UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo experimental da formação e emissão do NO_x na combustão do etanol e glp em uma câmara de combustão cilíndrica

> Autor: **Paulo César Lenço** Orientador: Prof. Dr. Wladir A. Bizzo

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA DEPARTAMENTO DE TÉRMICAS E FLUIDOS

Estudo experimental da formação e emissão do NO_x na combustão do etanol e glp em uma câmara de combustão cilíndrica

Autor: **Paulo César Lenco** Orientador: Prof. Dr. Waldir A. Bizzo

Curso: Engenharia Mecânica Área de Concentração: Térmica e Fluídos

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2004 S.P. – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

G

589c	Lenço, Paulo César Estudo experimental da formação e emissão do NO _x na combustão do etanol e GLP em uma câmara de combustão cilíndrica / Paulo César LençoCampinas, SP: [s.n.], 2004.
	Orientador: Waldir Antonio Bizzo. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.
	 Álcool. 2. Oxido nítrico. 3. Poluentes. 4. Combustão. 5. Energia. 6. Recursos naturais renováveis. 7. Oxigênio. 8. Energia – Fontes alternativas. 9. Gás de petróleo liquefeito. I. Bizzo, Waldir Antonio. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Experimental study of the formation and emission of the NO_x in the combustion of ethanol and LPG in a cylindrical combustion chamber
Palavras-chave em Inglês: Ethanol, Nitrogen oxide, Polluents, Combustioon Energy, Renewable natural resources, Oxygem, Renewable energy sources, LPG – Liquefied petroleum
Área de concentração: Térmica e Fluidos
Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica
Banca examinadora: Silvia Azucena Nebra de Perez e Guenther Carlos Krieger Filho
Data da defesa: 21/12/2004.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA DEPARTAMENTO DE TÉRMICAS E FLUIDOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

Estudo experimental da formação e emissão do NO_x na combustão do etanol e glp em uma câmara de combustão cilíndrica

Autor: Paulo César Lenco

Orientador: Prof. Dr. Waldir A. Bizzo

A Banca Examinadora, composta pelos membros abaixo aprovou esta dissertação.

Prof. Dr. Waldir Antonio Bizzo, Presidente Faculdade de Engenharia Mecânica Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dra. Silvia Azucena Nebra de Perez Faculdade de Engenharia Mecânica Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Guenther Carlos Krieger Filho Departamento de Engenharia Mecânica Universidade de São Paulo

Campinas, 21 de dezembro de 2004.

Dedicatória

Para meus pais, Hélio e Maria, pela base sólida de amor e confiança.

Para a Hélia, pelo incentivo decisivo e apoio em tempo integral.

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Waldir A. Bizzo, pela orientação, apoio e dedicação.

Ao amigo Emerson dos Reis,

pela presença constante traduzida, em apoio e trabalho. Principalmente pela elaboração do software que possibilitou a aquisição dos dados de temperatura.

À Ricardo Perin, pelo trabalho e disposição.

À todos os amigos do Departamento de Engenharia Térmica e de Fluídos da FEM, que entre um café e outro, me deram idéias e alegrias.

Aos funcionários do Laboratório, que no cumprimento de seu dever, possibilitaram este trabalho.

Aos meus irmãos Wagner e Márcia, que sempre apoiaram de forma inquestionável as minhas escolhas.

À CAPES, pelo apoio financeiro concedido a esta pesquisa.

Resumo

LENÇO, Paulo César, Estudo experimental da formação e emissão do NO_x na combustão do etanol e GLP em uma câmara de combustão cilíndrica,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004. 213 p. Dissertação (Mestrado)

Com a inovação tecnológica houve um aumento crescente no consumo de energia devido ao aumento das necessidades individuais e coletivas. Isso trouxe a necessidade de criar novas fontes de energia. A utilização intensiva de combustíveis fósseis tem causado o aumento da poluição ambiental e a degradação e escassez de recursos naturais não renováveis. A formação de gases poluentes, tais como o CO, CO₂, e os NO_x, tem causado grande preocupação e contribuído para fenômenos como o aquecimento global ou formação de ozônio atmosférico. Com a crescente emissão desses gases e de compostos nocivos, as alternativas viáveis são as escolhas de combustíveis renováveis e a adoção de mecanismos minimizantes da formação. A formação de óxidos de nitrogênio, através do mecanismo de Zeldovich, é fornecida por altas temperaturas locais e disponibilidade de oxigênio. Estes fatores, por sua vez, sofrem influência da fluidodinâmica da combustão e a distribuição do tempo de residência. Este trabalho estudou a emissão e a formação de NO_x e CO em uma câmara de combustão cilíndrica isolada termicamente, queimando GLP (gás liquefeito de petróleo) e etanol vaporizado. Foram utilizadas o mesmo tempo de residência, a mesma potência específica, temperaturas de saída dos gases de 1000°C e 1175°C, e diversos números de rotação do queimador. Estes dados foram relacionados com a formação do oxido de nitrogênio na câmara de combustão. Em dois números de rotação específicos foram medidas o campo de temperatura e a distribuição de concentração de NO_x, CO e O₂, no interior da câmara de combustão.

