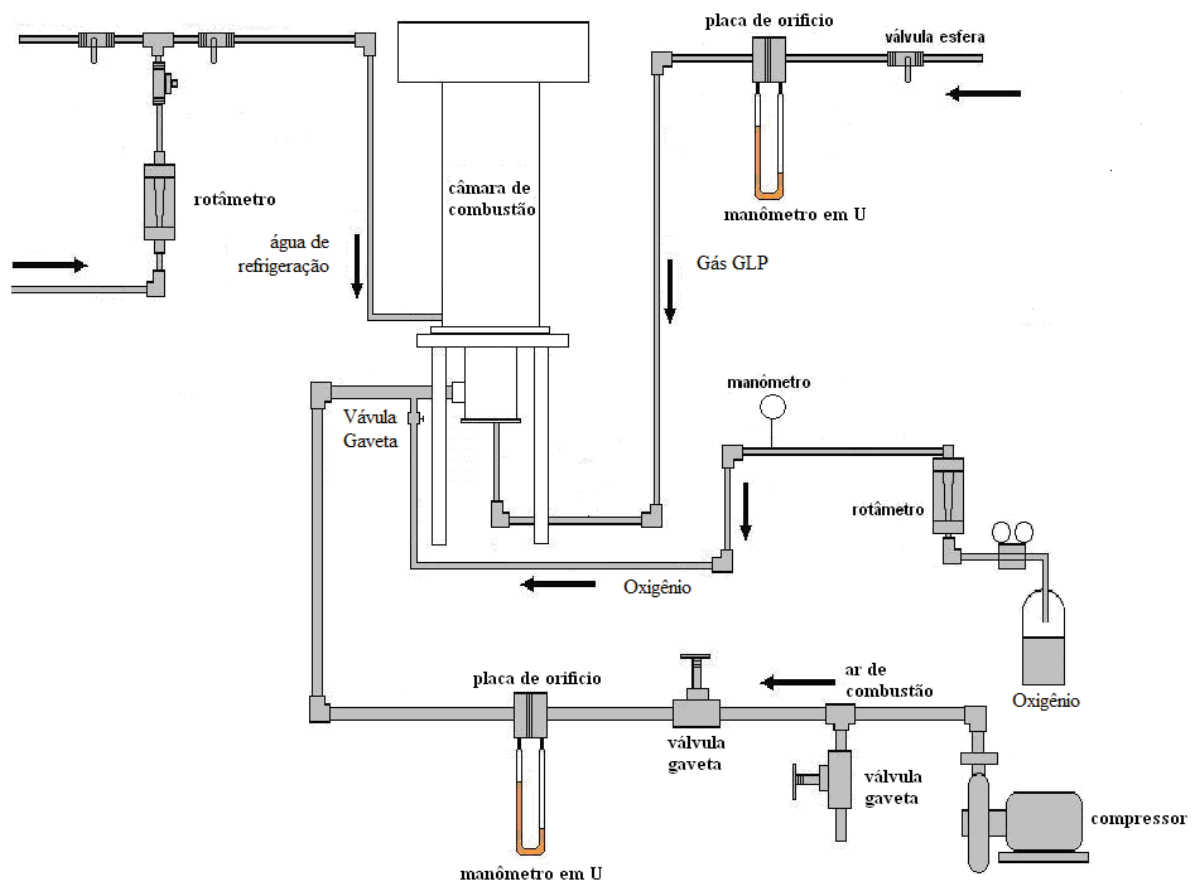


Figura 17 – Primeira montagem realizada na câmara de combustão para queima com oxigênio

A câmara de combustão consta de três partes: a câmara principal, a de desacoplamento e o queimador. A câmara principal, onde se produz a queima, apresenta paredes frias, isto é, as paredes são refrigeradas com água. Ela tem forma cilíndrica e mede 2000 mm de altura e 250 mm de diâmetro, e por sua vez está subdividida em três módulos. Nesta câmara encontram-se instalados 7 termopares chromel-alumel tipo K, 3 para registrar as temperaturas de entrada e saída de água de refrigeração e 4 para medir a temperatura da chama e/ou da câmara de combustão. No primeiro módulo também encontra-se instalado um visor para a inspeção visual da chama. Na figura 18 tem-se a foto da câmara, figura 19 suas dimensões, na figura 20 uma foto de sua montagem e figuras 21 e 22 fotos do primeiro teste.



Figura 18 – Foto da câmara na primeira montagem

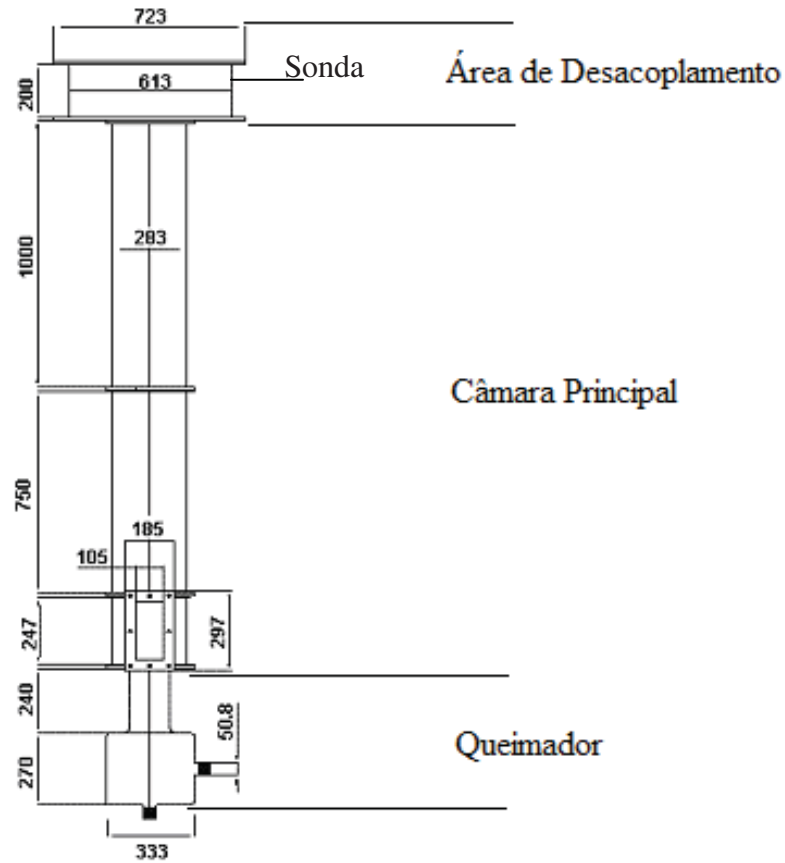


Figura 19 – Dimensões da câmara de combustão na primeira montagem



Figura 20 – Montagem da câmara



Figura 21 – Primeiro teste com ar



Figura 22 – Chama gerada pela queima de GLP com ar

O segmento de desacoplamento encontra-se na parte superior da câmara principal e mede 250 mm de altura e 600 mm de diâmetro, permitindo simular a saída como

sendo livre à atmosfera, o que causou problemas que serão discutidos posteriormente. Na saída da câmara de desacoplamento encontra-se instalada a sonda dos gases de combustão refrigerada a água para evitar que as reações químicas continuem se desenvolvendo na linha de amostragem, o que induziria erros nas leituras. Todos os seguimentos foram selados com juntas de carbono flexível juntamente com silicone de alta temperatura.

O queimador está acoplado na parte inferior da câmara principal. Trate-se do mesmo injetor utilizado por Lacava (2000) e consiste em um tubo de aço inoxidável de 12mm de diâmetro externo e 658mm de comprimento. Em sua extremidade é acoplada um bico injetor de furo único de 2mm. A figura 23 mostra um esquema do queimador.



Figura 23 – Esquema do queimador de GLP

Na parte inferior da câmara principal também se encontra o ancorador de chama, construído e utilizado para a elaboração da dissertação de mestrado de Muniz (1993). O ancorador é do tipo *swirl*, formado por 8 pás de ângulo variável, construídas em aço inoxidável de espessura de 2mm. O diâmetro externo do *swirler* mede 157 mm e o interno 42 mm.

3.1.2 Suprimento de Gás GLP

O gás GLP utilizado para os testes é o mesmo já encontrado nas instalações do INPE de Cachoeira Paulista, da marca Nacional Gás Granel, mostrado na figura 24. A medição da vazão é dada por um medidor de placa de orifício conectado a um manômetro diferencial em U mostrado na figura 25. A faixa de vazão medida com este instrumento depende da pressão diferencial e da relação entre os diâmetros da

tubulação e da placa. O diâmetro do tubo é de 12,7mm e a placa de orifício é de 3,97mm.



Figura 24 – Cilindros de GLP da National Gás Granel

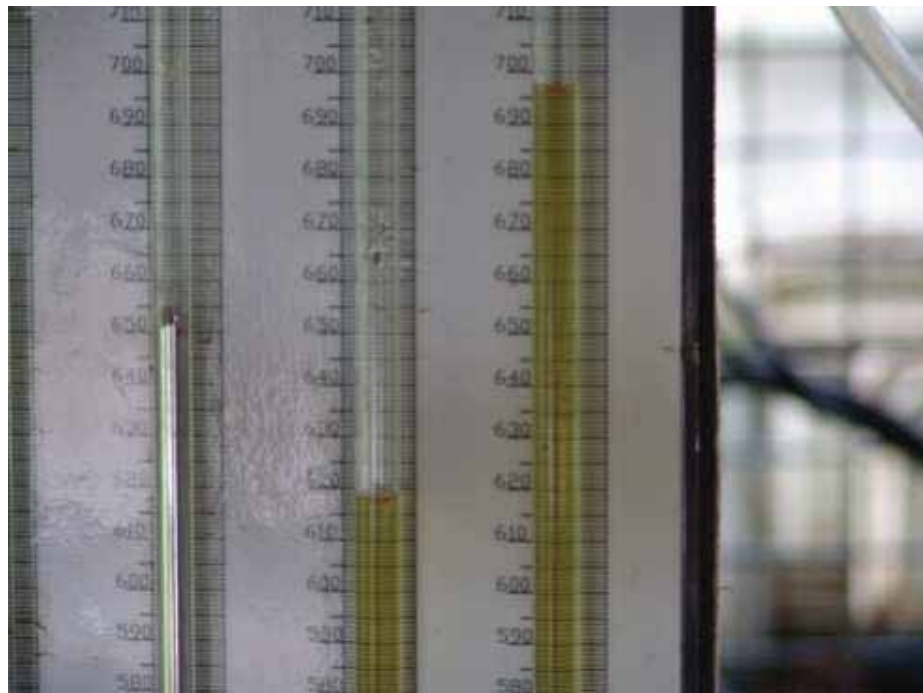


Figura 25 – Manômetro diferencial em U para medição de vazão de GLP

3.1.3 Suprimento de Ar/O₂ de Combustão

A linha é alimentada por dois compressores radiais marca IBRAM, modelo CR-8, instalados em paralelo, como mostrado na figura 17. As duas válvulas instaladas servem para descarregar parte do ar para a atmosfera e controlar a vazão de ar que entra queimador. A vazão na linha é medida através de um medidor de placas de orifício, o qual se encontra conectado a um manômetro diferencial de vidro em U, de 0 a 1500 mmca (Pérez 2007). O diâmetro do tubo é de 35mm, sendo utilizada uma placa de 15,99 mm de diâmetro. A figura 26 apresenta uma foto do painel de controle dos compressores e da bomba para o suprimento de água.



Figura 26 – Painel de controle dos compressores e da bomba KSB.

A linha de oxigênio é alimentada por um cilindro de oxigênio de 10m³ do tipo comercial (99%) fornecido pela White Martins. Na primeira montagem da câmara, foi utilizado um rotâmetro da marca Omel para medição e controle da vazão, como mostrado na figura 17. Para a segunda e terceira montagem, foi utilizada um medidor de placas de orifício conectado a um manômetro diferencial em U mostrado na figura 2. O diâmetro do tubo é de 12,7mm, sendo utilizada uma placa de 9,52mm.



Figura 27 – Cilindro de oxigênio e placa de orifício conectados ao manômetro em U

3.1.4 Suprimento de Água de Refrigeração

A água de refrigeração das paredes da câmara de combustão é fornecida por uma bomba KSB cuja vazão varia de 5 a 55 l/min e cuja altura manométrica de 5 a 65m. Ela é acionada por um motor trifásico de 0,75 kW (Pérez 2007) a partir do painel mostrado na figura 26. A vazão de água nesta linha é medida por um rotâmetro de escala de 0 a 2 GPM(galão por minuto).

3.1.5 Analisadores de Gases

Após a queima, os gases de exaustão são coletados pela sonda instalada na parte superior da câmara de combustão para serem analisados por um sistema constituído por três painéis. No primeiro painel os gases fluem através de um banho de gelo para condensar o vapor de água, fluindo através de um sistema de filtros que permite retirar a água e as partículas sólidas, uma vez que a umidade interfere na leitura dos equipamentos. No segundo painel, encontram-se os medidores de UHC e NO_x . O

primeiro medidor trabalha na faixa de 0 a 100 ppm e o segundo de 0 a 10.000 ppm. No terceiro painel, estão instalados os medidores de CO, CO₂ e O₂. A escala de CO varia de 0 a 5%, a de CO₂ de 0 a 18% e a de O₂ de 0 a 100%. Os painéis dos analisadores podem ser visualizados nas Figuras 28, 29 e 30.



Figura 28- Sistema de análises de gases



Figura 29 – Analisadores de CO e CO₂



Figura 30 – Analisador de NO_x

3.1.6 Sistema de Aquisição de Dados

Os sinais dos analisadores de gases, dos termopares da câmara de combustão e das linhas de combustível e de ar de combustão são arquivados em um sistema de coleta de dados que é composto por um microcomputador AMD Athlon XP 2200, 1,81 GHz e 512 Mb de memória RAM. Todo o monitoramento e registro de dados é feito pelo programa Lab View.

3.1.7 Segunda Montagem da Câmara

Após a primeira montagem e realização de testes na câmara foi feita uma modificação na linha de alimentação de oxigênio para maior precisão e controle da vazão. A medição é feita com um medidor de placas de orifício já descrito na seção 3.1.3, de tubulação de 12,7mm e placa de 9,52mm. Para o controle da vazão foi utilizada uma válvula gaveta já presente no *swirler*. A figura 31 mostra um esquema da modificação feita.

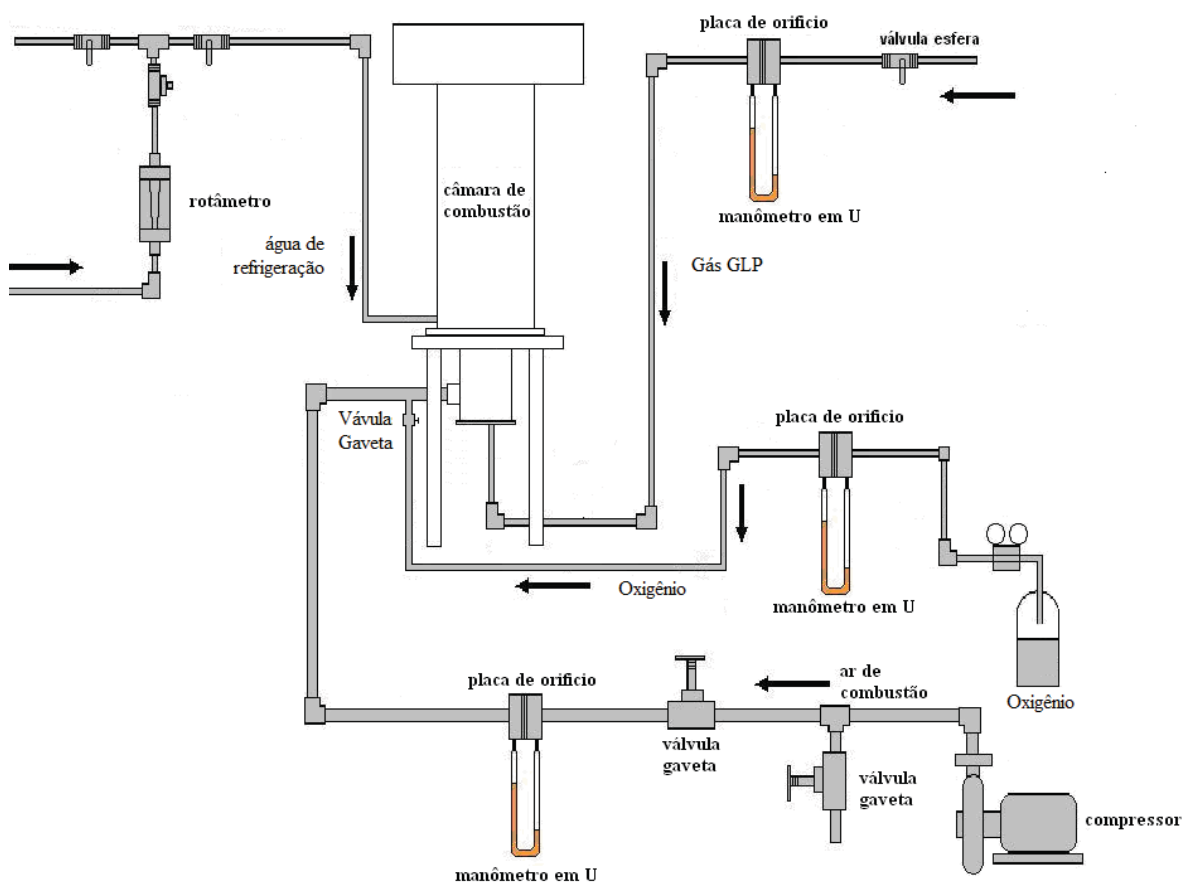


Figura 31 – Esquema da segunda montagem da câmara

3.1.8 Terceira Montagem da Câmara

Com o intuito de reduzir a entrada de nitrogênio na câmara e por consequência reduzir o máximo possível a formação de NO_x , foi feita uma terceira modificação. O terceiro e último estágios foram retirados e substituídos por uma única peça de diâmetro menor (80mm) conforme mostra a figura 32. Também foi colocada uma válvula gaveta na entrada de ar para melhor isolamento da câmara.

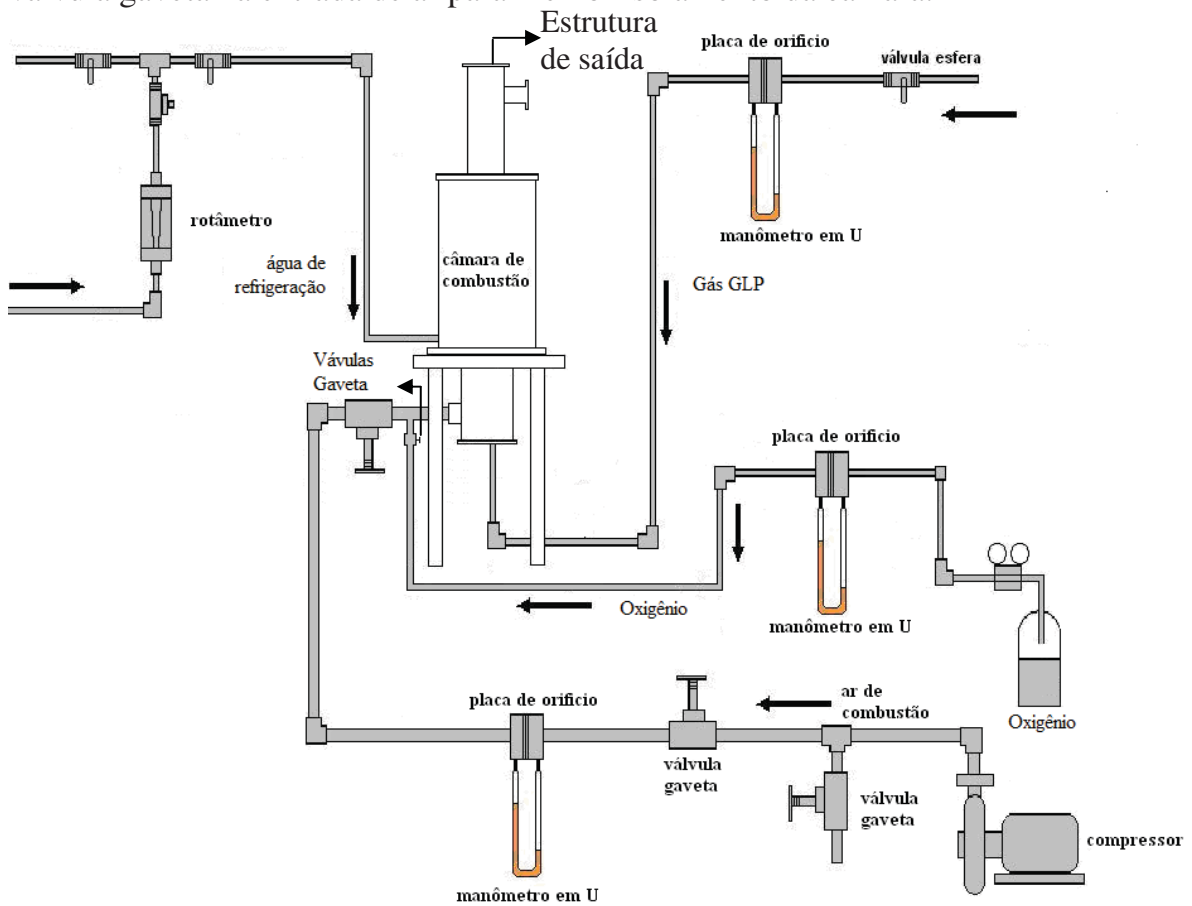


Figura 32 – Esquema da terceira montagem da câmara

Abaixo segue a figura 33 com o esquema da estrutura de saída da câmara e 34 com a foto da mesma.