Palavras-Chave: Álcool, óxido nítrico, poluentes, combustão, energia..

Abstract

LENÇO, Paulo César, *Experimental study of the formation and emission of the NO_x in the combustion of ethanol and LPG in a cylindrical combustion chamber*,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004. 213 p. Dissertação (Mestrado)

The technological innovation caused a growing increase in the energy consumption because the individual and collective needs increased. Then it was necessary to create new energy sources. The intensive use of fossil fuels use has caused environmental pollution, besides degradation and shortage of natural resources. The generation of pollutant gases, such as CO, CO₂, and NO_x, has caused great concern and also has contributed to the global warming or generation of atmospheric ozone. To struggle with the rising emission of those gases, viable alternatives are using renewable fuels and emission and formation minimization mechanisms. Nitrogen oxides formation, by the Zeldovich mechanism, occurs by high local temperatures and available oxygen. However, these factors are influenced by combustion fluid dynamics and residence time distribution. This work studied emission and formation of NOx and CO in a cylindrical combustion chamber, thermal insulated, burning LPG (Liquefied Petroleum Gas) and vaporized ethanol. In this equipment were used the same residence time, specific power, exit temperatures of gases 1000°C and 1175°C, and several swirl numbers at the burner. These data were related to the nitrogen oxides formation in the combustion chamber. In two specific swirl numbers, the temperature field and the distribution of NOx, CO and O2 concentration were measured, inside the combustion chamber.

Key-words: Ethanol, nitrogen oxide, polluents, combustion, energy.

Índice

LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS	IX
NOMENCLATURA	X
LETRAS LATINAS	x
Letras Gregas	XI
SIGLAS	XI
INTRODUÇÃO	1
1.1 - Objetivo deste trabalho	2
1.2 - JUSTIFICATIVA	
1.3 - Estrutura do trabalho	
CAPÍTULO 2	
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1 - Ciclo de nitrogênio	
2.2 - Óxido de nitrogênio	
2.3 - Mecanismos de Formação dos Óxidos de Nitrogênio	
2.3.1 - NO _x Térmico	
2.3.2 - NO _x Imediato	9
2.3.3 - NO _x Combustível	
2.3.4 - Mecanismo do Dióxido de Nitrogênio	
2.4 - Mecanismo e técnicas de controle da emissão do $NO_{\rm x}$	
2.4.1 - Mecanismo do Óxido Nitroso para a remoção do NO	
2.4.2 - Térmico De-NO _x	
2.4.3 - Mecanismo RAPRENOx	

2.4.4 - Redução Seletiva Não-Catalítica	16
2.4.5 - Redução seletiva catalítica	17
2.4.6 - Lavadores de Gás Tipo "Scrubber"	19
2.4.7 - Recirculação de gases de exaustão	22
2.4.8 - Queimadores com pré-mistura	23
2.4.9 - Queimadores de Baixo NO _x	24
2.4.10 - Queimador de mistura rápida	27
2.4.11 - Injeção de água ou vapor	29
2.4.12 - Injeção de hidrocarboneto para Requeima	29
2.5 - Fluidodinâmico de Câmaras de Combustão	30
2.5.1 - Escoamento com rotação ("Swirl")	32
2.5.2 - Distribuição do Tempo de Residência (DTR)	35
2.6 CINÉTICA QUÍMICA DO ETANOL	38
2.6 VELOCIDADE DE CHAMA DO ETANOL	42
DESCRIÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL	45
3.1 - Fluxograma do Processo	45
3.2 - Fornalha de Testes	47
3.3 - QUEIMADOR	48
3.4 - VAPORIZADOR DE COMBUSTÍVEIS	49
3.5 - Linha de Exaustão dos Gases de Combustão	50
3.6 - Descrição da Instrumentação	52
3.6.1 - Medidores de Vazão, Temperatura e Pressão	52
3.6.2 - Pirômetro de Sucção	54
3.6.3 - Sonda de Amostragem de Gases	56
DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	59
4.1 - Preparação e Recuperação da Bancada	59
4.2 - Variáveis de Operação	60
4.3 - Caracterização do Sistema Experimental	62
4.3.1 - Combustível	62
4.3.2 - Estequiometria de Combustão do GLP e do Etanol	63
4.3.3 - Relação Ar/Combustível	63
4.3.4 - Tempo Médio de Residência dos Gases	64
4.3.5 - Potência Específica da Câmara	64
4.3.6 - Número de Rotação (S')	65
4.3.7 - Experimentos realizados	67

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	69
5.1 - Número de rotação	70
5.2 - Apresentação dos dados de temperaturas e concentrações.	72
5.3 - Análise dos resultados dos perfis de temperatura	76
5.4 - Análise dos resultados dos perfis de concentração do $NO_{\rm x}$	83
5.5 - Análise dos resultados dos perfis de concentração do Oxigênio	90
5.6 - Análise dos resultados dos perfis de concentração do CO	92
CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	95
6.1 - Conclusão e considerações finais	95
6.2 - Sugestões para trabalhos futuros	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