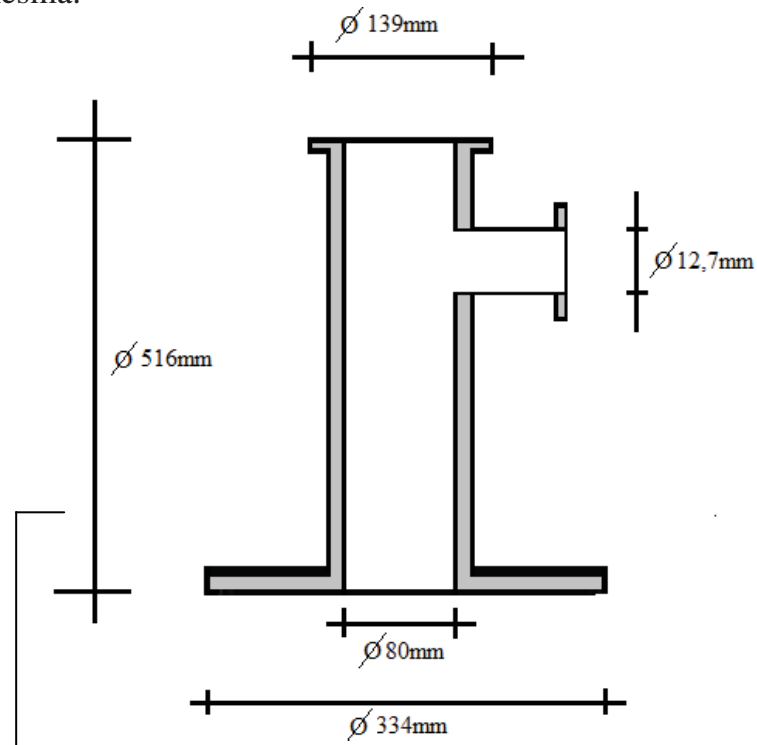


Figura 33 – Esquema da estrutura de saída



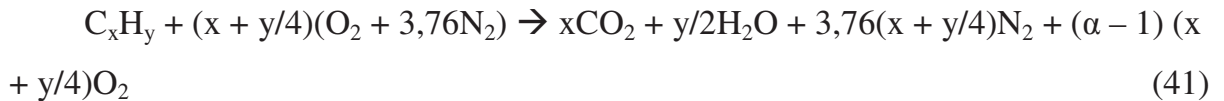
Figura 34 – Foto da terceira montagem

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO GLP

Durante a realização dos experimentos é necessário conhecer a vazão mássica dos combustíveis; isso implica em medir sua vazão volumétrica e conhecer sua massa molar, bem como confirmar e corrigir se necessário sua fórmula usada na tese de Lacava (2000). Desconhecendo a fórmula do combustível, temos a seguinte equação de combustão:



Onde “c”, “x” e “y” são coeficientes estequiométricos e “ α ” o excesso de oxidante. Tornando o coeficiente estequiométrico “c” em função de x e y, tem-se:



A partir dos analisadores é possível obter as porcentagens de oxigênio e dióxido de carbono em base seca no equilíbrio, da mesma forma como é obtida pela equação 42.

$$[CO_2] = \frac{x}{x + 3,76(x + y/4) + (\alpha - 1)(x + y/4)} \quad (42)$$

Para cada teste de queima com ar realizado foi feito um gráfico $O_2(\%) \times CO_2(\%)$ com os valores dados pelos analisadores:

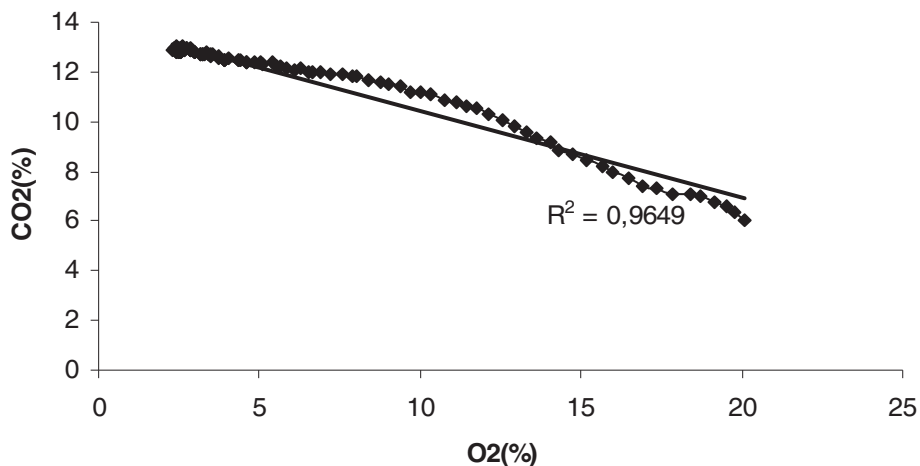


Figura 35 – Produção de CO_2 em função do consumo de oxigênio presente no ar.

Como o oxigênio e o dióxido de carbono estão presentes no mesmo fluxo gasoso de saída, a medida que um deles tem sua concentração diminuída, o outro tem sua aumentada.

A partir da equação que melhor descreve a reta,

$$CO_2(\%) = -0,3502O_2(\%) + 13,952 \quad (43)$$

foi possível obter a taxa de formação de CO_2 onde todo o oxigênio é consumido, então neste ponto a equação 42 passa a ser:

$$[CO_2] = \frac{x}{x + 3,76(x + y/4)} \quad (44)$$

Com a equação 44 acrescida do valor da concentração de CO_2 fornecida pela equação da reta no ponto onde $O_2(\%)$ é zero mais o valor de “x” oriundo da fórmula do gás GLP usada por Lacava ($C_{3,4}H_{7,8}$) é possível calcular “y” e confirmar a fórmula.

O gás GLP usado nos experimentos apresenta uma Fórmula média $C_{3,4}H_{7,7}$ e massa molar de aproximadamente 48g/mol.

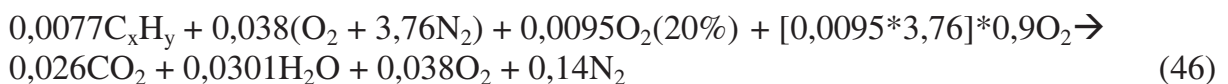
4 TRATAMENTO E DISCUSÃO DOS RESULTADOS

4.1 ENSAIO PRELIMINAR

Para o primeiro experimento, foram feitos testes para garantir que a primeira montagem da câmara suportaria uma queima com oxigênio puro. Foi feito então um enriquecimento em estágios, seguindo os cálculos obtidos por simulação computacional aplicada para este caso. Iniciando então a queima com ar e uma placa de orifício de 13,995mm, foi utilizado 0,00046kg/s (100mm), para manter a mesma potência obtida por Pérez (2007) de GLP e 0,0074kg/s (310mm) de ar e o bico injetor de 3mm:

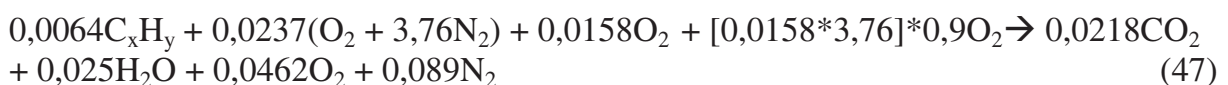


Para um enriquecimento de 20% mais um excesso de O₂ para compensar a massa de nitrogênio que foi retirada, aplica-se a razão de 0,86 calculada computacionalmente para a redução de combustível. Este excesso de oxigênio foi utilizado para diminuir o tempo de residência dos gases dentro da câmara como medida de segurança.



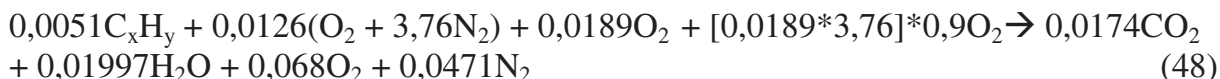
Onde a concentração em colchetes representa o excesso de oxigênio multiplicada por um fator de correção 0,9 para que esta quantidade tenha a mesma massa do nitrogênio que deixou de entrar devido a redução do volume de ar. No manômetro em U foram usados 70mm (0,000365kg/s) de gás, 145mm de ar (0,005117kg/s) e 0,0013kg/s de oxigênio.

Para um enriquecimento de 40% mais o excesso, foi utilizada a razão de 0,713:



No manômetro em U foram usados 50mm (0,000316kg/s) de GLP e 60mm (0,003307kg/s) de ar enquanto que no rotâmetro foram usados 0,00222kg/s de oxigênio.

Para um enriquecimento de 60% mais o excesso, foi utilizada a razão de 0,569:



No manômetro em U foram usados 15mm (0,00018kg/s) de GLP e 31mm (0,002386kg/s) de ar enquanto que no rotâmetro foram usados 0,00265kg/s de oxigênio.

O enriquecimento para 80% tornou-se impraticável devido as limitações de leitura no equipamento, portanto no experimento seguinte foi feita a combustão com oxigênio puro (100% de O₂):



No manômetro em U foi usado 10mm (0,000148kg/s) de GLP e no rotâmetro 0,00222kg/s de oxigênio. Não houve problemas de aquecimento na câmara durante a queima com oxigênio puro, portanto o enriquecimento não foi mais necessário.

A velocidade do fluxo gasoso foi diminuindo a medida que se diminuía o volume de entrada, fazendo com que a chama também perdesse velocidade. Isto foi corrigido substituindo a bico injetor de 3mm por um de 2mm.

Neste experimento constatou-se aumento não desejado na concentração de Nox, devido a aberturas na câmara.

Durante esta bateria de testes preliminares, houve também a formação de fuligem e condensado dentro da câmara durante a combustão com oxigênio puro, devido a altura da câmara e a temperatura baixa de suas paredes somado ao pequeno fluxo gasoso que gera pouco arraste e turbulência.

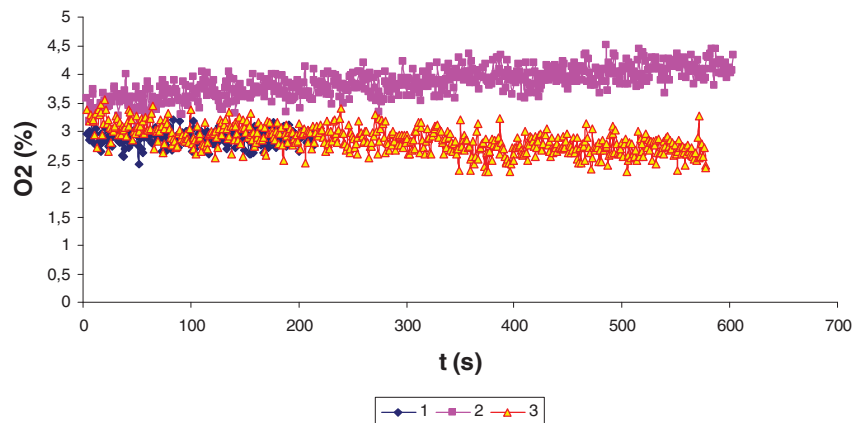
4.2 PRIMEIRA BATERIA DE TESTES

4.2.1 Queima com ar

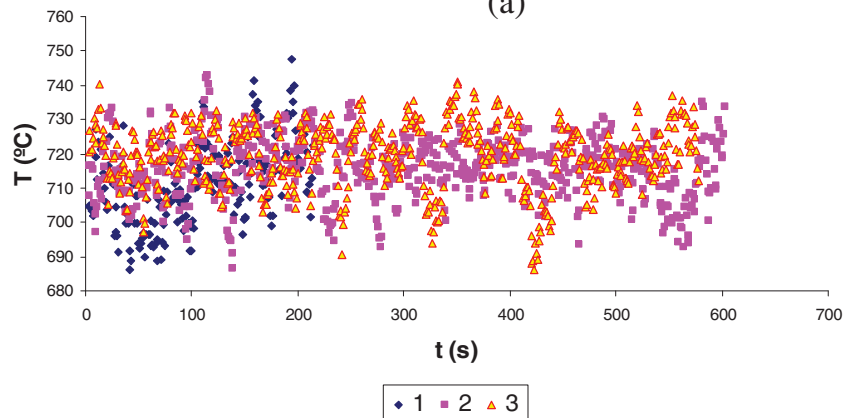
Estes testes foram realizados na primeira montagem da câmara cujo esquema esta demonstrado na figura 17 e servirão para comparar com os experimentos realizados com oxigênio puro. As concentrações de GLP e ar utilizadas para cada experimento estão demonstradas na tabela 41. Conforme o processo de combustão se inicia, o oxigênio vai sendo consumido até que se atinja um equilíbrio, como mostra a figura 36 abaixo:

Tabela 41 – Concentração dos reagentes para queima com ar

	Nº Experimento		
	1	2	3
Ar(kg/s)	$7,754 \cdot 10^{-3}$	$8,03 \cdot 10^{-3}$	$7,52 \cdot 10^{-3}$
GLP(kg/s)	$0,465 \cdot 10^{-3}$	$0,469 \cdot 10^{-3}$	$0,443 \cdot 10^{-3}$



(a)



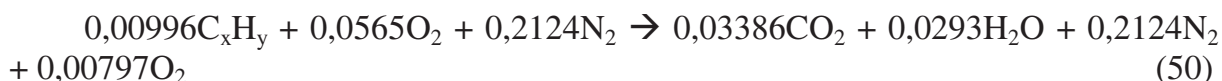
(b)

Figura 36 – Concentração de oxigênio na exaustão e temperatura nos 3 experimentos

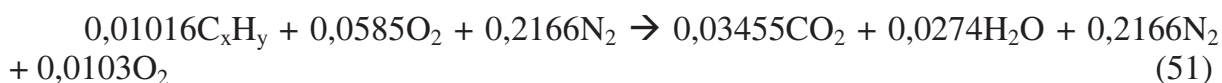
Em base seca, têm-se uma média de 2,5 a 4% de oxigênio e 12,3 a 13% de CO₂ na exaustão dos testes. A temperatura dos gases chega a uma média de 700°C.

Nestas condições, têm-se o seguinte balanço estequiométrico:

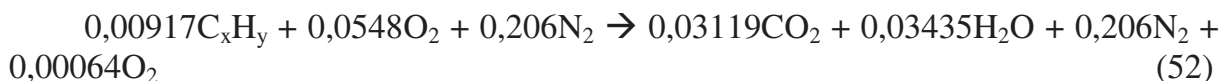
1º Teste



2º Teste



3º Teste



Para o balanço de energia, há uma consideração a fazer: água foi utilizada para o resfriamento das paredes da câmara. A tabela 42 apresenta a vazão utilizada de água bem como a variação de temperatura do momento em que entra na câmara até sua saída:

Tabela 42 – Vazão volumétrica de água de refrigeração e sua variação de temperatura

	Nº Experimento		
	1	2	3
Água(l/min)	6,8	6	5,7
$\Delta T(^{\circ}C)$	31,93	35,8	36

A tabela 43 apresenta a energia absorvida pela água para cada caso, e energia fornecida pelo combustível, bem como a eficiência do processo.

Tabela 43 – Calor fornecido pelo GLP e absorvido pela água para cada caso

	Nº Experimento		
	1	2	3
Calor absorvido pela água(kJ/s)	14,99	15,07	13,82
Calor fornecido pelo GLP(kJ/s)	21,46	21,65	20,43
Eficiência (%)	69,84	69,73	67,58

Somado aos dados acima, temos o calor roubado pelos gases calculado pela integral abaixo;

$$\Delta H = \int_{T_i}^{T_f} n(Cp_{CO_2} + Cp_{H_2O} + Cp_{N_2} + Cp_{O_2})dT \quad (53)$$

Onde n = número de mols e Cp o calor específico dos gases.

Ao total, o calor absorvido pela água mais o calor absorvido pelos gases é mostrado na tabela 44:

Tabela 44 – Calor total absorvido pelo sistema

Nº	Calor perdido pelos gases + calor absorvido pela água (kJ/s)	erro
1	21,39	0,018
2	21,65	0,0018
3	20,17	0,067

Para o cálculo do numero de Reynolds, foi obtida a viscosidade média da mistura gasosa dentro da câmara:

Tabela 45 – Viscosidade média dos gases de exaustão e nº de Reynolds

	Nº Experimento		
	1	2	3
Viscosidade da mistura gasosa (Pa.s)	4,3967E-05	4,41496E-05	4,4235E-05
Nº Reynolds	841,14	866,69	810,17

4.2.2 Queima com oxigênio puro.

As concentrações utilizadas nos testes são dadas na tabela 46 abaixo:

Tabela 46 – Concentrações de oxigênio e GLP usados

	Nº Experimento					
	1	2	3	4	5	6
O ₂ (kg/s)	0,6.10 ⁻³	1,6.10 ⁻³	0,6.10 ⁻³	1,4.10 ⁻³	0,74.10 ⁻³	0,78.10 ⁻³
GLP(kg/s)	0,133.10 ⁻³	0,139.10 ⁻³	0,139.10 ⁻³	0,127.10 ⁻³	0,127.10 ⁻³	0,195.10 ⁻³

Durante a queima temos oxigênio e dióxido de carbono em base seca, dados estes fornecidos pelos analisadores. Porém os valores para CO₂ foram calculados com base na concentração de oxigênio devido ao fato do analisador de CO₂ ser incapaz de registrar valores maiores que 20%.