APÊNDICES

APÊNDICE 1 : TABELAS E GRÁFICOS DOS DADOS OBTIDOS	. 105
APÊNDICE 2 : FORMAÇÃO E CRISTALIZAÇÃO DE FULIGEM NO GLP	. 211

Lista de Figuras

Figura 2. 1. Principais rações de conversão do N-combustível em NO e N2
(VAN DER LANS et al 1997. p.354)11
Figura 2. 2. Principais reações do mecanismo térmico De-NOx
(MILLER E BOWWMAN, 1989)15
Figura 2. 3. Gerador de escoamento com rotação por entrada tangencial e axial de ar
(BEÉR e CHIGIER, 1972. p.108)
Figura 2. 4. Gerador de escoamento com rotação por blocos móveis
(BEÉR e CHIGIER, 1972. p.108)
Figura 2. 5. Princípio de operação do queimador de mistura rápida
(ALTPFART e CHRISTMAN, 1995. p.29)
Figura 2. 6. Região do jato sem turbulência (BEÉR e CHIGIER, 1972 p.10)
Figura 2.7. Linhas de correntes típicas de escoamento com rotação – corte axial
(BEÉR e CHIGIER, 1972. p.103)
Figura 2. 8. Perfil de velocidade tangencial de uma câmara de combustão cilíndrica para
um número de rotação de 0,90 (KENBAR, 1995. p.338)
Figura 2. 9. Perfil de temperatura de uma câmara de combustão cilíndrica para um número
de rotação de 0,90 (KENBAR, 1995. p.341)
Figura 2. 10. Ângulos de ligação do etanol e água (MARINOV, 1998)

Figura 2. 11. Decomposição da molécula do Etanol.

<i>Topo</i> : Molécula de Etanol antes da decomposição; <i>A</i> : Formação de H2; <i>B</i> : Formação de
radical OH; C: Formação de molécula de H ₂ O; D: cisão do C-C. (MARINOV, 1998)40
Figura 2. 12. Principais rotas para combustão estequiométrica do etanol
(EGOLFOPOULOS, et. al, 1992; NORTON e DRYER, 1992)41
Figura 2. 13. Velocidade de chama do etanol por EGOLFOPOULOS, et al. (1992)43
Figura 2. 14. Velocidade de chama do etanol comparada com outros combustíveis
(GULDER, 1984)
Figura 2. 15. Velocidade de chama do etanol (GULDER, 1984)
Figura 2. 16. Comparativo da velocidade de chama do etanol entre o método numérico de
MARINOV (1998) e os outros autores

Figura 3. 1. Fluxograma original da câmara com a linha de combustível líquido	
(MAFRA, 2000)	46
Figura 3. 2. Vista geral da bancada experimental.	46
Figura 3. 3. Fluxograma do processo e instrumentação da bancada modificada	47
Figura 3. 4. Dimensões principais (em mm, sem escala, da câmara de combustão)	48
Figura 3. 5. Sistema de blocos móveis para regulagem do número de rotação	48
Figura 3. 6. Queimador com gerador de rotação do ar de combustão	49
Figura 3. 7. Esquema do Vaporizador	50
Figura 3. 8. Foto do Vaporizador	50
Figura 3. 9. Fotos da mesa-suporte das sondas	51
Figura 3. 10. Pirômetro de sucção	55
Figura 3. 11. Fluxograma do sistema de sucção do pirômetro	55
Figura 3. 12. Sonda de amostragem dos gases de combustão	57
Figura 3. 13. Fluxograma do sistema de amostragem dos gases	57

56
ĺ

Figura 5.1. Emissão de NO _x em função do número de rotação na saída	
dos gases no ponto A da figura 3.3, com barras de erro nos valores obtidos	71
Figura 5. 2. Emissão de O_2 em função do número de rotação na saída	
dos gases no ponto A da figura 3.3, com barras de erro nos valores obtidos	72
Figura 5. 3. Pontos onde foram verificadas as concentrações e as temperaturas	
na câmara de combustão cilíndrica	73
Figura 5. 4. Perfil de temperatura do etanol.	73
Figura 5. 5. Perfil em 3 dimensões do NO _x do etanol	74
Figura 5. 6. Perfil comparativo de concentração entre NO_x e O_2 do GLP	75
Figura 5. 7. Perfil dos contornos de concentração do O ₂ do GLP	75
Figura 5.8. Posições estudadas nos gráficos das figuras 5.9 a 5.16.	76
Figura 5.9. Variação de temperatura do etanol com número de rotação S'= 0,684	
e temperatura de referência 1000°C	77
Figura 5. 10. Variação de temperatura do etanol com número de rotação S'= 1,315	
e temperatura de referência 1000°C	77
Figura 5. 11. Variação de temperatura do etanol com número de rotação S'= 0,684	
e temperatura de referência 1175°C	77
Figura 5. 12. Variação de temperatura do etanol com número de rotação S'= 1,315	
e temperatura de referência 1175°C	78
Figura 5. 13. Variação de temperatura do GLP com número de rotação S'= 0,684	
e temperatura de referência 1000°C	78
Figura 5. 14. Variação de temperatura do GLP com número de rotação S'=1,315	
e temperatura de referência 1000°C	78
Figura 5. 15. Variação de temperatura do GLP com número de rotação S'= 0,684	
e temperatura de referência 1175°C	79

Figura 5. 16. Variação de temperatura do GLP com numero de rotação S'= 1,315e temperatura de referência 1175°C79
Figura 5. 17. Variação de temperatura ao longo do perfil $x/D = 0,15$, S' = 0,684 para o etanol à temperatura de referência 1000°C
Figura 5. 18. Variação de temperatura ao longo do perfil x/D = 0,15, S' = 0,684 para o GLP à temperatura de referência 1000°C80
Figura 5. 19. Variação de temperatura ao longo do perfil $x/D = 3,19$, S' = 0,684 para o etanol à temperatura de referência 1000°C
Figura 5. 20. Variação de temperatura ao longo do perfil x/D = 3,19, S' = 0,684 para o GLP à temperatura de referência 1000°C
Figura 5. 21. Perfil de contornos de temperatura do etanol
Figura 5. 22. Perfil de contornos de temperatura do GLP
Figura 5. 23. Perfil de contornos de temperatura do GLP
Figura 5. 24. Perfil de concentração do NO_x para o etanol à temperatura de referência 1000°C, com número de rotação S' = 0,684
Figura 5. 25. Perfil de concentração do NO _x para o GLP à temperatura de referência 1000°C, com número de rotação S' = 0,684
Figura 5. 26. Perfil de concentração do NO_x para o etanol à temperatura de referência 1000°C, com número de rotação S' = 1,315
Figura 5. 27. Perfil de concentração do NO_x para o GLP à temperatura de referência 1000°C, com número de rotação S' = 1,315
Figura 5. 28. Perfil da concentração do NO _x no etanol
Figura 5. 29. Perfil da concentração do NO _x no GLP
Figura 5. 30. Perfil da concentração do NO _x no etanol
Figura 5. 31. Perfil da concentração do NO _x no GLP
Figura 5. 32. Perfil comparativo da temperatura com a concentração do NO _x no início da câmara na queima do etanol com S' = 1,315 e temperatura de referência 1000°C88

Figura 5. 33. Perfil comparativo da temperatura com a concentração do NO_x no início da	a
câmara na queima do GLP com S' = 1,315 e temperatura de referência 1000°C	. 88
Figura 5. 34. Comparativo das concentrações de oxigênio e de NO_x para o etanol com S' = 0,684 e temperatura de referência 1175°C	. 89
Figura 5. 35. Comparativo das concentrações de oxigênio e de NO _x para o GPL com	
S' = 1,315 e temperatura de referência 1000°C	. 89
Figura 5. 36. Perfil de concentração do O ₂ do etanol	.91
Figura 5. 37. Perfil de concentração do O ₂ do GLP	.91
Figura 5. 38. Gráfico das emissões do CO do etanol	. 92
Figura 5. 39. Gráfico das emissões do CO do GLP	.93

Figura 6. 1. Estudo qualit	ativo do gradiente de c	concentração do O ₂	
----------------------------	-------------------------	--------------------------------	--

Lista de tabelas

Tabela 2. 1. Reações de Combustão Iniciais de Etanol (MARINOV, 1998)	
Tabela 2. 2. Reações de Decomposição de Etanol (MARINOV, 1998)	40

Tabela 3. 1. Características dos medidores de vazão.	
Tabela 3. 2. Características dos sensores de temperatura.	53
Tabela 3. 3. Características dos medidores eletrônicos de temperatura.	53
Tabela 3. 4. Características dos medidores de pressão	54
Tabela 3. 5. Características principais dos analisadores de gases.	58

Tabela 4. 1. Principais parâmetros e variáveis de operação.	61
Tabela 4. 2. Propriedades do Etanol	62
Tabela 4. 3. Propriedades do GLP	63
Tabela 4. 4. Potência específica da câmara de combustão.	65
Tabela 4. 5. Relação entre a posição na rosca e o número de rotação do queimador	66

Tabela 5. 1. C	ondições médias	de operação da	câmara7	0
----------------	-----------------	----------------	---------	---

Nomenclatura

Letras Latinas

- B largura dos canais formados pelos blocos móvel e fixo do gerador de rotação do queimador
- Gφ quantidade de movimento tangencial
- G_x quantidade de movimento axial
- *m* vazão (kg/s)
- P pressão estática
- R raio da saída do gerador de rotação; raio da câmara; constante universal dos gases
- R_h raio da lança de combustível, interno ao duto de saída do queimador
- r posição radial
- S' número de rotação
- tempo de residência
- U componente axial da velocidade dos gases
- V volume da câmara em m³
- \dot{v} vazão do ar de combustão calculado na temperatura de saída da câmara (m³/s)
- W componente tangencial da velocidade dos gases
- \dot{w}_{PCS} potência específica
- x distância axial da câmara

- y distância radial da câmara
- z quantidade de blocos móveis

Letras Gregas

- β ângulo de entrada do bloco tangencial do gerador de rotação
- ξ ângulo da posição de ajuste dos blocos móveis
- ξ_m ângulo máximo da posição de ajuste dos blocos móveis
- σ da quantidade de movimento tangencial, calculado pela equação 3.8
- ρ densidade dos gases
- ϕ coeficiente de excesso de ar

Siglas

- DTR distribuição do tempo de residência
- GLP gás liquefeito de petróleo
- IFRF International Flame Research Foundation
- PCI poder calorífico inferior
- PCS poder calorífico superior
- QBN queimador de baixo NO_x
- ZCR zona central de recirculação

Capítulo 1 Introdução

A revolução industrial, que tinha como fonte de energia o carvão mineral, e a grande capacidade de pesquisa e desenvolvimento da Inglaterra no do século XIX transformaram aquela nação no país mais rico do mundo.