O consumo de oxigênio e a temperatura dos processos são dados na figura 37:

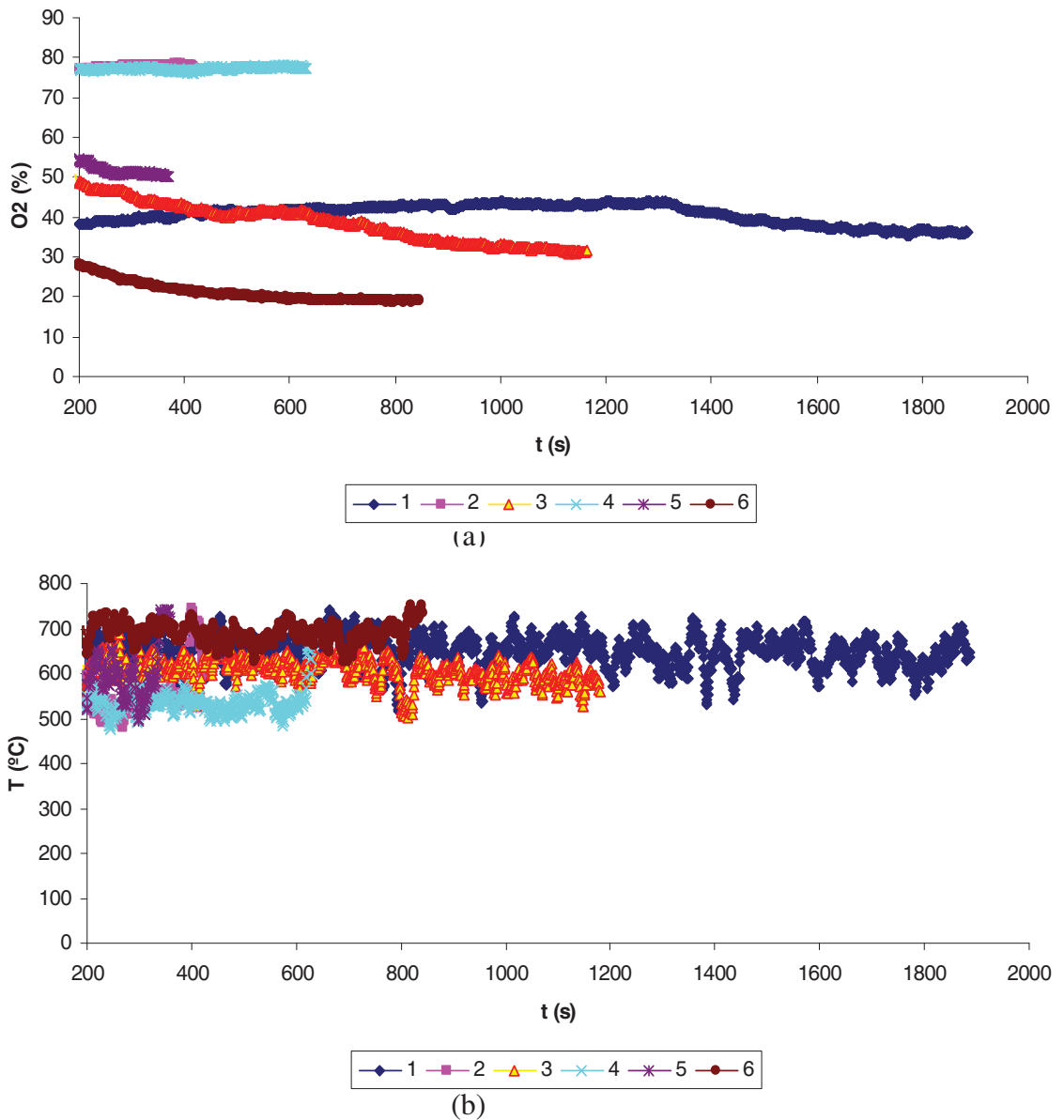
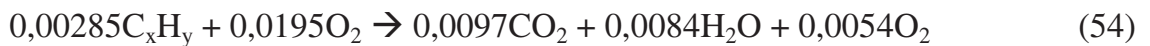


Figura 37 – Concentração de oxigênio na exaustão e temperatura do sistema para os seis testes

Nestas condições, têm-se o seguinte balanço estequiométrico:

1º Teste

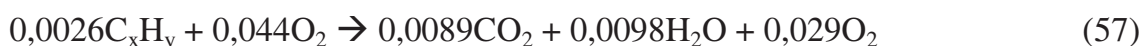
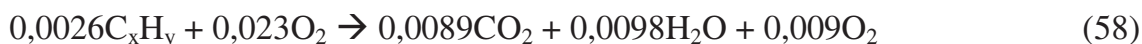


2º Teste



3º Teste



4º Teste**5º Teste****6º Teste**

Para o balanço de energia, a tabela 47 apresenta a vazão utilizada de água bem como a variação de temperatura do momento em que entra na câmara até sua saída:

Tabela 47 – Vazão volumétrica de água de refrigeração e sua variação de temperatura para testes com oxigênio puro

	Nº Experimento					
	1	2	3	4	5	6
Água(l/min)	1,7	1,9	1,9	1,7	2,3	2,46
$\Delta T(^{\circ}C)$	44	36	43	16	33	46

A tabela 48 apresenta a energia absorvida pela água para cada caso, e energia fornecida pelo combustível, bem como a eficiência do processo.

Tabela 48 – Calor fornecido pelo GLP e absorvido pela água para cada caso de queima com oxigênio puro

	Nº Experimento					
	1	2	3	4	5	6
Calor absorvido pela água(kJ/s)	5,25	4,77	5,61	1,93	5,27	7,91
Calor fornecido pelo GLP(kJ/s)	6,15	6,41	6,41	5,86	5,86	9
Eficiência (%)	85,6	74	88	33	90	88

Somado aos dados acima, temos o calor roubado pelos gases calculado pela integral abaixo (CARVALHO, MCQUAY, 2007);

$$\Delta H = \int_{T_i}^{T_f} n(Cp_{CO_2} + Cp_{H_2O} + Cp_{O_2})dT \quad (60)$$

Onde n = número de mols e Cp o calor específico dos gases.

Ao total, o calor absorvido pela água mais o calor absorvido pelos gases é mostrado na tabela 49:

Tabela 49 – Calor total absorvido pelo sistema durante a queima com oxigênio puro

Nº	Calor perdido pelos gases + calor absorvido pela água (kJ/s)	erro
1	5,82	0,07
2	5,78	0,15
3	6,15	0,05
4	2,83	0,7
5	5,86	0,0025
6	8,79	0,047

Para o cálculo do numero de Reynolds, foi obtida a viscosidade média da mistura gasosa dentro da câmara mostrado na tabela 50:

Tabela 50 – Viscosidade média dos gases de exaustão e nº de Reynolds

	Nº Experimento					
	1	2	3	4	5	6
Viscosidade da mistura gasosa (Pa.s)	4,43E-05	4,17E-05	4,28E-05	4,14E-05	4,16E-05	4,64E-05
Nº Reynolds	76,2	184,8	78,33	166	93,9	94,9

A partir dos dados apresentados, foi construída a tabela 51 comparativa a seguir:

Tabela 51 – Comparação entre os testes realizados para a primeira bateria

nº teste	Temperatura dos Gases de Exaustão (°C)	Massa de oxidante (kg/s)	Massa de GLP (kg/s)	Relação ar/comb (massa)	Redução consumo glp em relação ao teste com ar (%)
1º teste ar	712	$7,755 \cdot 10^{-3}$	$0,465 \cdot 10^{-3}$	27	-
1º O2	649	0,62	$0,133 \cdot 10^{-3}$	6,78	71

nº teste	Temperatura dos Gases de Exaustão (°C)	Massa de oxidante (kg/s)	Massa de GLP (kg/s)	Relação ar/comb (massa)	Redução consumo glp em relação ao teste com ar (%)
2º teste ar	716	$8,03 \cdot 10^{-3}$	$0,465 \cdot 10^{-3}$	27	-
2º O2	551	$1,57 \cdot 10^{-3}$	$0,139 \cdot 10^{-3}$	16	70
3º O2	614	$0,6 \cdot 10^{-3}$	$0,139 \cdot 10^{-3}$	6,3	70

nº teste	Temperatura dos Gases de Exaustão (°C)	Massa de oxidante (kg/s)	Massa de GLP (kg/s)	Relação ar/comb (massa)	Redução consumo glp em relação ao teste com ar (%)
3º teste ar	719	$7,52 \cdot 10^{-3}$	$0,443 \cdot 10^{-3}$	28	-
4º O2	537	$1,39 \cdot 10^{-3}$	$0,127 \cdot 10^{-3}$	16,6	71
5º O2	557	$0,74 \cdot 10^{-3}$	$0,127 \cdot 10^{-3}$	8,8	71
6º O2	692	$0,78 \cdot 10^{-3}$	$0,195 \cdot 10^{-3}$	6,06	56

A seguir tem-se o perfil de temperaturas para os testes com oxigênio puro na figura 38:

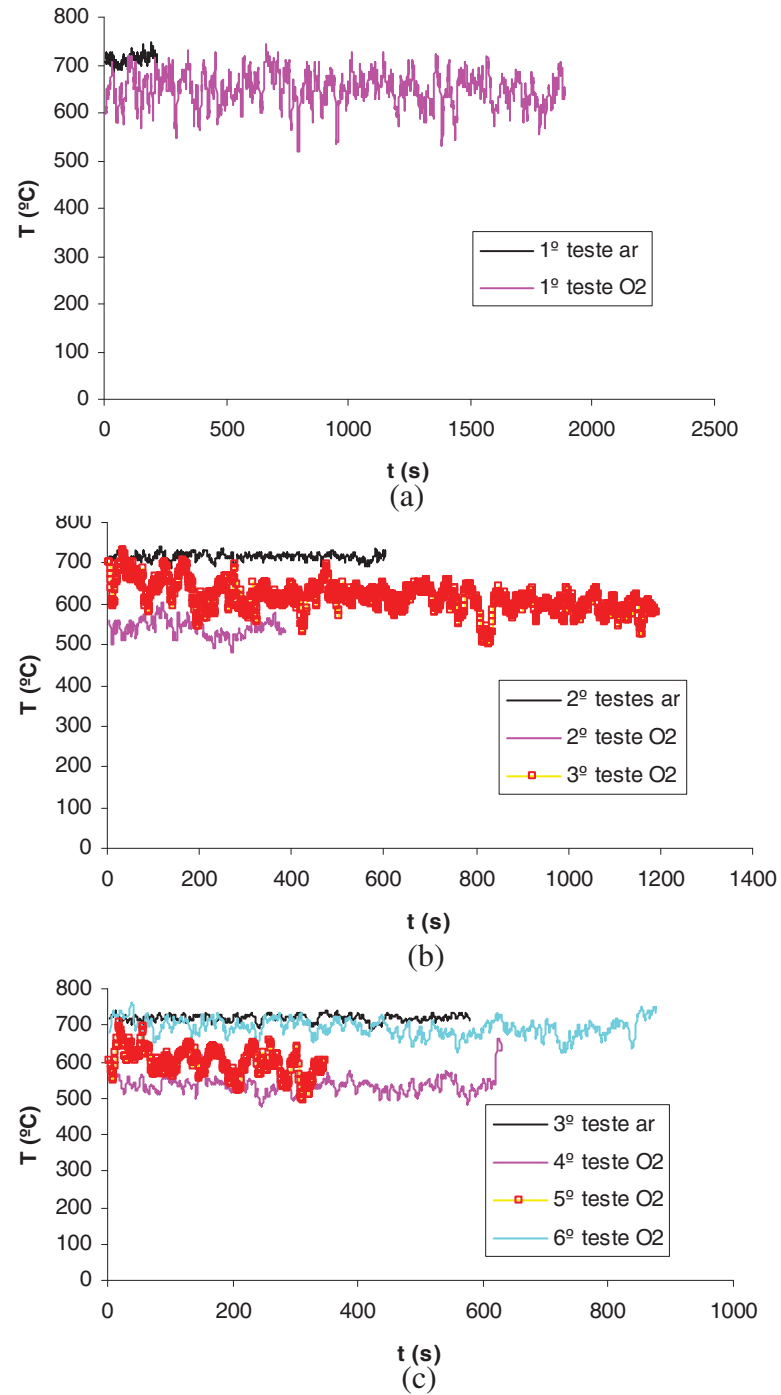


Figura 38 – Temperatura atingida nos testes durante a primeira bateria

4.3 SEGUNDA BATERIA DE TESTES

4.3.1 Queima com ar

Estes testes foram realizados na segunda montagem da câmara cujo esquema esta demonstrado na figura 31 e servirão para comparar com os experimentos realizados com oxigênio puro. A placa de orifício para medição de vazão de ar foi trocada de 13,995mm para 15,995mm, assim como o rotâmetro de oxigênio foi substituído por uma placa de orifício de 9,52mm. As concentrações de GLP e ar utilizadas para cada experimento estão demonstradas na tabela 52, assim como a temperatura e a concentração de oxigênio na exaustão estão demonstrados nas figuras 39 e 40.

Tabela 52 – Concentração dos reagentes para queima com ar na segunda bateria de testes

		Ar(kg/s)	GLP(kg/s)
	1	$8,08 \cdot 10^{-3}$	$0,491 \cdot 10^{-3}$
	2	$8,451 \cdot 10^{-3}$	$0,491 \cdot 10^{-3}$
	3	$8,263 \cdot 10^{-3}$	$0,484 \cdot 10^{-3}$
	4	$8,185 \cdot 10^{-3}$	$0,503 \cdot 10^{-3}$
	5	$8,117 \cdot 10^{-3}$	$0,481 \cdot 10^{-3}$
	6	$8,188 \cdot 10^{-3}$	$0,481 \cdot 10^{-3}$
	7	$8,155 \cdot 10^{-3}$	$0,495 \cdot 10^{-3}$
	8	$8,260 \cdot 10^{-3}$	$0,498 \cdot 10^{-3}$
	9	$8,149 \cdot 10^{-3}$	$0,489 \cdot 10^{-3}$
Nº Experimento	10	$8,335 \cdot 10^{-3}$	$0,489 \cdot 10^{-3}$
	11	$7,927 \cdot 10^{-3}$	$0,478 \cdot 10^{-3}$
	12	$8,572 \cdot 10^{-3}$	$0,493 \cdot 10^{-3}$
	13	$8,485 \cdot 10^{-3}$	$0,494 \cdot 10^{-3}$
	14	$8,178 \cdot 10^{-3}$	$0,497 \cdot 10^{-3}$
	15	$8,158 \cdot 10^{-3}$	$0,500 \cdot 10^{-3}$
	16	$8,127 \cdot 10^{-3}$	$0,491 \cdot 10^{-3}$
	17	$7,870 \cdot 10^{-3}$	$0,496 \cdot 10^{-3}$
	18	$8,217 \cdot 10^{-3}$	$0,497 \cdot 10^{-3}$
	19	$8,620 \cdot 10^{-3}$	$0,496 \cdot 10^{-3}$

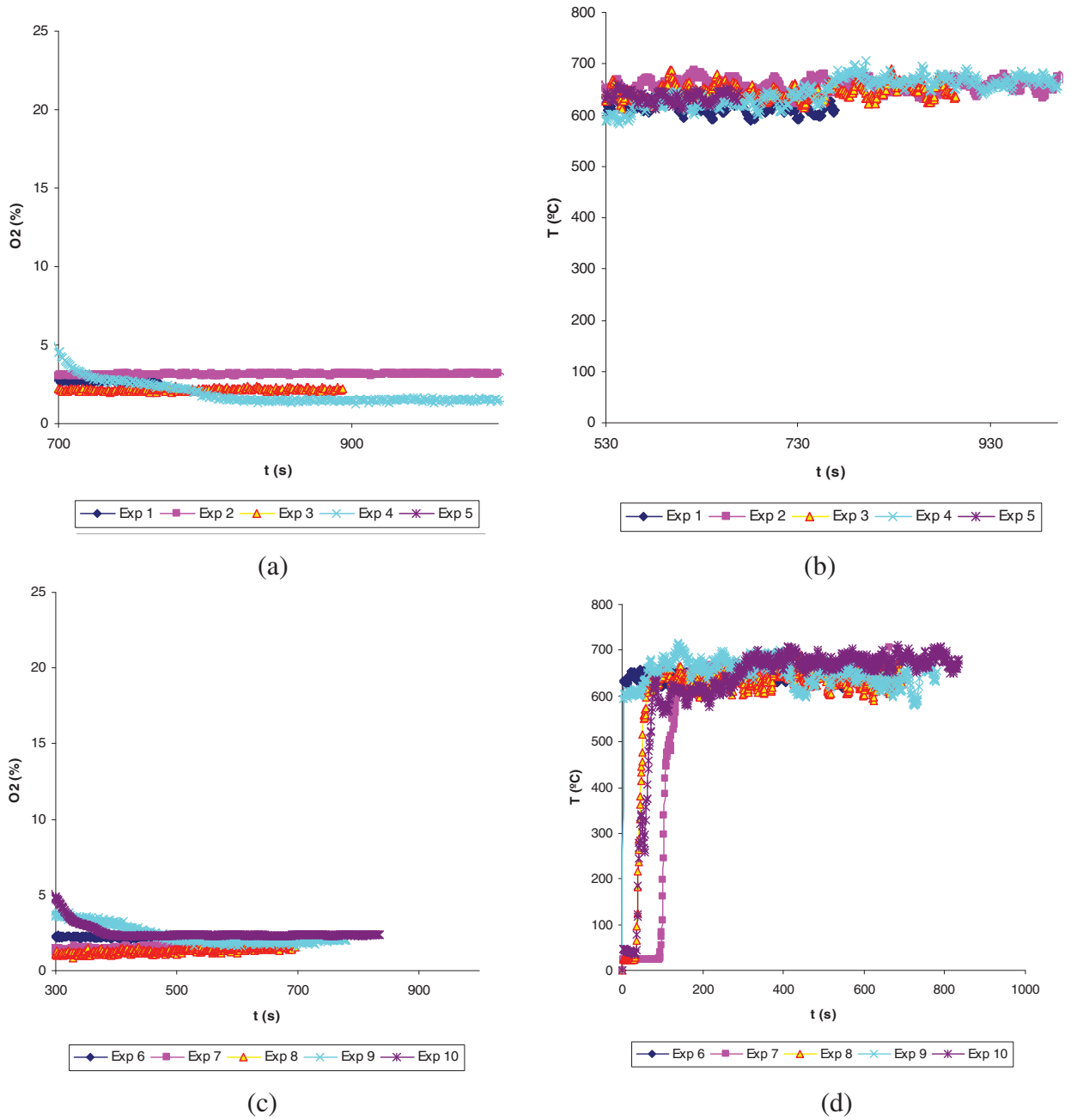
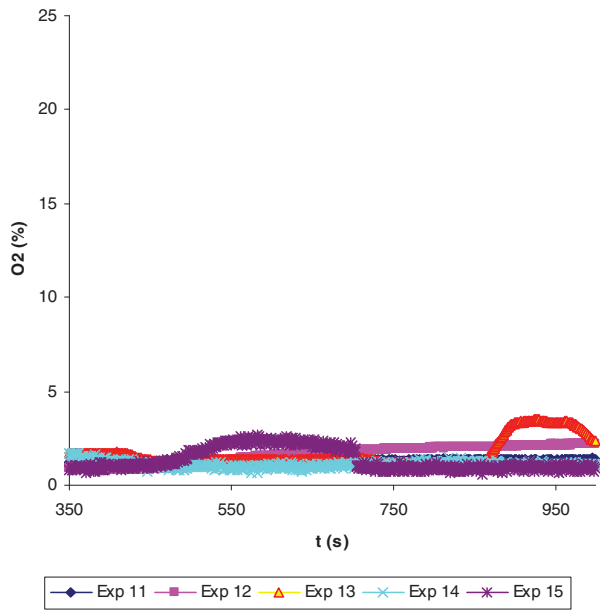
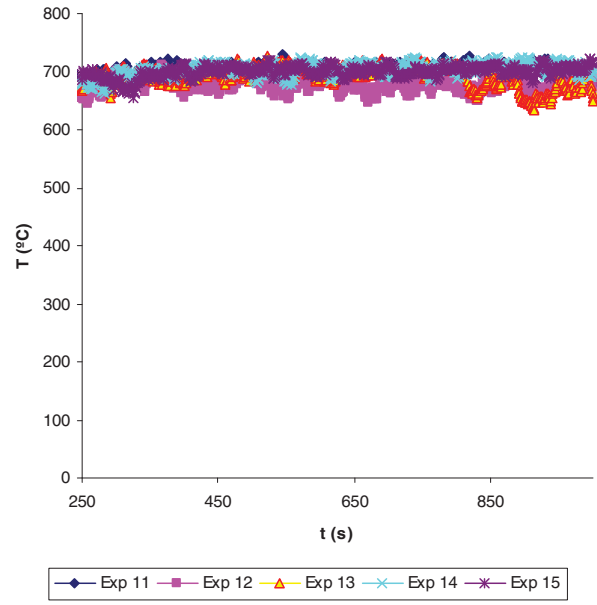