A história se repete no início do século XX nos Estados Unidos, pois a grande quantidade de petróleo, e a grande capacidade daquele país em pesquisa e desenvolvimento, transformaram-no na maior potência econômica mundial até hoje.

Coincidência ou não estes dois exemplos, tinham como pilar do seu desenvolvimento a extrema disponibilidade de energia, que proporcionou um desenvolvimento tecnológico em beneficio da população daquelas nações.

Mas o consumo de combustível fóssil trouxe para a discussão, nas últimas duas décadas do século XX, os problemas ambientais decorrentes destes dois séculos de desenvolvimento industrial. Da máquina a vapor até o uso popular dos computadores, vem trazendo o aprimoramento dos meios de produção, a diversificação dos produtos de consumo e, conseqüentemente, um consumo energético cada vez maior e, a reboque deste desenvolvimento, as agressões ambientais.

As atividades industriais do homem moderno e seu volume de bens consumidos geram uma demanda energética cada vez maior, pois é necessário o acesso a produtos e serviços por um número cada vez maior da população, bem como a amplificação destes

benefícios aos que já as conquistaram. Isto traz dificuldades crescentes para a demanda energética, e as buscas por alternativas imediatas trazem um aumento das emissões de gases causadores do aquecimento global.

Uma alternativa para a mitigação e até mesmo o combate aos gases de efeito estufa, passa pela utilização de combustíveis renováveis, sendo a biomassa e seus derivados uma solução imediata. Qualquer combustível que tenha carbono em sua composição gera a emissão de gases do efeito estufa, pois passa necessariamente pelo processo de combustão.

Sendo assim eleva-se o grau de importância o estudo e o entendimento dos mecanismos de formação e destruição do $NO_{x,}$ e de uma alternativa aos atuais combustíveis, hoje utilizados.

A substituição completa dos combustíveis fósseis ainda não é possível em virtude do grau de comprometimento da sociedade moderna perante estas fontes de energia, mas um passo nesse sentido tem que ser dado.

Sendo o Brasil um país quase que totalmente tropical e tendo uma extensão territorial imensa, tem papel determinante no contexto mundial como consumidor, e principalmente, como produtor desta alternativa.

O exemplo de maior sucesso mundial na substituição de energia fóssil por uma alternativa renovável, é a queima do etanol em motores de combustão para automóveis, que tem mostrado a viabilidade destas alternativas.

A abundância de biomassa no Brasil traz à tona a discussão da necessidade de se ter um desenvolvimento tecnológico para o aproveitamento total desta energia disponível, sem causar danos ao meio ambiente.

1.1 - Objetivo deste trabalho

Este trabalho pretende pesquisar a formação e a emissão do NO_x na queima do etanol vaporizado e de um combustível fóssil não nitrogenado, neste caso o GLP, em toda a

extensão câmara de combustão cilíndrica, a temperaturas relativamente altas, e comparar o que for possível.

Para isso serão identificados autores e trabalhos que levem a entender os mecanismos de formação do NO_x , os métodos de destruição, o comportamento da combustão no interior da câmara de combustão e ainda descrevê-los para entender o que foi observado nos experimentos realizados.

Para se levar a termo este trabalho faz-se necessário observar os desdobramentos do objetivo principal nos seguintes objetivos específicos:

- Adaptar os equipamentos disponíveis no Laboratório de Térmicas e Fluidos da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) para possibilitar a queima dos dois combustíveis diferentes em condições semelhantes, para a aquisição de dados consistentes, e se possível conclusivos, da formação do NO_x em toda a extensão da câmara de combustão cilíndrica.
- Analisar de forma gráfica os dados obtidos e apresentá-los de forma completa para uma visualização dos fenômenos ocorridos durante a experimentação.
- Identificar os fenômenos ocorridos na combustão, visando um comparativo entre os dois combustíveis, suas diferenças e semelhanças.

1.2 - Justificativa

A queima de combustíveis para a geração de energia em turbina a gás tem a característica de ter alta temperatura com excesso de ar. Com estas condições, a emissão de NO_x é maior com relação a queima com baixo excedente de ar e temperaturas menores.

A possibilidade da queima do etanol em turbina a gás ainda é inviável, em função dos custos, mas dependendo dos preços dos derivados do petróleo, ou mesmo como uma alternativa de geração de energia localizada, uma sazonalidade de produção ou ainda uma

mudança nos padrões de consumo que podem causar um excedência, viabiliza-se comercialmente esta alternativa.

A crescente utilização do etanol, como combustível alternativo e viável, mostra a necessidade de se ter uma maior quantidade de informação sobre o comportamento deste combustível em trabalho em condição extrema, com alta temperatura e uma alta quantidade de excesso de ar, e que possa mostrar que as emissões do NO_x são compatíveis às emissões dos combustíveis mais nobres de origem fóssil, como o caro GLP e o metano, de difícil armazenamento e transporte, sendo que o etanol é renovável e de fácil armazenamento e transporte.

1.3 - Estrutura do trabalho

O trabalho está desenvolvido em quatro capítulos acrescidos da introdução, conclusão, referências bibliográficas e dois apêndices. O *Apêndice I* tem todos os dados obtidos no experimento, tabelas e todos os gráficos construídos nesse estudo. O *Apêndice II* apresenta a formação de fuligem que ocorreu na queima de GLP, à temperatura de referência 1175°C e número de rotação S' = 1,315.

Na *Introdução*, são apresentados os objetivos, as justificativas e a estrutura formal adotada no desenvolvimento deste trabalho. No *Capítulo 1* são apresentadas as publicações, trabalhos e estudos que levaram a um desenvolvimento e à compreensão dos mecanismos de formação e destruição do NO_x na combustão, passando pela cinética química da formação do NOx, tipos de queimadores, fluidodinâmica, distribuição do tempo de residência, cinética química do etanol e velocidade de chama. No *Capítulo 2* tem-se a descrição da bancada experimental e do instrumental utilizado. O *Capítulo 3* traz a descrição do procedimento experimental e os dados referentes aos combustíveis. As discussões dos resultados são apresentadas no *Capítulo 4*, deixando para a *Conclusão* a apresentação das conclusões obtidas e sugestões para outros trabalhos.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

A inovação tecnológica trouxe um aumento crescente no consumo de energia por todo o planeta. As exigências individuais e coletivas de mais energia geraram a necessidade de criar novas e muitas fontes de energia, trazendo benefícios e também criando dificuldades que até então não existiam. Por isso, hoje em dia, vem se buscando alternativas energéticas limpas para aumentar esta demanda sem aumentar os níveis de poluição ambiental.

A formação de gases poluentes tais como o CO, CO₂, e os NOx, tem causado grande preocupação e contribuído para o aquecimento global ou efeito estufa. A alternativa viável é a diminuição crescente desses gases através de mecanismos minimizantes desta formação e a escolha de combustíveis sustentáveis e menos poluentes.

O efeito estufa causado pelos gases poluentes na atmosfera também pode ser ocasionado por compostos nitrogenados como óxido nitroso, sendo que já se tem comprovação efetiva desta questão.

Os poluentes nitrogenados têm influenciado no meio ambiente e na saúde dos homens e outros seres vivos. O NO₂ quando inalado atinge porções periféricas dos pulmões devido a sua baixa solubilidade. Seu efeito tóxico está relacionado ao fato de ser um agente oxidante (BRAGA *et al*, 2002). A seguir são apresentados os conceitos do estudo da formação dos óxidos de nitrogênio em câmara de combustão, propriedades dos diversos poluentes nitrogenados, mecanismos químicos de destruição e formação, e algumas técnicas de formação e destruição de óxidos de nitrogênio e a cinética química do etanol.

2.1 - Ciclo de nitrogênio

O nitrogênio é o elemento químico mais comum em quantidade na atmosfera (próximo de 79%), e não é absorvido diretamente pela maioria dos organismos, sendo primeiramente fixado por microorganismos como bactérias para posteriormente ser utilizado por plantas e animais (RAO, 1991).

Para ser assimilado na forma de nitrato o nitrogênio é transformado em aminoácidos, uréia e outros compostos orgânicos. Em condições normais o montante de nitrogênio fixado é igual à quantidade retornada a atmosfera pelas bactérias dinitrificantes. Essas bactérias convertem a amônia, resultante da amonificação dos aminoácidos e da uréia em nitritos e posteriormente, em nitratos (RAO, 1991).

A produção de fertilizantes nitrogenados, bem como a queima de combustíveis com alto teor de nitrogênio (carvão e óleo) e outras atividades humanas, tem alterado o ciclo natural do nitrogênio (RAO 1991).

2.2 - Óxido de nitrogênio

Segundo MUZIO e QUARTUCY (1997) os principais óxidos de nitrogênio na atmosfera são oxido nítrico (NO), dióxido de nitrogênio (NO₂) e óxido nitroso (N₂O), sendo que somente os dois primeiros são coletivamente denominados NO_x .

O óxido nítrico tem como sua principal fonte a queima de combustível. Nos processos de combustão é um gás muito combatido e também o responsável pela formação do dióxido de nitrogênio, tendo como principais características físicas ser incolor e inodoro.

O NO₂ (dióxido de nitrogênio) pode ser detectado mesmo em baixa concentração (próximo de 0,12 ppm), é um gás de cor marrom, de odor irritante. O NO₂ tem sido detectado em pequenas concentrações em baixas altitudes da atmosfera. Isto se deve, provavelmente, ao fato do dióxido de nitrogênio ser produzido pela oxidação do NO em atmosfera com ozônio (O₃). Através da absorção de raios solares, o NO₂ inicia uma série de reações fotoquímicas na atmosfera. A queima de combustíveis e a emissão industrial da fabricação de acido nítrico e ácido adípico são os principais geradores deste poluente (RAO, 1991).