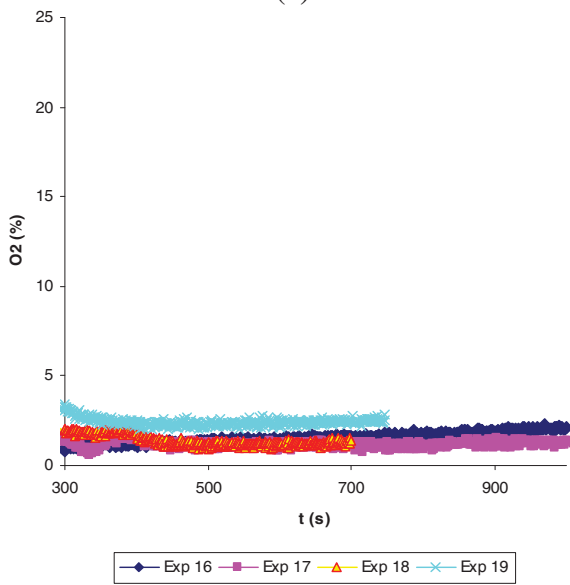
Figura 39 – Concentração de oxigênio na exaustão e temperatura do sistema para os testes de 1 a 10 na segunda bateria



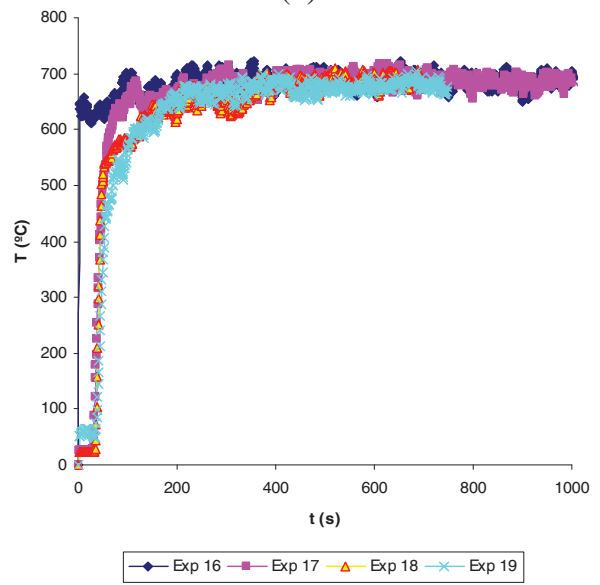
(a)



(b)



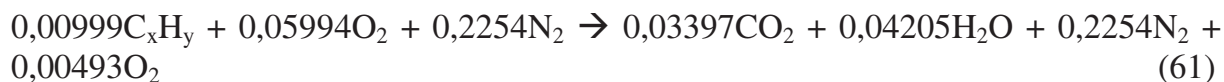
(c)



(d)

Figura 40 - Concentração de oxigênio na exaustão e temperatura do sistema para os testes de 11 a 19 na segunda bateria

Nestas condições, têm-se a seguinte concentração média para os testes:



Para o balanço de energia, a tabela 53 apresenta a vazão utilizada de água bem como a variação de temperatura do momento em que entra na câmara até sua saída:

Tabela 53 – Vazão volumétrica de água de refrigeração e sua variação de temperatura para testes com oxigênio puro para a segunda bateria de testes

		Água(l/min)	$\Delta T(^{\circ}C)$
N ^o Experimento	1	7,57	31
	2	7,57	28,8
	3	7,57	29,6
	4	7,57	30
	5	7,57	28,4
	6	7,57	29,3
	7	7,57	29,7
	8	7,57	29,6
	9	7,57	30,7
	10	7,57	29,8
	11	5,7	38,7
	12	7,57	29,1
	13	7,57	30,2
	14	7,57	30,6
	15	7,57	30,7
	16	7,57	30
	17	7,57	30,2
	18	7,57	29,8
	19	7,57	29,2

A tabela 54 apresenta a energia absorvida pela água para cada caso, e energia fornecida pelo combustível, bem como a eficiência do processo de transferência de calor para a água.

Tabela 54 – Calor fornecido pelo GLP e absorvido pela água para cada caso de queima com oxigênio puro para a segunda bateria de testes

		Calor absorvido pela água(kJ/s)	Calor fornecido pelo GLP(kJ/s)	Eficiência (%)
	1	16,37	22,65	72
	2	15,19	22,66	67
	3	15,62	22,34	70
	4	15,83	23,22	68
	5	14,98	22,2	67
	6	15,45	22,2	70
	7	15,7	22,85	69
	8	15,63	22,98	68
	9	16,2	22,57	72
Nº Experimento	10	15,7	22,57	70
	11	15,28	22,08	69
	12	15,37	22,76	67,5
	13	15,94	22,78	70
	14	16,16	22,97	70
	15	16,2	23,1	70
	16	15,83	22,65	70
	17	15,91	22,89	69
	18	15,7	22,94	68
	19	15,36	22,89	67

Somado aos dados acima, temos o calor roubado pelos gases calculado pela equação 53;

Ao total, o calor absorvido pela água mais o calor absorvido pelos gases é dado na tabela 55:

Tabela 55 – Calor total absorvido pelo sistema

Nº	Calor perdido pelos gases + calor absorvido pela água (kJ/s)	erro
1	22,15	0,12
2	21,56	0,26
3	22,06	0,064
4	22,3	0,219
5	21,05	0,275
6	21,6	0,137
7	21,94	0,215
8	21,77	0,286
9	22,44	0,034
10	22,36	0,052
11	21,94	0,0290
12	22,23	0,129
13	22,78	0,00326
14	23,07	0,0188
15	23,06	0,00696
16	22,48	0,0439
17	22,27	0,1487
18	22,42	0,124
19	22,3	0,142

Para o cálculo do numero de Reynolds, foi obtida a viscosidade média da mistura gasosa dentro da câmara, como mostrado na tabela 56:

Tabela 56 – Viscosidade média dos gases de exaustão e nº de Reynolds

		Viscosidade da mistura gasosa (Pa.s)	Nº Reynolds
Nº Experimento	1	4,13E-05	933,19
	2	4,24E-05	949,14
	3	4,28E-05	919,65
	4	4,27E-05	915,15
	5	4,27E-05	906,29
	6	4,28E-05	912,38
	7	4,27E-05	911,72
	8	4,28E-05	921,15
	9	4,23E-05	917,96
	10	4,33E-05	917,18
	11	4,41E-05	858,24
	12	4,34E-05	939,78
	13	4,35E-05	928,11
	14	4,42E-05	883,97
	15	4,41E-05	884,18
	16	4,36E-05	890,31
	17	4,32E-05	870,48
	18	4,36E-05	899,39
	19	4,35E-05	943,65

4.3.2 Queima com oxigênio puro

As concentrações utilizadas nos testes são dadas na tabela 57 abaixo:

Tabela 57 – Concentrações de oxigênio e GLP usados para a segunda bateria de testes

		O ₂ (kg/s)	GLP(kg/s)
Nº Experimento	1	2,19.10 ⁻³	0,152.10 ⁻³
	2	2,24.10 ⁻³	0,137.10 ⁻³
	3	0,86.10 ⁻³	0,137.10 ⁻³
	4	0,90.10 ⁻³	0,139.10 ⁻³
	5	0,81.10 ⁻³	0,133.10 ⁻³
	6	0,551.10 ⁻³	0,138.10 ⁻³
	7	0,586.10 ⁻³	0,13.10 ⁻³
	8	2,236.10 ⁻³	0,138.10 ⁻³
	9	0,849.10 ⁻³	0,138.10 ⁻³
	10	1,091.10 ⁻³	0,138.10 ⁻³
	11	1,087.10 ⁻³	0,138.10 ⁻³
	12	1,23.10 ⁻³	0,138.10 ⁻³
	13	1,23.10 ⁻³	0,194.10 ⁻³
	14	1,085.10 ⁻³	0,162.10 ⁻³
	15	0,637.10 ⁻³	0,162.10 ⁻³

Tabela 57 – Concentrações de oxigênio e GLP usados para a segunda bateria de testes

	O ₂ (kg/s)	GLP(kg/s)	
	16	0,68.10 ⁻³	0,155.10 ⁻³
	17	0,89.10 ⁻³	0,155.10 ⁻³
	18	1,127.10 ⁻³	0,155.10 ⁻³
	19	1,23.10 ⁻³	0,175.10 ⁻³
	20	0,93.10 ⁻³	0,176.10 ⁻³
	21	1,193.10 ⁻³	0,154.10 ⁻³
	22	1,089.10 ⁻³	0,155.10 ⁻³
	23	1,115.10 ⁻³	0,155.10 ⁻³
	24	1,155.10 ⁻³	0,155.10 ⁻³
	25	1,67.10 ⁻³	0,223.10 ⁻³
	26	0,654.10 ⁻³	0,161.10 ⁻³
	27	1,14.10 ⁻³	0,175.10 ⁻³
	28	0,882.10 ⁻³	0,138.10 ⁻³
	29	0,65.10 ⁻³	0,154.10 ⁻³
Nº Experimento	30	1,03.10 ⁻³	0,162.10 ⁻³
	31	0,946.10 ⁻³	0,155.10 ⁻³
	32	0,946.10 ⁻³	0,155.10 ⁻³
	33	0,946.10 ⁻³	0,155.10 ⁻³
	34	1,19.10 ⁻³	0,176.10 ⁻³
	35	1,06.10 ⁻³	0,176.10 ⁻³
	36	0,71.10 ⁻³	0,176.10 ⁻³
	37	1,06.10 ⁻³	0,176.10 ⁻³
	38	2,60.10 ⁻³	0,176.10 ⁻³
	39	1,06.10 ⁻³	0,176.10 ⁻³
	40	0,71.10 ⁻³	0,176.10 ⁻³
	41	1,06.10 ⁻³	0,176.10 ⁻³
	42	0,77.10 ⁻³	0,17.10 ⁻³
	43	1,06.10 ⁻³	0,176.10 ⁻³
	44	0,74.10 ⁻³	0,18.10 ⁻³
	45	1,25.10 ⁻³	0,18.10 ⁻³

O consumo de oxigênio e a temperatura dos processos são dados nos gráficos 41, 42, 43, 44 e 45 a seguir. Vale salientar que nas figuras 41-b e 41-d da página 103 e figura 42-b da página 104 apresentam picos devido a variações da leitura do equipamento. O comportamento crescente ou decrescente de algumas curvas que se encontravam antes constantes também se deve a estas variações no equipamento.

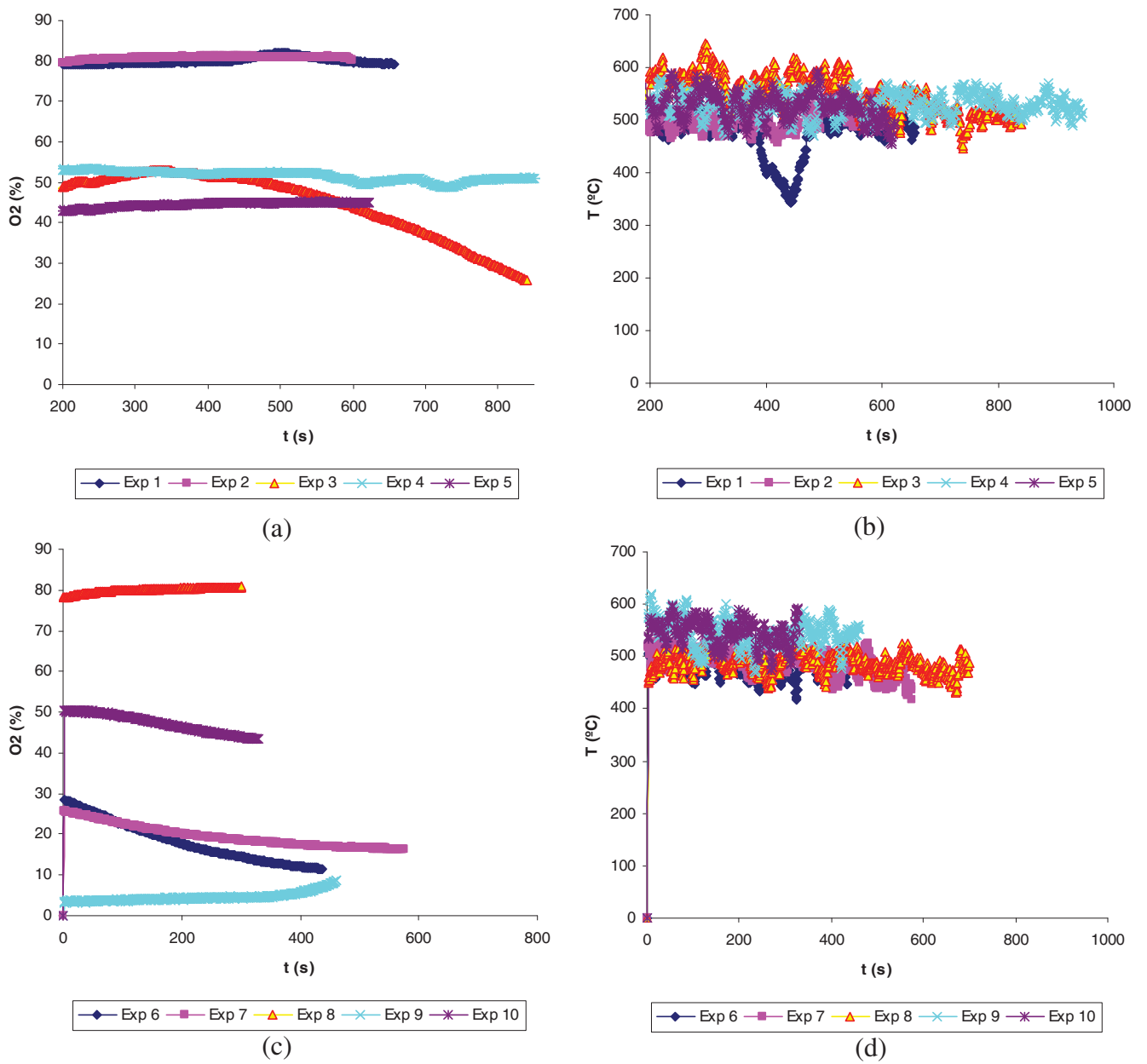


Figura 41 – Perfil de concentração de oxigênio na exaustão e temperaturas dos testes de 1 a 10 para a segunda bateria.

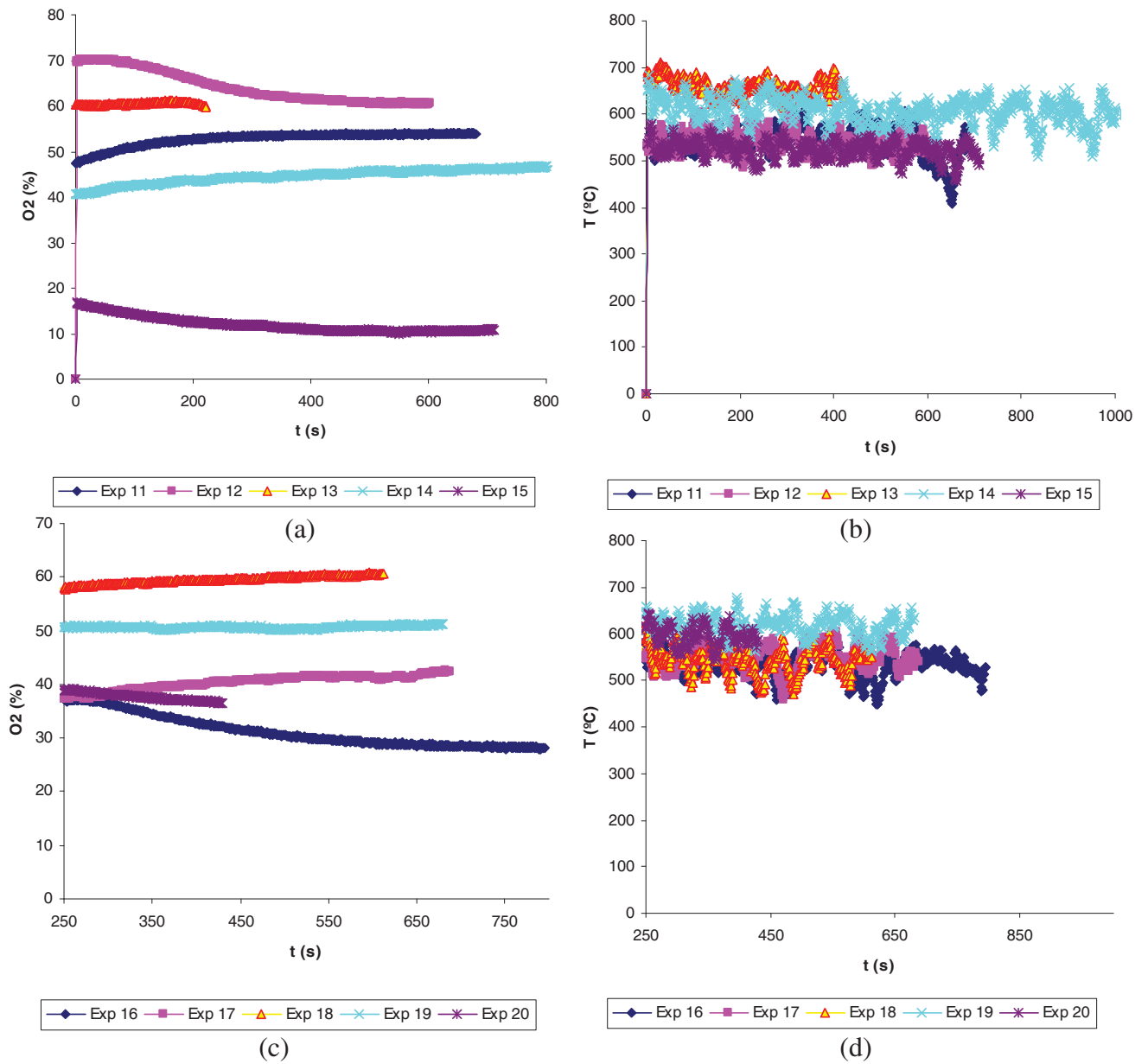


Figura 42 - Perfil de concentração de oxigênio na exaustão e temperaturas dos testes de 11 a 20 para a segunda bateria.