O óxido nitroso é um gás incolor, inodoro e não tóxico mesmo em concentrações próximas a 0,25 ppm. É produzido na atmosfera pela ação biológica do solo. Suas fontes antropogênicas quase não existem. Tem baixa reatividade e normalmente não é considerado um poluente (RAO, 1991). Entretanto alguns trabalhos citam o N₂O como um poluente quando emitido em quantidades especificas. HAO *et al.* (1987), além de MUZIO e QUARTUCY (1997), referenciam o oxido nitroso como um forte colaborador de efeito estufa e responsável pela destruição da camada de ozônio da terra. HAO *et al.* (1987) afirmam que a maior fonte para a formação do NO_x na estratosfera é o N₂O.

O NO tem um tempo de vida média de alguns dias antes de se converter a NO₂. Este último é considerado o agente nocivo dentre os óxidos de nitrogênio presentes nos gases de exaustão de queimadores, apesar de não representar mais que 5% do NO_x gerado na combustão, segundo HAYHRST e VINCE (1980).

Segundo ZELDOVICH (1985), o óxido nítrico tem baixa solubilidade em água, enquanto o dióxido de nitrogênio tem uma alta solubilidade. Estas características podem ser de vital importância no projeto de lavadores tipo "Scrubber" para o NO_x , mas que só são economicamente viáveis quando estes tipos de lavadores já forem empregados para o controle do SO_2 .

2.3 - Mecanismos de Formação dos Óxidos de Nitrogênio

Observam-se três rotas principais de formação do NO_x durante os processos de combustão levando em consideração a cinética química do nitrogênio:

NO_x térmico; NO_x imediato; NO_x combustível.

2.3.1 - NO_x Térmico

O NO_x térmico é o principal mecanismo de formação de poluentes nitrogenados no processo de queima de combustíveis isentos de nitrogênio, segundo MILLER e BOWMAM (1989). Originalmente este mecanismo foi chamado de "Mecanismo de Zeldovich" em homenagem ao pesquisador russo que propôs esta rota de formação. ZELDOVICH (1946) é citado por HAYRUST e VINCE (1980) como sendo o marco inicial no estudo dos mecanismos envolvendo o nitrogênio durante a combustão.

ZELDOVICH (1946) sugeriu uma seqüência de duas reações (2.1 e 2.2) responsáveis pela formação do NO_x em câmaras de combustão:

$N_2 + O \Rightarrow NO + N$	(2.1)

 $N + O_2 \Rightarrow NO + O$ (2.2)

Uma terceira reação foi proposta para este mecanismo (2.3), por FENIMORE e JONES (1957) citado por FENIMORE (1971), devido a certa inconsistência da rota proposta inicialmente por ZELDOVICH:

 $N + OH \Rightarrow NO + H$ (2.3)

Com isto, esse conjunto de reações químicas fica então sendo conhecido como mecanismo do NO_x térmico, devido ao fato desta rota ser diretamente dependente da temperatura. Este mecanismo é linearmente dependente da concentração do átomo de oxigênio e independente do tipo de combustível, segundo HAYRUST e VINCE (1980).

O mecanismo proposto por Zeldovich, altamente sensível à temperatura, tem forte dependência das reações que formam o NO_x térmico, que se deve à alta energia de ativação deste mecanismo ($E_A = 315 \text{ kJ/mol}$), segundo HAYRUST e VINCE (1980).

MILLER e BOWMAM (1989) afirmam que as taxas globais de formação do NO através de mecanismo térmico geralmente são lentas comparadas com as reações de oxidações do combustível. FENIMORE (1971) cita que as reações do mecanismo do NO_x térmico produzem cerca de 1 ppm de NO a cada milisegundo.

CARVALHO JR e LACAVA (2003) afirmam que no caso de combustores sem nitrogênio em sua composição elementar, considerações de equilíbrio não fornecem dados confiáveis para o cálculo das emissões, pois a formação de NO pode ser bastante lenta. Afirmam ainda que a combustão como energia térmica é utilizada por diferentes dispositivos para as mais complexas tarefas, apesar do uso comum da queima de combustíveis, e que cada sistema apresenta particularidades quanto às condições de operação. Assim cada sistema necessita de condições diferentes de combustão e é necessário entender como essas condições influenciam a emissão de NO_x, pois isso é fundamental para definir qual a melhor estratégia aplicável ao sistema em questão, minimizando a emissão desse poluente e respeitando as necessidades de operação.