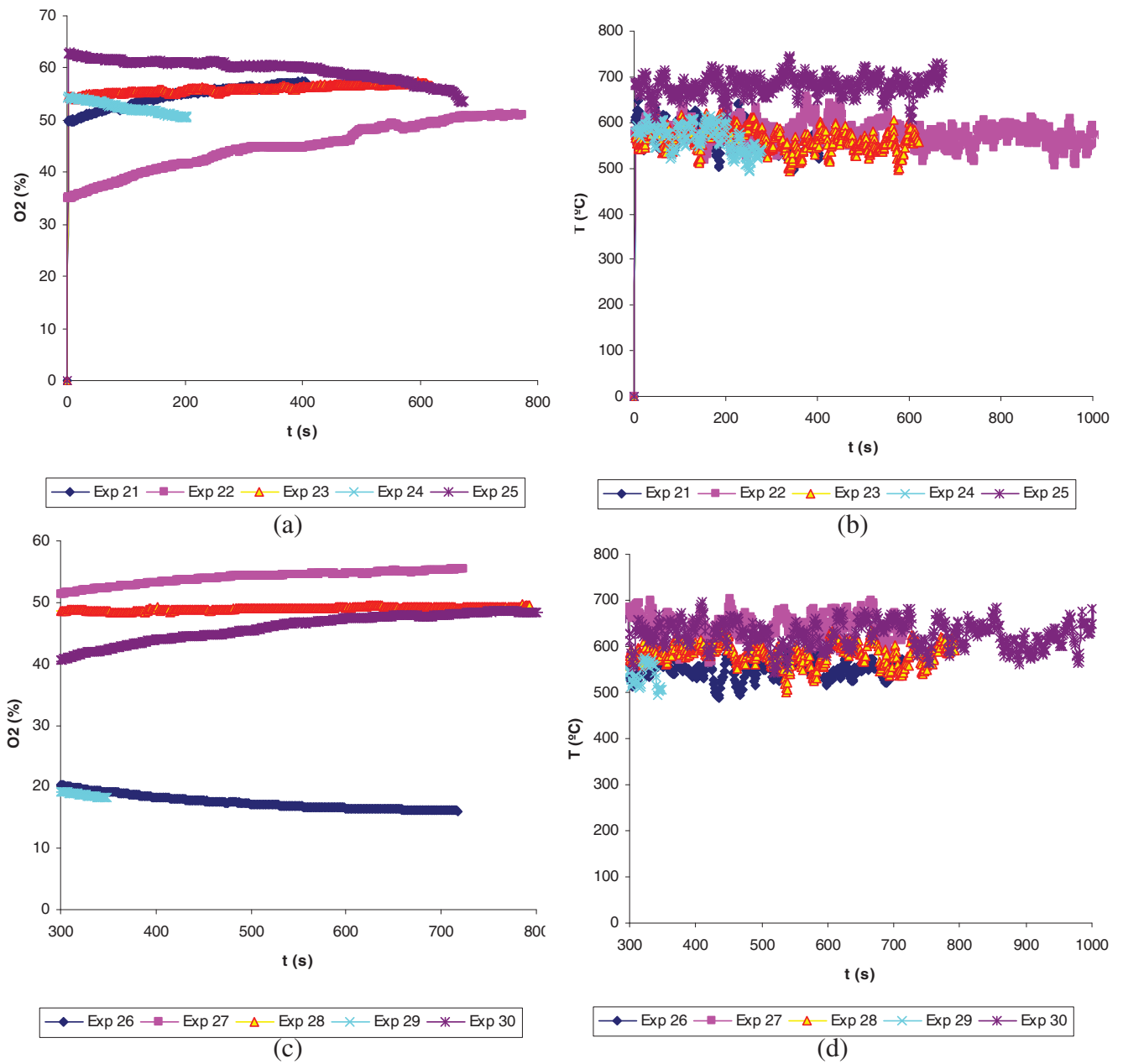
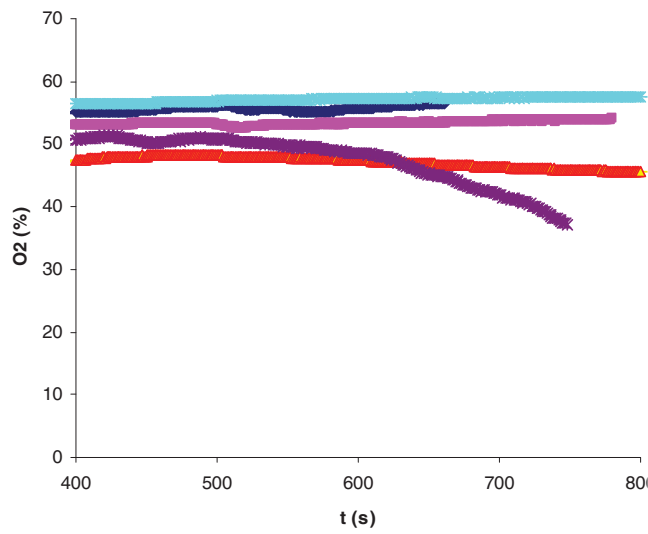
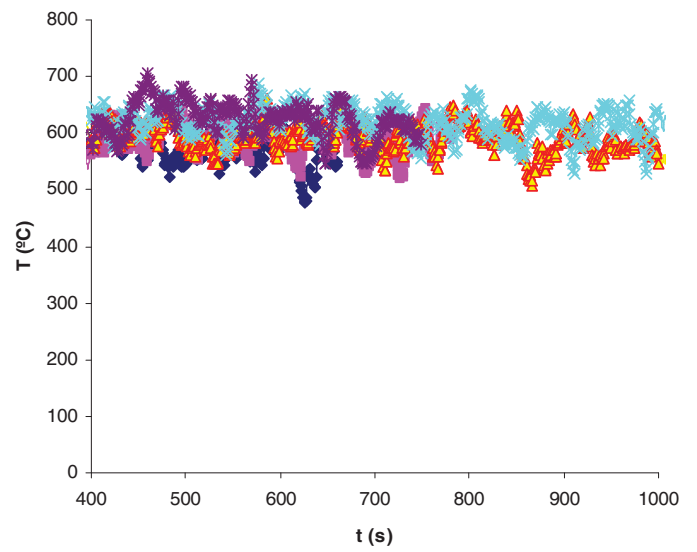


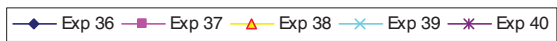
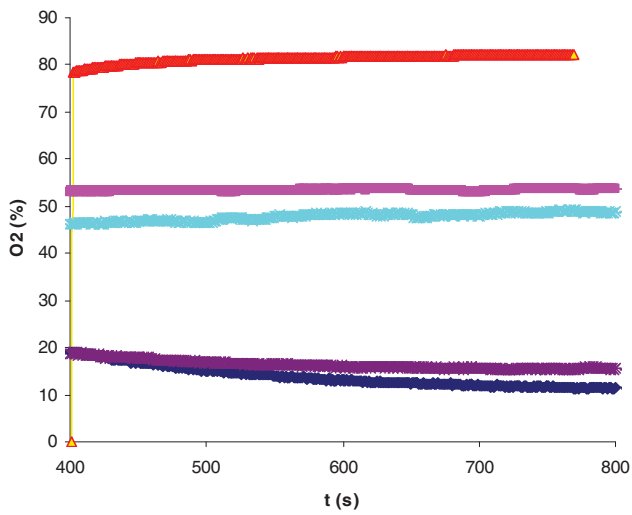
Figura 43 - Perfil de concentração de oxigênio na exaustão e temperaturas dos testes de 21 a 30 para a segunda bateria.



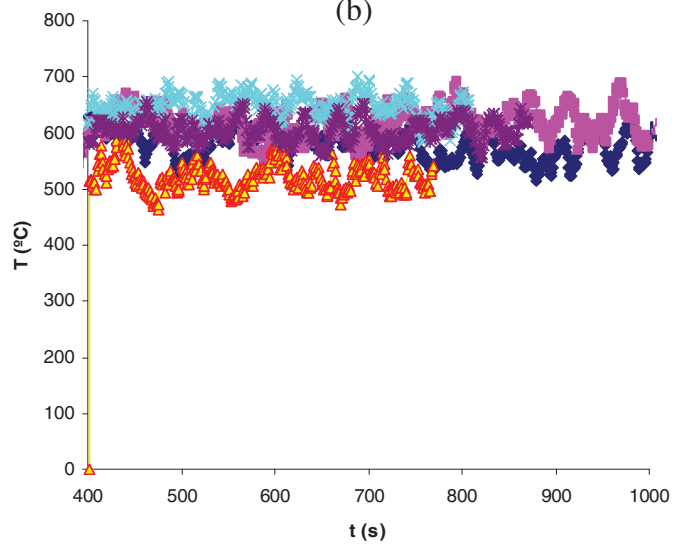
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 44 - Perfil de concentração de oxigênio na exaustão e temperaturas dos testes de 31 a 40 para a segunda bateria.

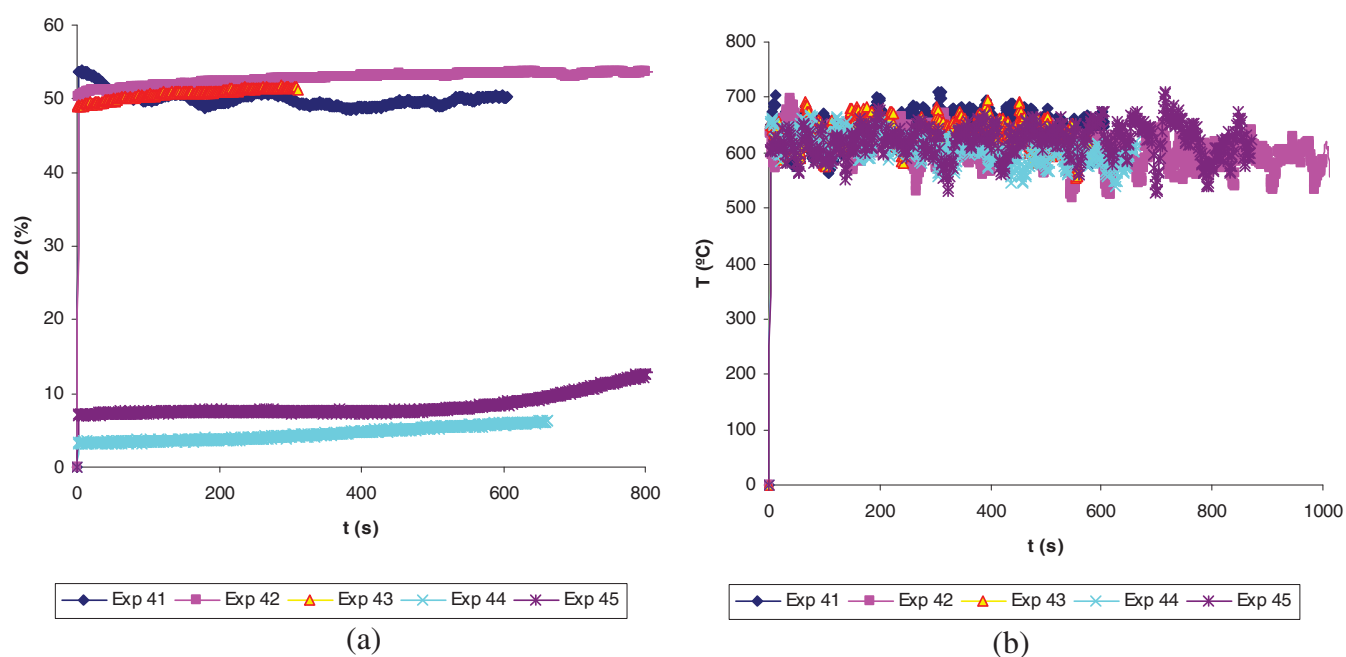
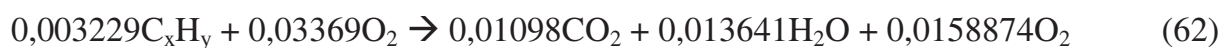


Figura 45 - Perfil de concentração de oxigênio na exaustão e temperaturas dos testes de 31 a 40 para a segunda bateria.

Nestas condições, têm-se o seguinte balanço estequiométrico médio para todos os testes:



Para o balanço de energia, a tabela 58 apresenta a vazão utilizada de água bem como a variação de temperatura do momento em que entra na câmara até sua saída:

Tabela 58 – Vazão volumétrica de água de refrigeração e sua variação de temperatura para testes com oxigênio puro para a segunda bateria de testes

	Água(l/min)	$\Delta T(^{\circ}C)$	
	1	7,57	9,8
	2	7,57	9,32
	3	7,57	10,31
	4	7,57	9,6
	5	7,57	9,8
	6	7,57	9,3
	7	4,54	14,74
	8	7,57	8,9
	9	7,57	10
	10	7,57	9,7
	11	3,78	20,5
	12	2,3	32,7
	13	2,3	14,6
	14	2	10,8
	15	2	10,5
	16	7,57	11,3
	17	7,57	10,5
	18	7,57	9,8
	19	7,57	12,3
	20	7,57	12,1
	21	7,57	10,5
	22	7,57	11,4
Nº Experimento	23	7,57	11,3
	24	7,57	11,2
	25	7,57	16,4
	26	7,57	11,6
	27	7,57	12,8
	28	7,57	9,7
	29	7,57	10,5
	30	7,57	11,4
	31	7,57	9,9
	32	7,57	10,5
	33	7,57	11
	34	7,57	11,2
	35	7,57	11,9
	36	7,57	13,1
	37	7,57	11,7
	38	7,57	11,2
	39	7,57	13,5
	40	7,57	13,5
	41	7,57	13
	42	7,57	12,3
	43	7,57	12,2
	44	7,57	12,4
	45	7,57	11,9

A tabela 59 apresenta a energia absorvida pela água para cada caso, e energia fornecida pelo combustível, bem como a eficiência do processo de transferência de energia térmica para a água de refrigeração.

Tabela 59 – Energia Fornecida pelo combustível, calor absorvido pela água e eficiência do processo para a segunda bateria de testes.

	Calor absorvido pela água(kJ/s)	Calor fornecido pelo GLP(kJ/s)	Eficiência (%)
	1	5,17	73,7
	2	4,9	77,7
	3	5,44	86
	4	5,06	78,9
	5	5,17	84
	6	4,91	77
	7	4,915	78
	8	4,72	74
	9	5,3	83
	10	5,154	81
	11	5,4	85
	12	5,18	81
Nº Experimento	13	4,62	51
	14	5,7	76
	15	5,56	74
	16	5,96	83
	17	5,52	77
	18	5,17	72
	19	6,48	80
	20	6,38	78
	21	5,56	78
	22	5,99	84
	23	5,95	83
	24	5,92	83
	25	8,67	84

Tabela 59 – Energia Fornecida pelo combustível, calor absorvido pela água e eficiência do processo para a segunda bateria de testes.

		Calor absorvido pela água(kJ/s)	Calor fornecido pelo GLP(kJ/s)	Eficiência (%)
	26	6,113	7,45	82
	27	6,741	8,08	83,4
	28	5,108	6,37	80,2
	29	5,556	7,113	78
	30	6,025	7,49	80,5
	31	5,208	6,783	76,8
	32	5,539	7,147	77,5
	33	5,819	7,147	81,4
	34	5,899	8,122	72,6
Nº Experimento	35	6,28	8,122	77,3
	36	6,912	8,131	85
	37	6,196	8,131	76,2
	38	5,903	8,131	72,6
	39	7,13	8,131	87,7
	40	7,113	8,131	87,5
	41	6,845	8,131	84,2
	42	6,473	7,972	81,2
	43	6,435	8,131	79,2
	44	6,523	8,453	77,2
	45	6,305	8,131	77,5

Somado aos dados acima, temos o calor roubado pelos gases calculado pela equação 60. Ao total, o calor absorvido pela água mais o calor absorvido pelos gases é dado pela tabela 60:

Tabela 60 – Calor total absorvido pelo sistema na segunda bateria de testes

Nº	Calor perdido pelos gases + calor absorvido pela água (kJ/s)	erro
1	6,322	0,165
2	6,125	0,0472
3	6,109	0,0506
4	5,702	0,169
5	5,753	0,092
6	5,313	0,252
7	5,095	0,216
8	5,916	0,1079
9	5,933	0,107
10	5,803	0,1352
11	6,088	0,067
12	5,999	0,088
13	5,652	0,79
14	6,536	0,227
15	6,1	0,332
16	6,515	0,151
17	6,2	0,226
18	5,983	0,278
19	7,499	0,141
20	7,197	0,222
21	6,427	0,1636
22	6,82	0,077
23	6,774	0,0891
24	6,778	0,0878
25	10,178	0,0266
26	6,690	0,182
27	7,766	0,077
28	5,815	0,133
29	6,1	0,2399
30	6,925	0,135
31	5,962	0,197
32	6,335	0,194
33	6,607	0,129
34	6,912	0,29
35	7,243	0,212
36	7,595	0,128
37	7,126	0,239
38	7,44	0,165
39	8,122	0,0011
40	7,829	0,073
41	7,804	0,077
42	7,209	0,182
43	7,402	0,173
44	7,256	0,286
45	7,373	0,181

Nesta bateria o problema de formação de NO_x ainda se fazia presente devido a atmosfera que se formava no alto na câmara bem como as baixas temperaturas nas paredes que condensavam a água. Esta por sua vez, escorria em volta da chama devido

a ausência de um fluxo turbulento que a arrastasse para fora da câmara. Altas concentrações de oxigênio, bem acima da estequiométrica, também favoreceram o mecanismo de formação de NO_x , cuja concentração variou de 80 a 1000ppm.

O numero de Reynolds esteve entre 80 e 270; para que estes números se aproximem dos valores obtidos nos testes com ar a câmara deveria ter seu diâmetro reduzido de 70% a 90%. Na tabela 61 é feita a comparação entre os testes com ar e oxigênio puro.

Tabela 61 – Comparação entre os testes feitos com ar e testes feitos com oxigênio puro na segunda bateria

nº teste	Temperatura dos Gases de Exaustão (°C)	Massa de oxidante (kg/s)	Massa de GLP (kg/s)	Relação ar/comb (massa)	Redução consumo glp em relação ao teste com ar (%)
1º teste ar	626	$8,08 \cdot 10^{-3}$	$0,491 \cdot 10^{-3}$	16,45	-
1º O2	482	$2,19 \cdot 10^{-3}$	$0,152 \cdot 10^{-3}$	14,42	69

nº teste	Temperatura dos Gases de Exaustão (°C)	Massa de oxidante (kg/s)	Massa de GLP (kg/s)	Relação ar/comb (massa)	Redução consumo glp em relação ao teste com ar (%)
2º teste ar	653	$8,45 \cdot 10^{-3}$	$0,491 \cdot 10^{-3}$	17,2	-
2º O2	498	$2,24 \cdot 10^{-3}$	$0,137 \cdot 10^{-3}$	16,36	72

Nº teste	Temperatura dos Gases de Exaustão (°C)	Massa de oxidante (kg/s)	Massa de GLP (kg/s)	Relação ar/comb (massa)	Redução consumo glp em relação ao teste com ar (%)
3º teste ar	664	$8,26 \cdot 10^{-3}$	$0,484 \cdot 10^{-3}$	17,1	-
3º O2	564	$0,86 \cdot 10^{-3}$	$0,137 \cdot 10^{-3}$	6,31	71,7

Tabela 61 – Comparação entre os testes feitos com ar e testes feitos com oxigênio puro na segunda bateria

nº teste	Temperatura dos Gases de Exaustão (°C)	Massa de oxidante (kg/s)	Massa de GLP (kg/s)	Relação ar/comb (massa)	Redução consumo glp em relação ao teste com ar (%)
4º teste ar	671	$8,19 \cdot 10^{-3}$	$0,503 \cdot 10^{-3}$	16,27	-
4º O2	529	$0,9 \cdot 10^{-3}$	$0,139 \cdot 10^{-3}$	6,5	72,4

nº teste	Temperatura dos Gases de Exaustão (°C)	Massa de oxidante (kg/s)	Massa de GLP (kg/s)	Relação ar/comb (massa)	Redução consumo glp em relação ao teste com ar (%)
5º teste ar	643	$8,12 \cdot 10^{-3}$	$0,481 \cdot 10^{-3}$	16,9	-
5º O2	528	$0,81 \cdot 10^{-3}$	$0,133 \cdot 10^{-3}$	6,11	72,3
6º O2	477	$0,55 \cdot 10^{-3}$	$0,138 \cdot 10^{-3}$	3,99	71,3
7º O2	494	$0,57 \cdot 10^{-3}$	$0,13 \cdot 10^{-3}$	4,51	73

nº teste	Temperatura dos Gases de Exaustão (°C)	Massa de oxidante (kg/s)	Massa de GLP (kg/s)	Relação ar/comb (massa)	Redução consumo glp em relação ao teste com ar (%)
6º teste ar	644	$8,19 \cdot 10^{-3}$	$0,481 \cdot 10^{-3}$	17	-
8º O2	487	$2,24 \cdot 10^{-3}$	$0,138 \cdot 10^{-3}$	16,2	71,3

nº teste	Temperatura dos Gases de Exaustão (°C)	Massa de oxidante (kg/s)	Massa de GLP (kg/s)	Relação ar/comb (massa)	Redução consumo glp em relação ao teste com ar (%)
7º teste ar	657	$8,15 \cdot 10^{-3}$	$0,495 \cdot 10^{-3}$	16,5	-
9º O2	544	$0,85 \cdot 10^{-3}$	$0,138 \cdot 10^{-3}$	6,1	71,3
10º O2	546	$1,09 \cdot 10^{-3}$	$0,138 \cdot 10^{-3}$	7,9	71,3
11º O2	545	$1,09 \cdot 10^{-3}$	$0,138 \cdot 10^{-3}$	7,9	71,3
12º O2	541	$1,23 \cdot 10^{-3}$	$0,138 \cdot 10^{-3}$	8,9	71,3
13º O2	615	$1,23 \cdot 10^{-3}$	$0,194 \cdot 10^{-3}$	6,3	59,6

nº teste	Temperatura dos Gases de Exaustão (°C)	Massa de oxidante (kg/s)	Massa de GLP (kg/s)	Relação ar/comb (massa)	Redução consumo glp em relação ao teste com ar (%)
8º teste ar	636	$8,26 \cdot 10^{-3}$	$0,498 \cdot 10^{-3}$	16,6	-
14º O2	600	$1,08 \cdot 10^{-3}$	$0,162 \cdot 10^{-3}$	6,7	66
15º O2	524	$0,64 \cdot 10^{-3}$	$0,162 \cdot 10^{-3}$	3,93	66

Tabela 61 – Comparação entre os testes feitos com ar e testes feitos com oxigênio puro na segunda bateria

nº teste	Temperatura dos Gases de Exaustão (°C)	Massa de oxidante (kg/s)	Massa de GLP (kg/s)	Relação ar/comb (massa)	Redução consumo glp em relação ao teste com ar (%)
9º teste ar	653	$8,15 \cdot 10^{-3}$	$0,489 \cdot 10^{-3}$	16,7	-
16º O2	535	$0,68 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$	4,39	67,8
17º O2	550	$0,89 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$	5,80	67,8
18º O2	541	$1,13 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$	7,28	67,8
19º O2	622	$1,23 \cdot 10^{-3}$	$0,175 \cdot 10^{-3}$	7,02	63,6
20º O2	605	$0,94 \cdot 10^{-3}$	$0,176 \cdot 10^{-3}$	5,31	63,4
21º O2	569	$1,19 \cdot 10^{-3}$	$0,154 \cdot 10^{-3}$	7,75	68
22º O2	575	$1,09 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$	7,03	67,8
23º O2	565	$1,11 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$	7,2	67,8
24º O2	568	$1,15 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$	7,46	67,8
25º O2	682	$1,67 \cdot 10^{-3}$	$0,223 \cdot 10^{-3}$	7,48	53,6

nº teste	Temperatura dos Gases de Exaustão (°C)	Massa de oxidante (kg/s)	Massa de GLP (kg/s)	Relação ar/comb (massa)	Redução consumo glp em relação ao teste com ar (%)
10º teste ar	680	$8,34 \cdot 10^{-3}$	$0,489 \cdot 10^{-3}$	17	-
26º O2	552	$0,65 \cdot 10^{-3}$	$0,161 \cdot 10^{-3}$	4,05	66,4
27º O2	647	$1,14 \cdot 10^{-3}$	$0,175 \cdot 10^{-3}$	6,51	63,6
28º O2	583	$0,88 \cdot 10^{-3}$	$0,138 \cdot 10^{-3}$	6,39	71,3
29º O2	534	$0,65 \cdot 10^{-3}$	$0,154 \cdot 10^{-3}$	4,22	68
30º O2	630	$1,03 \cdot 10^{-3}$	$0,162 \cdot 10^{-3}$	6,35	66,3

nº teste	Temperatura dos Gases de Exaustão (°C)	Massa de oxidante (kg/s)	Massa de GLP (kg/s)	Relação ar/comb (massa)	Redução consumo glp em relação ao teste com ar (%)
11º teste ar	707	$7,93 \cdot 10^{-3}$	$0,478 \cdot 10^{-3}$	16,57	-
31º O2	573	$0,95 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$	6,11	67,8
32º O2	594	$0,95 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$	6,11	67,8

nº teste	Temperatura dos Gases de Exaustão (°C)	Massa de oxidante (kg/s)	Massa de GLP (kg/s)	Relação ar/comb (massa)	Redução consumo glp em relação ao teste com ar (%)
12º teste ar	679	$8,57 \cdot 10^{-3}$	$0,493 \cdot 10^{-3}$	17,4	-
33º O2	589	$0,95 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$	6,11	67,8

Tabela 61 – Comparação entre os testes feitos com ar e testes feitos com oxigênio puro na segunda bateria

nº teste	Temperatura dos Gases de Exaustão (°C)	Massa de oxidante (kg/s)	Massa de GLP (kg/s)	Relação ar/comb (massa)	Redução consumo glp em relação ao teste com ar (%)
13º teste ar	684	$8,49 \cdot 10^{-3}$	$0,494 \cdot 10^{-3}$	17,17	-
34º O2	617	$1,19 \cdot 10^{-3}$	$0,176 \cdot 10^{-3}$	6,78	63,4

nº teste	Temperatura dos Gases de Exaustão (°C)	Massa de oxidante (kg/s)	Massa de GLP (kg/s)	Relação ar/comb (massa)	Redução consumo glp em relação ao teste com ar (%)
14º teste ar	707	$8,18 \cdot 10^{-3}$	$0,498 \cdot 10^{-3}$	16,4	-
35º O2	632	$1,06 \cdot 10^{-3}$	$0,176 \cdot 10^{-3}$	6,02	63,4

nº teste	Temperatura dos Gases de Exaustão (°C)	Massa de oxidante (kg/s)	Massa de GLP (kg/s)	Relação ar/comb (massa)	Redução consumo glp em relação ao teste com ar (%)
15º teste ar	704	$8,16 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$	16,3	-
36º O2	586	$0,71 \cdot 10^{-3}$	$0,176 \cdot 10^{-3}$	4,03	63,4
37º O2	615	$1,06 \cdot 10^{-3}$	$0,176 \cdot 10^{-3}$	6,02	63,4
38º O2	521,6	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$0,176 \cdot 10^{-3}$	14,8	63,4

nº teste	Temperatura dos Gases de Exaustão (°C)	Massa de oxidante (kg/s)	Massa de GLP (kg/s)	Relação ar/comb (massa)	Redução consumo glp em relação ao teste com ar (%)
16º teste ar	688,6	$8,13 \cdot 10^{-3}$	$0,491 \cdot 10^{-3}$	16,55	-
39º O2	653	$1,06 \cdot 10^{-3}$	$0,176 \cdot 10^{-3}$	6,025	63,4
40º O2	604	$0,71 \cdot 10^{-3}$	$0,176 \cdot 10^{-3}$	4,03	63,4

nº teste	Temperatura dos Gases de Exaustão (°C)	Massa de oxidante (kg/s)	Massa de GLP (kg/s)	Relação ar/comb (massa)	Redução consumo glp em relação ao teste com ar (%)
17º teste ar	685	$7,87 \cdot 10^{-3}$	$0,496 \cdot 10^{-3}$	15,87	-
41º O2	649	$1,06 \cdot 10^{-3}$	$0,176 \cdot 10^{-3}$	6,025	63,4

nº teste	Temperatura dos Gases de Exaustão (°C)	Massa de oxidante (kg/s)	Massa de GLP (kg/s)	Relação ar/comb (massa)	Redução consumo glp em relação ao teste com ar (%)
18º teste ar	688,6	$8,22 \cdot 10^{-3}$	$0,497 \cdot 10^{-3}$	16,5	-
42º O2	604	$0,77 \cdot 10^{-3}$	$0,173 \cdot 10^{-3}$	4,47	64
43º O2	635	$1,06 \cdot 10^{-3}$	$0,176 \cdot 10^{-3}$	6,025	63,4

Tabela 61 – Comparação entre os testes feitos com ar e testes feitos com oxigênio puro na segunda bateria

nº teste	Temperatura dos Gases de Exaustão (°C)	Massa de oxidante (kg/s)	Massa de GLP (kg/s)	Relação ar/comb (massa)	Redução consumo glp em relação ao teste com ar (%)
19º teste ar	689	$8,62 \cdot 10^{-3}$	$0,496 \cdot 10^{-3}$	17,4	-
44º O2	603	$0,74 \cdot 10^{-3}$	$0,183 \cdot 10^{-3}$	4,024	61,9
45º O2	622	$1,25 \cdot 10^{-3}$	$0,183 \cdot 10^{-3}$	6,81	61,9

4.4 TERCEIRA BATERIA DE TESTES

4.4.1 Queima com ar

Estes testes foram realizados na terceira montagem da câmara cujo esquema esta demonstrado nas figuras 32, 33 e 34 e servirão para comparar com os experimentos realizados com oxigênio puro. A placa de orifício para medição de vazão de ar foi mantida, assim como a placa de orifício de 9,52mm para a alimentação de oxigênio. As concentrações de GLP e ar utilizadas para cada experimento estão demonstradas na tabela 62. As temperaturas e as concentrações de oxigênio na exaustão estão demonstradas na figura 46. A figura 46-a apresenta alguns picos no inicio do teste que depois se estabilizam devido ao tempo de resposta do analisador.

Tabela 62 – Concentrações de GLP e ar utilizados nos testes da terceira bateria

	Nº Experimento					
	1	2	3	4	5	6
Ar(kg/s)	$7,57 \cdot 10^{-3}$	$7,83 \cdot 10^{-3}$	$7,95 \cdot 10^{-3}$	$7,87 \cdot 10^{-3}$	$7,83 \cdot 10^{-3}$	$7,7 \cdot 10^{-3}$
GLP(kg/s)	$0,46 \cdot 10^{-3}$	$0,49 \cdot 10^{-3}$	$0,48 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$0,49 \cdot 10^{-3}$	$0,47 \cdot 10^{-3}$

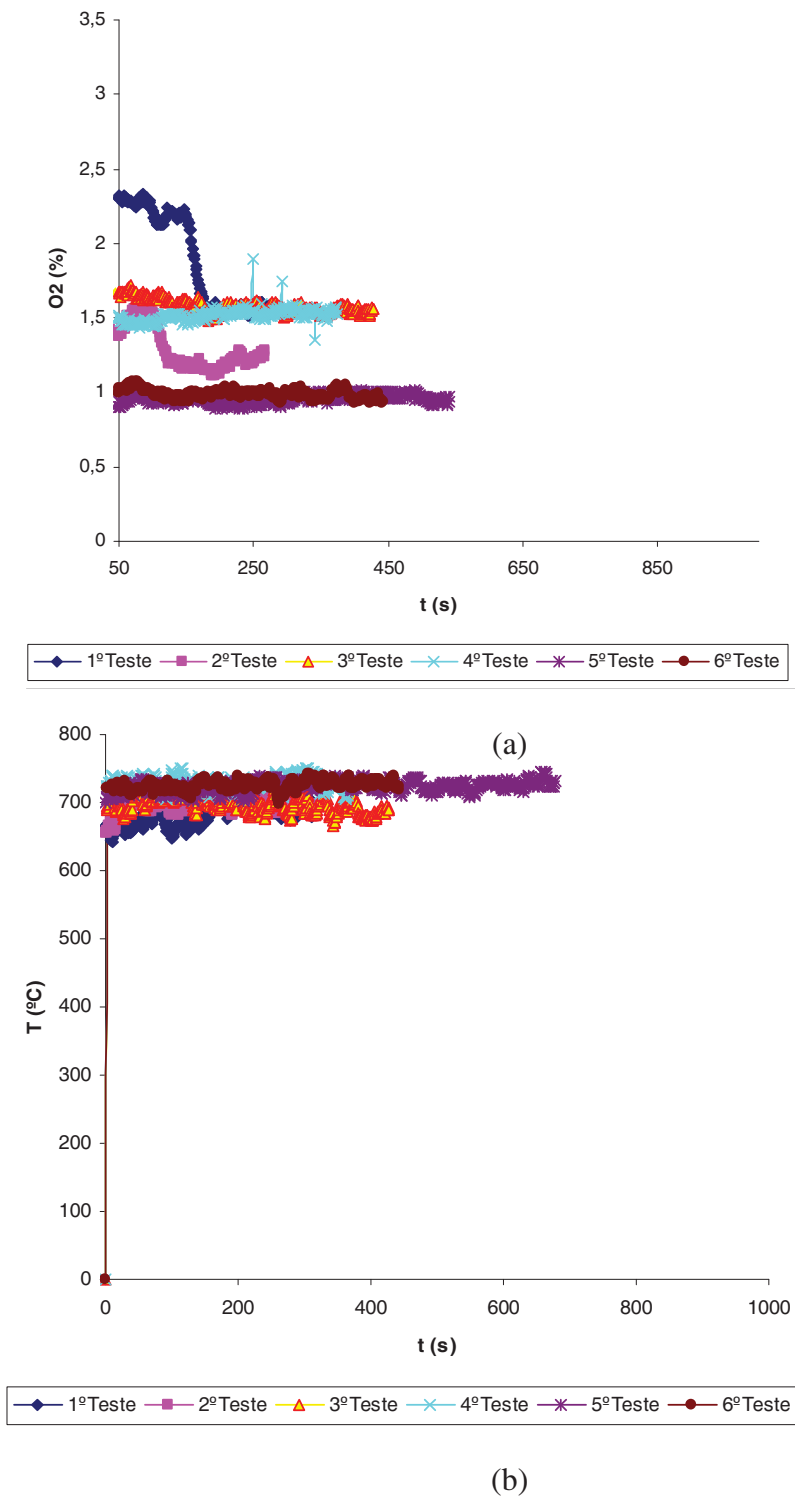
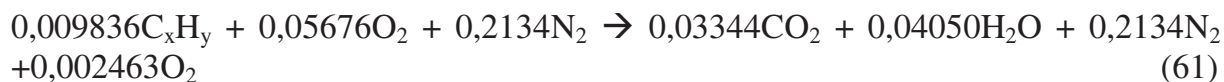


Figura 46 – Concentração de oxigênio na exaustão nos testes da terceira bateria e a temperatura dos mesmos

Nestas condições, têm-se a seguinte concentração média para os testes:



Para o balanço de energia, a tabela 63 apresenta a vazão utilizada de água bem como a variação de temperatura do momento em que entra na câmara até sua saída:

Tabela 63 – Vazão volumétrica de água de refrigeração e sua variação de temperatura para testes com ar para a terceira bateria de testes

	Nº Experimento					
	1	2	3	4	5	6
Água(l/min)	7,57	7,57	7,57	7,57	7,57	7,57
$\Delta T(^{\circ}C)$	20,7	24,7	27,2	25	27,8	27,8

A tabela 64 apresenta a energia absorvida pela água para cada caso, e energia fornecida pelo combustível, bem como a eficiência do processo na terceira bateria de testes.

Tabela 64 – Energia Fornecida pelo combustível, calor absorvido pela água e eficiência do processo para a terceira bateria de testes

	Nº Experimento					
	1	2	3	4	5	6
Calor absorvido pela água(kJ/s)	10,886	13,017	14,352	13,226	14,675	10,886
Calor fornecido pelo GLP(kJ/s)	21,26	22,814	21,968	23,082	22,73	21,26
Eficiência (%)	51,3	57	65,3	57,3	64,6	67,6

Somado aos dados acima, temos o calor roubado pelos gases calculado pela equação 53. Ao total, o calor absorvido pela água mais o calor absorvido pelos gases é dado pela tabela 65:

Tabela 65 – Calor total absorvido pelo sistema na terceira bateria de testes

Nº	Calor perdido pelos gases + calor absorvido pela água		erro
	(kJ/s)		
1	17,124		0,987
2	19,439		0,806
3	20,926		0,248
4	19,971		0,739
5	21,436		0,309
6	21,365		0,0847

O número de Reynolds para estes testes esteve entre 840 e 865, na mesma ordem de grandeza em relação aos testes anteriores com ar.

4.4.2 Queima com oxigênio puro

As concentrações utilizadas nos testes são dadas na tabela 66:

Tabela 66 – Concentrações de oxigênio e GLP usados para a terceira bateria de testes

Nº Experimento	Concentrações	
	O ₂ (kg/s)	GLP(kg/s)
1	$0,83 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$
2	$1,22 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$
3	$0,753 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$
4	$1,434 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$
5	$1,15 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$
6	$1,25 \cdot 10^{-3}$	$0,169 \cdot 10^{-3}$
7	$1,066 \cdot 10^{-3}$	$0,176 \cdot 10^{-3}$
8	$0,77 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$
9	$0,91 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$
10	$0,91 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$
11	$0,91 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$
12	$0,77 \cdot 10^{-3}$	$0,146 \cdot 10^{-3}$
13	$0,99 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$
14	$0,81 \cdot 10^{-3}$	$0,15 \cdot 10^{-3}$
15	$1,203 \cdot 10^{-3}$	$0,173 \cdot 10^{-3}$
16	$0,654 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$
17	$1,14 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$
18	$0,7 \cdot 10^{-3}$	$0,138 \cdot 10^{-3}$
19	$0,91 \cdot 10^{-3}$	$0,137 \cdot 10^{-3}$
20	$0,77 \cdot 10^{-3}$	$0,19 \cdot 10^{-3}$
21	$0,82 \cdot 10^{-3}$	0,205
22	$0,767 \cdot 10^{-3}$	$0,205 \cdot 10^{-3}$

O consumo de oxigênio e a temperatura dos processos na terceira bateria são dados nos gráficos conforme as figuras 47, 48, 49. O pico apresentado na figura 47-b deve-se a variação na leitura do equipamento. O tempo de resposta do mesmo também gerou inclinações nas curvas das figuras 48-a, 50-a, 51-a, 51-b e 52-a.

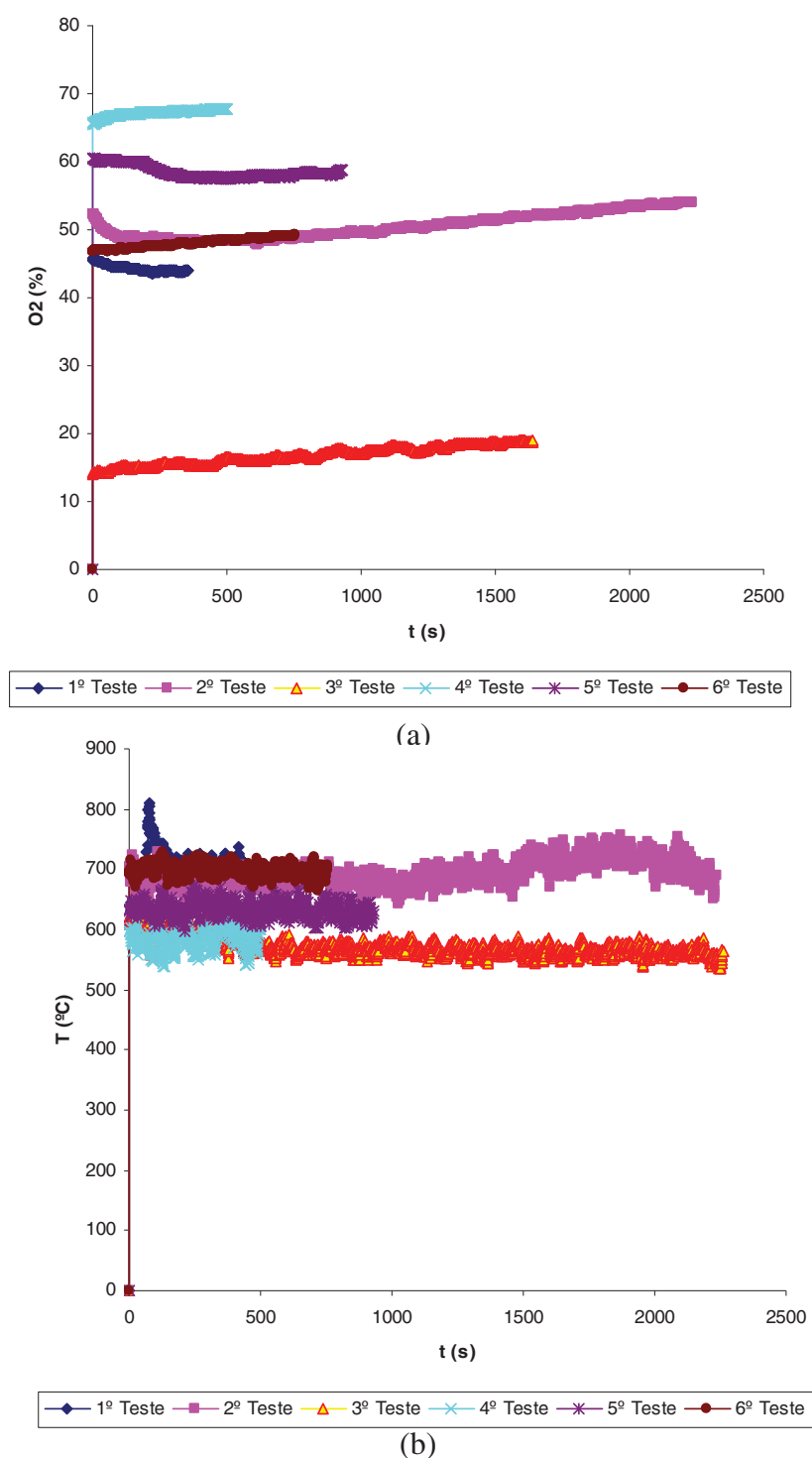
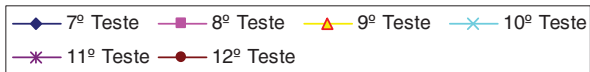
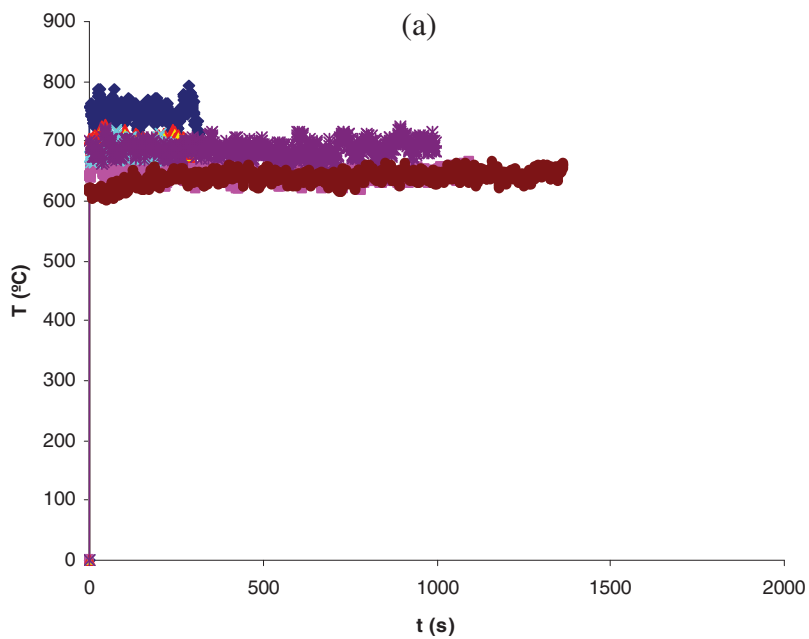
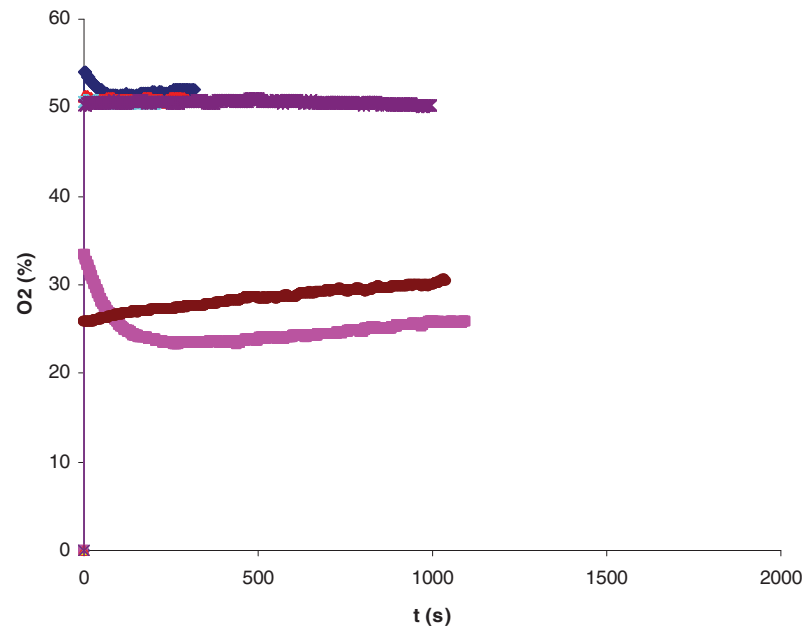


Figura 47 – Comportamento da temperatura e concentração de oxigênio na exaustão para os testes de 1 a 6 para a terceira bateria de testes



(b)
Figura 48 – Comportamento da temperatura e concentração de oxigênio na exaustão para os testes de 7 a 12 para a terceira bateria de testes

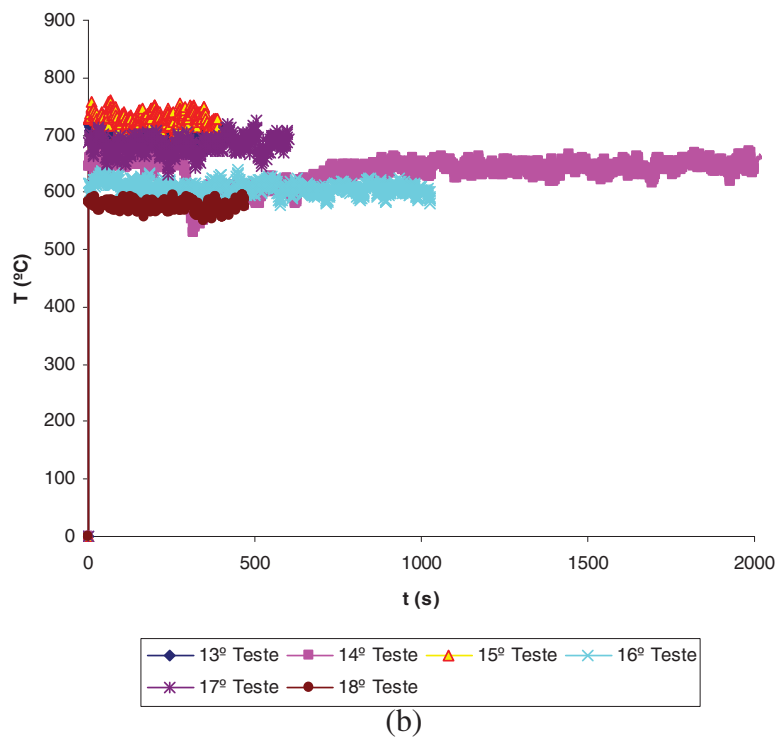
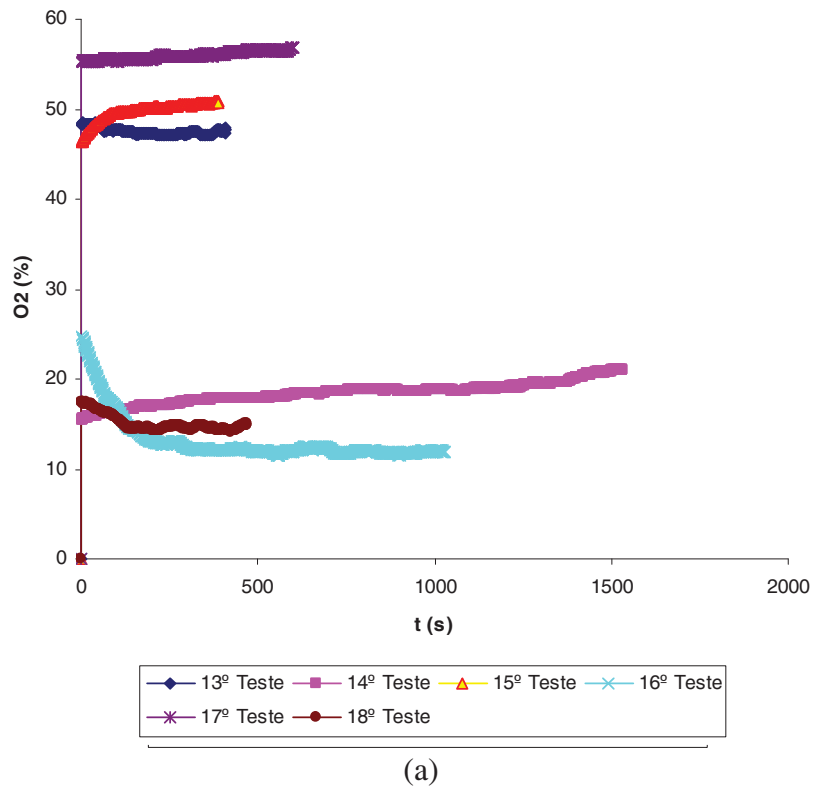


Figura 49 – Comportamento da temperatura e concentração de oxigênio na exaustão para os testes de 13 a 18 para a terceira bateria de testes

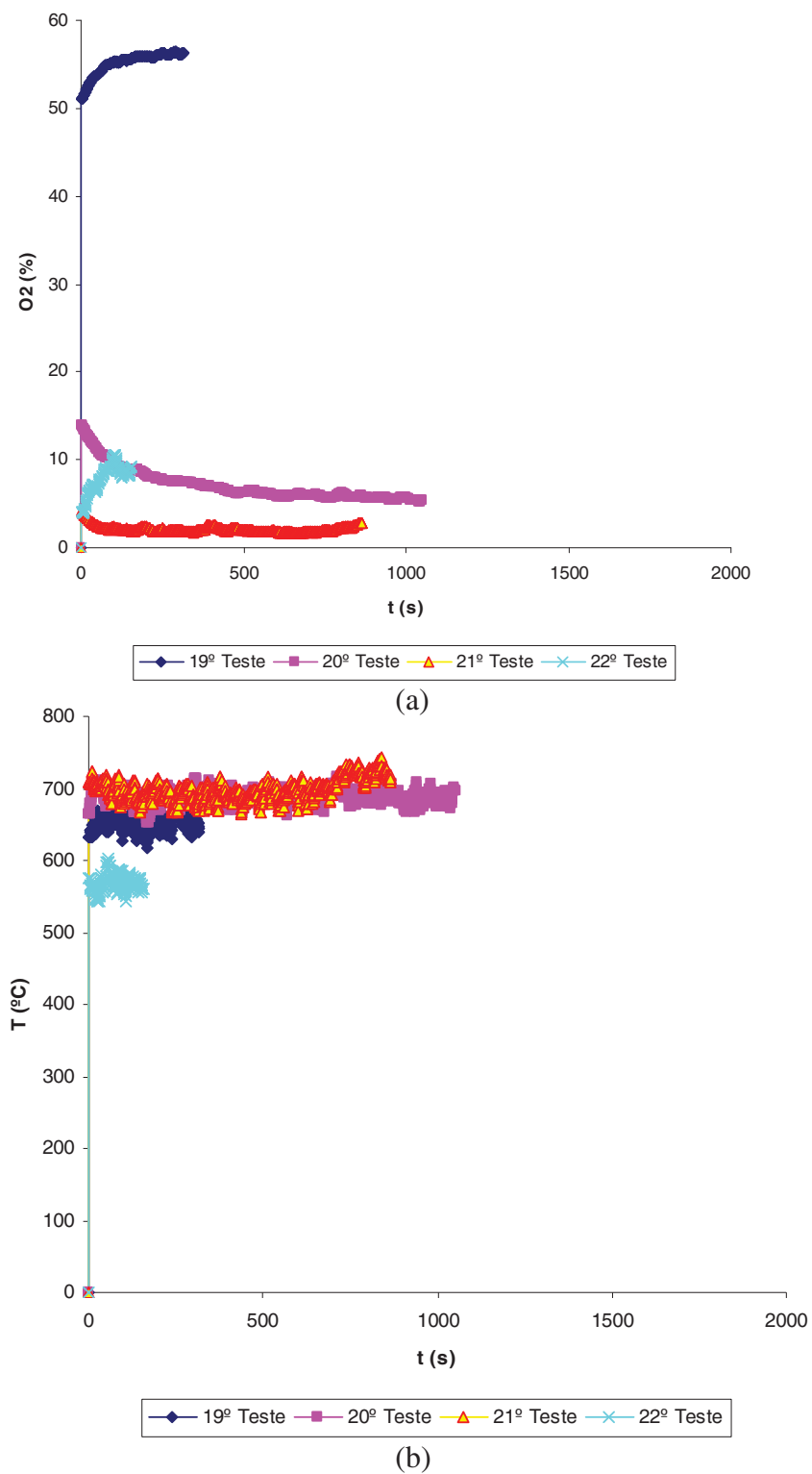


Figura 50 – Comportamento da temperatura e concentração de oxigênio na exaustão para os testes de 19 a 22 para a terceira bateria de testes

Segue também as concentrações de NOx na exaustão dos testes nas figuras 51 e 52. Nota-se que os valores são consideravelmente mais baixos que os obtidos nos testes anteriores que atingiam escalas de 300 a 1000ppm.

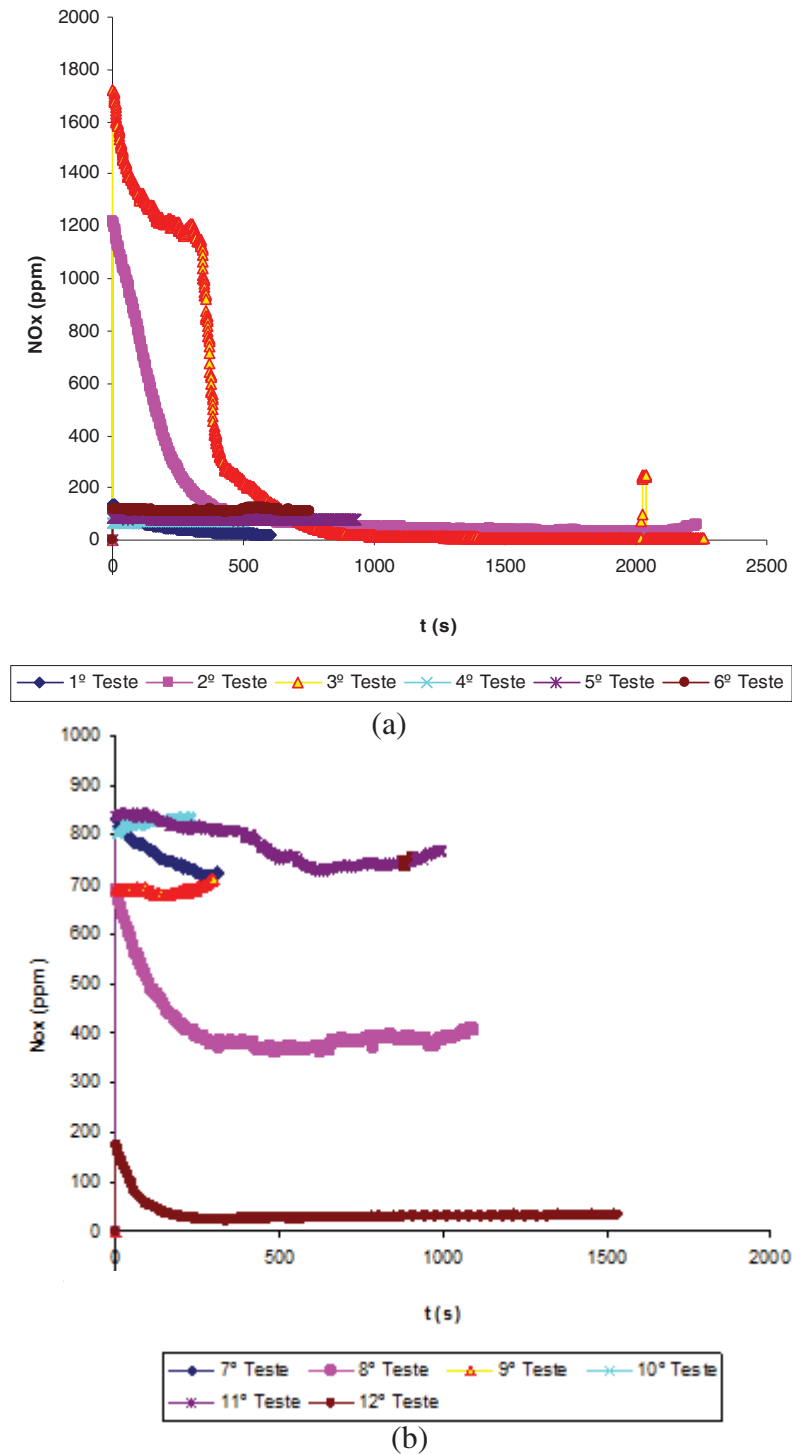
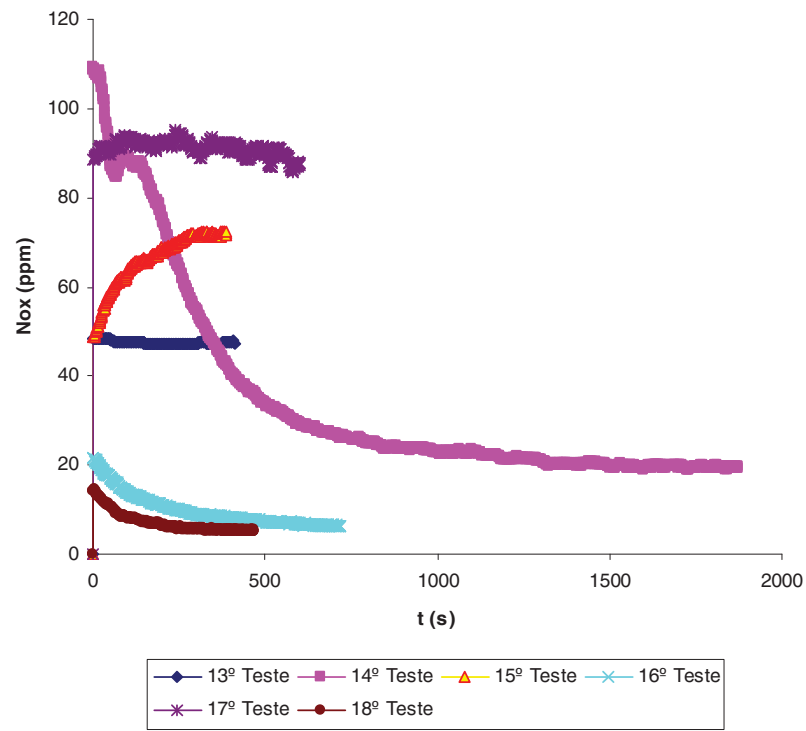
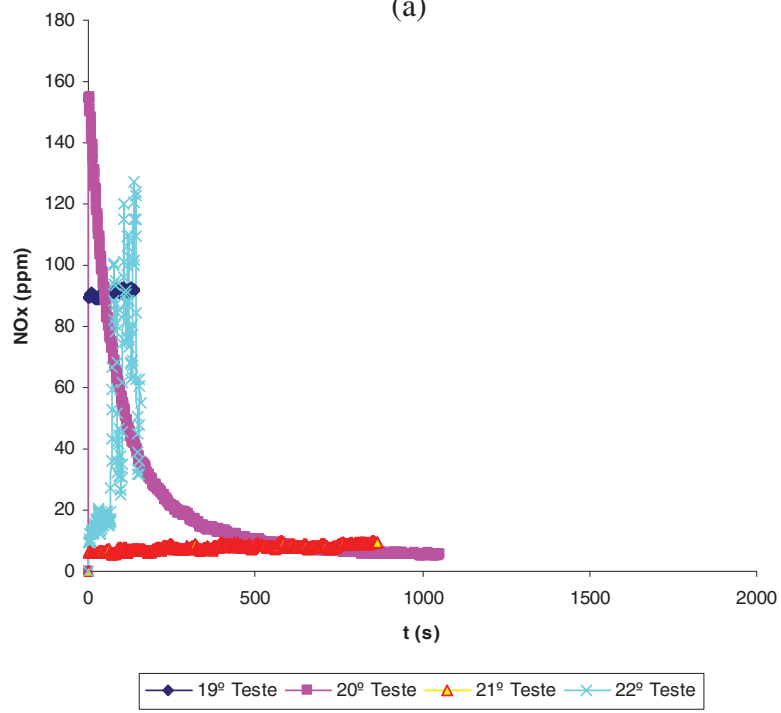


Figura 51 –Concentração de NOx na exaustão para os testes de 1 a 12 para a terceira bateria de testes



(a)



(b)

Figura 52 –Concentração de NOx na exaustão para os testes de 13 a 22 para a terceira bateria de testes

Para o balanço de energia, a tabela 67 apresenta a vazão utilizada de água bem como a variação de temperatura do momento em que entra na câmara até sua saída:

Tabela 67 – Vazão volumétrica de água de refrigeração e sua variação de temperatura para testes com oxigênio puro para a terceira bateria de testes

		Água(l/min)	$\Delta T(^{\circ}C)$
	1	7,57	10,8
	2	7,57	10,5
	3	7,57	9,9
	4	7,57	10
	5	7,57	10,7
	6	7,57	11,7
	7	7,57	13,6
	8	7,57	11,5
	9	7,57	11,3
	10	5,3	14,4
Nº Experimento	11	2,65	30
	12	7,57	11,9
	13	7,57	12,2
	14	4,54	20
	15	6,4	15,9
	16	2,65	11,2
	17	7,57	9,7
	18	7,57	9,33
	19	4,54	8,8
	20	6,4	13,9
	21	7,57	14,9
	22	7,57	13,8

A tabela 68 apresenta a energia absorvida pela água para cada caso, e energia fornecida pelo combustível, bem como a eficiência do processo.

Tabela 68 – Energia Fornecida pelo combustível, calor absorvido pela água e eficiência do processo para a terceira bateria de testes

		Calor absorvido pela água(kJ/s)	Calor fornecido pelo GLP(kJ/s)	Eficiência (%)
	1	5,694	7,159	79
	2	5,527	7,151	77,3
	3	5,233	7,151	73
	4	5,275	7,151	73,8
	5	5,652	7,151	79
	6	6,155	7,787	78
	7	7,159	8,122	88,3
	8	6,079	7,151	84,9
	9	5,954	7,151	83
	10	5,317	7,151	74,5
Nº	11	5,56	7,151	77,7
Experimento	12	6,293	6,732	93,5
	13	6,456	7,151	90,2
	14	6,364	7,034	90,5
	15	7,147	7,997	89,4
	16	5,933	7,151	82,9
	17	5,149	7,151	71,9
	18	4,924	6,364	77,5
	19	4,626	6,364	72,8
	20	7,335	8,649	84,8
	21	7,913	9,462	83,5
	22	7,297	9,462	77,13

Somado aos dados acima, temos o calor roubado pelos gases calculado pela equação 60. Ao total, o calor absorvido pela água mais o calor absorvido pelos gases é dado pela tabela 69:

Tabela 69 – Calor total absorvido pelo sistema na terceira bateria de testes

Nº	Calor perdido pelos gases + calor absorvido pela água	
	(kJ/s)	erro
1	6,544	0,146
2	6,615	0,124
3	5,882	0,303
4	6,33	0,196
5	6,64	0,123
6	7,339	0,110
7	8,289	0,038
8	6,824	0,0836
9	6,833	0,0768
10	6,192	0,229
11	6,431	0,173
12	7,013	0,067
13	7,427	0,065
14	7,155	0,0288
15	8,323	0,0772
16	6,573	0,138
17	6,209	0,226
18	5,527	0,197
19	5,451	0,2156
20	8,215	0,1043
21	8,872	0,1414
22	8,034	0,3413

Nesta bateria o problema de formação de NO_x foi resolvido a partir do total isolamento da câmara e diminuição do seu tamanho com o intuito de evitar a formação de atmosfera no alto. As baixas temperaturas nas paredes ainda condensavam a água, que, por sua vez, escorria em volta da chama, o que fornecia mais radicais OH que favorecem a formação de NO_x . Porém com a ausência de nitrogênio, a concentração de NO_x atingiu para boa parte dos testes valores abaixo dos registrados com a queima com ar. O número de Reynolds esteve entre 88 e 160. A tabela 70 apresenta a comparação entre os resultados obtidos para a queima com ar e com oxigênio.

Tabela 70 – Comparação entre os testes feitos com ar e testes feitos com oxigênio puro na terceira bateria de testes.

nº teste	Temperatura dos Gases de Exaustão (°C)	Massa de oxidante (kg/s)	Massa de GLP (kg/s)	Relação ar/comb (massa)	Redução consumo glp em relação ao teste com ar (%)
1º teste ar	692	$7,57 \cdot 10^{-3}$	$0,46 \cdot 10^{-3}$	16,4	-
1º O2	694	$0,83 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$	5,36	66

nº teste	Temperatura dos Gases de Exaustão (°C)	Massa de oxidante (kg/s)	Massa de GLP (kg/s)	Relação ar/comb (massa)	Redução consumo glp em relação ao teste com ar (%)
2º teste ar	695	$7,83 \cdot 10^{-3}$	$0,49 \cdot 10^{-3}$	15,8	-
2º O2	693	$1,22 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$	7,86	68,6

nº teste	Temperatura dos Gases de Exaustão (°C)	Massa de oxidante (kg/s)	Massa de GLP (kg/s)	Relação ar/comb (massa)	Redução consumo glp em relação ao teste com ar (%)
3º teste ar	697	$7,95 \cdot 10^{-3}$	$0,475 \cdot 10^{-3}$	16,7	-
3º O2	572	$0,75 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$	4,86	67,4
4º O2	584	$1,44 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$	9,27	67,4
5º O2	633	$1,15 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$	7,43	67,4
6º O2	696	$1,25 \cdot 10^{-3}$	$0,169 \cdot 10^{-3}$	7,37	64,5

nº teste	Temperatura dos Gases de Exaustão (°C)	Massa de oxidante (kg/s)	Massa de GLP (kg/s)	Relação ar/comb (massa)	Redução consumo glp em relação ao teste com ar (%)
4º teste ar	729	$7,87 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$	15,8	-
7º O2	748	$1,07 \cdot 10^{-3}$	$0,176 \cdot 10^{-3}$	6,1	64,8
8º O2	644	$0,76 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$	5	67,4
9º O2	694	$0,91 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$	5,9	67,4
10º O2	686	$0,91 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$	5,9	67,4
11º O2	687	$0,91 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$	5,9	67,4

nº teste	Temperatura dos Gases de Exaustão (°C)	Massa de oxidante (kg/s)	Massa de GLP (kg/s)	Relação ar/comb (massa)	Redução consumo glp em relação ao teste com ar (%)
5º teste ar	725	$7,8 \cdot 10^{-3}$	$0,492 \cdot 10^{-3}$	15,9	-
12º O2	635	$0,77 \cdot 10^{-3}$	$0,146 \cdot 10^{-3}$	5,26	70,4
13º O2	702	$0,99 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$	6,4	67,4

Tabela 70 – Comparação entre os testes feitos com ar e testes feitos com oxigênio puro na terceira bateria de testes.

nº teste	Temperatura dos Gases de Exaustão (°C)	Massa de oxidante (kg/s)	Massa de GLP (kg/s)	Relação ar/comb (massa)	Redução consumo glp em relação ao teste com ar (%)
6º teste ar	727	$7,7 \cdot 10^{-3}$	$0,471 \cdot 10^{-3}$	16,4	-
14º O2	647	$0,81 \cdot 10^{-3}$	$0,152 \cdot 10^{-3}$	5,32	67,62
15º O2	728	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$0,173 \cdot 10^{-3}$	6,9	63,6
16º O2	608	$0,65 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$	4,22	67,4
17º O2	683	$1,14 \cdot 10^{-3}$	$0,155 \cdot 10^{-3}$	7,36	67,4
18º O2	576	$0,7 \cdot 10^{-3}$	$0,137 \cdot 10^{-3}$	5,08	71
19º O2	651	$0,91 \cdot 10^{-3}$	$0,138 \cdot 10^{-3}$	6,597	71
20º O2	688	$0,77 \cdot 10^{-3}$	$0,187 \cdot 10^{-3}$	4,09	60,6
21º O2	698	$0,82 \cdot 10^{-3}$	$0,205 \cdot 10^{-3}$	3,984	56,9
22º O2	569	$0,77 \cdot 10^{-3}$	$0,205 \cdot 10^{-3}$	3,74	56,9

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo estudar a viabilidade da substituição da queima convencional feita com ar, pela feita com oxigênio puro em equipamentos industriais de queima direta.

Como pode ser visto, a queima com oxigênio puro se mostra promissora como opção a queima com ar, começando com as emissões de poluentes. Durante as simulações onde foram feitos testes para o gás natural, pode ser observado nas tabelas 5 e 11 que as emissões em termos de fração molar de CO_2 subiram de 0,0968 para 0,3321 enquanto que para N_2 as concentrações caíram de 0,7095 para $3,89\text{E}-3$. Para o NO_x , as emissões caíram de $3,69\text{E}-4$ para $5,11\text{E}-5$.

Para o óleo combustível usado também nas simulações, as emissões de CO_2 subiram de 0,1251 para 0,5136, para N_2 e NO_x houve uma redução de 0,7565 para 0,001492 e de $7,23\text{E}-4$ para $6,54\text{E}-5$ respectivamente. O aumento na concentração de CO_2 , que facilita sua captura, é devido a ausência de diluente N_2 do ar, que o também explica a baixa emissão do mesmo para os dois casos. A presença de N_2 nos combustíveis ainda permite a formação de NO_x térmico, porém em concentrações mais baixas em relação a queima com ar.

Pelo fato de haver pouco N_2 na queima dos combustíveis, o calor emitido pela chama se intensifica, fato que pode ser contornado recirculando os gases de exaustão para abaixar a temperatura da mesma ou abaixando-se as concentrações de combustível/oxidante e mantendo-se a mesma temperatura obtida para uma queima convencional, como foi confirmado experimentalmente. A energia do combustível é melhor aproveitada, mas parte desta energia acaba ficando dentro da câmara, ou seja, há um excedente energético. Como o combustível é melhor aproveitado, seu consumo e o de oxigênio pode ser reduzido, tendo como base energética o mesmo processo porém com ar como comburente. Assim a queima se da em uma atmosfera quase livre de N_2 , mantendo o nível de energia aceitável com redução no consumo de reagentes. Quanto maior o PCI do combustível, mais energia disponível e maior redução em consumo.

Durante a simulação, taxa de recirculação da mistura gases de exaustão não influencia na taxa de redução de combustível, tendo apenas como objetivo evitar que a alta temperatura que a chama pode atingir danifique as paredes da câmara.

O uso de oxigênio puro é justificado pela economia do combustível, sem a necessidade de grandes alterações nos equipamentos e com considerável redução em poluentes como o NO_x , gerando uma corrente de gases rica em CO_2 , que pode ser sequestrado posteriormente.

O controle de temperatura também pode ser feito de outras formas, pela queima do próprio resíduo, pelo controle de vazão na entrada de combustível/oxigênio ou pela utilização de uma câmara de paredes frias, como foi feito durante os experimentos.

Ainda durante as simulações computacionais, foi utilizado diferentes vazões de combustível e comburente para diferentes vazões de resíduo, um caso para concentração de oxigênio fixa e outro onde a concentração do oxigênio variou (Tabela 22 e figura 12 para taxas de oxigênio fixa e tabelas 23 a 31 e figuras 13 a 15 para taxas de oxigênio variáveis), normalmente trabalhando-se em regiões de combustão pobre onde as temperaturas são mais baixas e o controle torna-se mais eficiente. O aumento das emissões de CO pode ser compensado pela recirculação de gases de exaustão. A medida que o processo caminha para concentrações estequiométricas a temperatura aumenta até atingir seu pico, passando então para regiões de combustão rica, onde sofre novamente um ligeiro decréscimo. Cada uma das equações de 36 a 39 e as presentes nas figuras de 13 a 15 geradas na simulação podem dar uma estimativa destas concentrações de oxigênio exigidas para cada temperatura que se deseja dentro da câmara.

Durante os testes realizados no INPE de Cachoeira Paulista procurou-se confirmar os resultados obtidos na simulação computacional para GLP, usando as concentrações calculadas no mesmo.

Para o controle da temperatura foi utilizada uma câmara de paredes frias ao invés de introduzir resíduo líquido durante a queima.

Para a primeira bateria de testes constatou-se alta concentração de NO_x . A câmara não estava ainda devidamente isolada e sua parte superior permitia a formação de uma atmosfera por onde o nitrogênio atingia a chama por convecção, porém este

detalhe só foi percebido no final da segunda bateria de testes. Houve também a formação de fuligem e condensação de água dentro na câmara devido às baixas temperaturas das paredes internas e ao fluxo laminar dos gases de exaustão. Ao reduzir o volume de água introduzida, a temperatura das paredes internas aumenta, reduzindo a formação de fuligem e a condensação de água. Na terceira montagem da câmara mostrada na figura 32 estes problemas também foram reduzidos devido ao menor tempo de permanência da água de refrigeração.

A massa calculada de GLP a partir da razão queima O_2 /queima ar, (onde temos uma redução de 70% do consumo normal com ar) durante a simulação que foi utilizada durante os testes com oxigênio não é suficiente para manter a temperatura nos mesmos níveis de uma queima convencional para a primeira e segunda bateria de testes. Um acréscimo de massa de até 35% em cima do calculado deve ser incluído para compensar a perda. Já para a terceira bateria, como houve a retirada de um dos segmentos, a temperatura se manteve mais alta com menos massa de combustível, uma vez que o tempo de residência da água de refrigeração ficou menor. A diferença nos valores de eficiência de transferência de calor para a água nas duas primeiras baterias para a terceira (houve uma redução nos valores de eficiência na terceira bateria) se deve pelo mesmo motivo descrito acima, ou seja, menor tempo de residência da água no sistema.

Como pode ser observado na tabela 51, as concentrações de oxigênio que entram na câmara também influenciam na temperatura final. Para razões comburente/combustível acima de 7 a quantidade de oxigênio é tão alta que o mesmo não é totalmente consumido e o excedente ‘rouba’ o calor da chama, bem como favorece a formação de NO_x , uma vez que a câmara ainda não estava adequadamente selada na primeira e segunda bateria de testes. Para a tabela 61, referente a segunda bateria de testes, foi observado que para razões em massa abaixo de 6 as temperaturas também não atingem o valor esperado (por volta de 650 e 700°C) devido a baixa concentração de oxigênio presente.

Para a terceira bateria de testes, devido as modificações feitas (retirada do terceiro segmento a da chaminé onde se formava uma atmosfera e introdução de uma válvula na tubulação de ar) a redução de NO_x durante os testes foi significativa,

caindo para 5ppm. Após estas pequenas modificações implementadas, a câmara, projetada para operar em processos de combustão com ar, pôde funcionar corretamente com oxigênio a temperaturas semelhantes as obtidas com ar sem a necessidade de recirculação, com redução de consumo de GLP de até 70% e tendo um fluxo gasoso de exaustão rico em CO₂ e praticamente livre de NO_x, confirmando os resultados gerados na simulação com o GLP, apenas com a diferença que na simulação os testes foram para chama adiabática e não houve necessidade de se diminuir o tempo de residência dos gases utilizando excesso de oxigênio na câmara durante os testes no INPE.

Esta tese contribuiu para confirmar a possibilidade de se trabalhar com oxidação com apenas algumas modificações em uma câmara convencional sem danificá-la, com economia de combustível, altas concentrações de CO₂ e praticamente nenhum traço de NO_x.

Como sugestão para trabalhos futuros, uma modificação que poderia ser implementada para o projeto de uma nova câmara seria a redução do diâmetro dos segmentos da câmara para a obtenção de um regime do fluxo gasoso mais turbulento.

REFERÊNCIAS

Arias, B.; Pevida, C.; Rubiera, F.; Pis, J.J. Effect of biomass blending on coal ignition and burnout during oxy-fuel combustion, *Fuel* 87 (2008) p. 2753-2759.

Baukal, C.E. Oxygen enhanced combustion, Boca Raton: CRC Press; 1998.

Carvalho Jr, J.A.; Lacava, P.T. Emissões em processos de combustão. São Paulo: Fundação editora da UNESP, 2003, 135 páginas.

Carvalho, J.A. Mcquay, M. Q. Princípios de Combustão Aplicada. Florianópolis: Editora da UFSC, 2007, 176 páginas.

Croiset, E.; Thambimuthu, K. NO_x and SO₂ emissions from O₂-CO₂ recycle coal combustion, *Fuel* 80 (2001) p. 2117-2121.

Gardiner, W.C. Gas-Phase Combustion Chemistry, Nova York: Springer –Verlag, 2000, 543 páginas.

Glassman, I. Combustion. 3º edição. San Diego, Califórnia: Academic Press, 1996, 630 páginas.

IEA. Key World energy statistics: Paris, International Energy Agency (2007).

Lacava, P.T. Investigação Experimental do Enriquecimento do Ar na Incineração de Resíduos Aquosos. 2000. 274p. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica – Aerodinâmica, Propulsão e Energia) - Instituto de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos, 2000.

Liémans, I.; Alban, B.; Tranier, J.P.; Diane, T. SO_x and NO_x absorption based removal into acidic conditions for the flue gas treatment in oxy-fuel combustion. *Energy Procedia* 4 (2011) p. 2847-2854.

Liu, H.; Zailani, R.; Gibbs, B. Pulverized coal combustion in air and in O₂/CO₂ mixtures with NO_x recycle, *Fuel* 84 (2005) p.2109-2115.

Melo, G.F.; Lacava, P.T.; Carvalho Jr , J.A. A case study of air enrichment in rotary kiln incineration, *Int. Comm. Mass Transfer* 25 (1998) p.681-692.

Melo , G.F.; Laçava, P.T.; Carvalho, J.A. Theoretical analysis of aqueous residues incineration with oxygen, *Int. Comm. Mass Transfer* 26 (1999) p.1029-1040.

Muniz, W. F. Estudo de um retentor de chama do tipo vortical/axial com pás de ângulo variável. 1993. 76f. Dissertação (Mestrado em Ciência Espacial e Combustão) – Instituto de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos, 1993.

Normann, F.; et al. Emission control of nitrogen oxides in the oxy-fuel process, *Progress in Energy and Combustion Science* (2009) p.1-13.

Pérez, E.P. Substituição do Diesel usado nos Queimadores Industriais por Álcool Combustível. 2007. 235p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica – Transmissão e Conversão de Energia) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá – FEG, 2007.

Puri, I.K. Environmental implications of combustion process, Boca Raton, Florida: CRC Press, Inc, 2000.

Rathnam, R.K.; et al. Differences in reactivity of pulverised coal in air (O₂/N₂) and oxy-fuel (O₂/CO₂) conditions, *Fuel Processing Technology* 90 (2009) p.797-802.

Seepana, S.; Jayanti, S. Optimized enriched CO₂ recycle oxy-fuel combustion for high ash coals, *Fuel* (2009).

Tan, Y.; Croiset, E.; Douglas, M.; Thambimuthu, K. Combustion characteristics of coal in a mixture of oxygen and recycled flue gas. *Fuel* 85 (2008) p.507-512.

Xiong, J; et al. An economic feasibility study of O₂/CO₂ recycle combustion technology based on existing coal-fired power plants in China, *Fuel* (2009).

Wall, T.F. Combustion process for carbon capture, *Proceedings of the combustion institute* 31 (2007) p. 31-47