2.3.2 - NO_x Imediato

A presença de NO_x na região de chama com mistura rica em combustível, que não poderia ser explicada pelo mecanismo proposto por ZELDOVICH (1946), foi explicada por FENIMORE (1971), que observou a velocidade de formação do NO_x térmico onde as reações são relativamente lentas. Assim foi proposto um novo mecanismo denominado por ele de NO_x Imediato (do inglês "Prompt NO_x"), segundo o qual radicais hidrocarbonetos reagem rapidamente com o nitrogênio molecular formando aminas (NH) e compostos cianos (HCN, H₂Cn e CN) como nas reações 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7 (HAYHURST e VINCE, 1980; DRAKE *et al.*, 1997; MEUNIER *et al.*, 1990; DUPONT *et al.*, 1993; VAN DER LANS *et al.*, 1997; MEUNIER *et al.*, 1998). Segundo ALTEFART e CHRITMAM (1995) o mecanismo se completa em 1,0 x 10^{-3} segundos.

$CH + N_2 \Leftrightarrow HCN + N$	(2.4)
$CH_2 + N_2 \iff HCN + NH$	(2.5)
$CH_2 + N_2 \iff H_2CN + N$	(2.6)
$C + N_2 \Leftrightarrow CN + N$	(2.7)

Quando há altas concentrações de O e OH os compostos cianos são então convertidos em NO pelo mesmo mecanismo do NO_x combustível, completando o mecanismo do NO_x Imediato em chama rica em combustível (VAN DER LANS et al. 1997). Apesar de haver vários radicais hidrocarbonetos responsáveis por estas rotas químicas, o CH e o CH₂ são considerados os de maior importância (MILLER e BOWMAM, 1989).

Segundo HAYHURST e VINCE (1980) o mecanismo proposto por FENIMORE (1971) é válido somente em regiões de chama com mistura rica em combustível, enquanto o mecanismo proposto por ZELDOVICH (1976) prediz adequadamente a taxa de formação de NO_x em chama de mistura pobre e em condições estequiométricas e é aplicável à maioria dos sistemas práticos.

2.3.3 - NO_x Combustível

Uma das principais origens de óxidos de nitrogênio em combustível fóssil é do nitrogênio contido no combustível. Esta fonte é particularmente importante na emissão de oxido de nitrogênio em combustíveis como o carvão e seus derivados onde se tem normalmente de 0,5 a 2,0% de nitrogênio (MILLER e BOWMAN, 1989). Os autores afirmaram que medidas feitas em escalas de laboratório com vários tipos de combustíveis

ricos em nitrogênio mostraram as seguintes conclusões em relação à conversão de nitrogênio do combustível a NO:

- A conversão é quase independente do tipo dos compostos nitrogenados;
- A conversão depende fortemente das condições locais de combustão: alta temperatura favorece a quebra das ligações aumentando a taxa de NO_x combustível; relação estequiométrica rica em combustível favorece a formação de HCN que é fortemente oxidado a NO na região posterior a chama (VAN DER LANS *et al.* 1997);
- A conversão é altamente dependente da concentração inicial de compostos nitrogenados na mistura ar/combustível.

Basicamente as reações envolvendo o NO_x combustível se iniciam rapidamente convertendo quase a totalidade dos compostos nitrogenados em cianeto de hidrogênio (HCN) e amônia (NH₃). Quando o nitrogênio do combustível está ligado a um anel aromático o produto é cianeto de hidrogênio. Já quando o nitrogênio está ligado a um grupo amina o produto é a amônia (MILLER e BOWMAN, 1989).

VAN DER LANS et al. (1997) apresenta um esquema simplificado das principais etapas de conversão do nitrogênio do combustível em NO e NO₂, conforme pode ser visto na figura 2.1.



Figura 2. 1. Principais rações de conversão do N-combustível em NO e N2 (VAN DER LANS et al 1997. p.354)

2.3.4 - Mecanismo do Dióxido de Nitrogênio

Ainda no trabalho de MILLER e BOWMAN (1989) é apresentado o mecanismo do dióxido de nitrogênio como sendo uma fonte de NO_x próximo à zona de chama em queimadores com ou sem pré-mistura, que revelam altas concentrações de NO_2 em relação ao NO.

A proposta de um mecanismo para tentar explicar a formação e distribuição do NO_2 durante a combustão foi feita por SANO (1985) conforme as reações 2.8, 2.9 e 2.10.

$NO + HO_2 \Leftrightarrow NO_2$	(2.8)
$NO_2 + H \Leftrightarrow NO + OH$	(2.9)
$NO_2 + O \Leftrightarrow NO + O_2$	(2.10)

Grande concentração de HO_2 pode ser encontrada em regiões de chama de baixa temperatura, o qual pode reagir com o NO formado em regiões de alta temperatura e transportado por difusão para a região de baixa temperatura. As reações de remoção de NO_2 são rápidas, e na presença de altas concentrações de radicais de O e H, o NO_2 será convertido rapidamente de volta a NO (MILLER e BOWMAN, 1989).

A formação de dióxido de nitrogênio é então sensível às reações de formação e remoção do HO_2 (reação 2.11).

$$H + O_2 + M \Leftrightarrow HO_2 + M \tag{2.11}$$

Segundo MILLER e BOWMAN (1989) a reação 2.11 ocorre em regiões de chamas de baixa temperatura. O átomo de hidrogênio necessário para a reação 2.11 é transportado da região de alta temperatura por difusão molecular. A reação 2.12 também é importante na formação de NO₂.

 $O + OH \Leftrightarrow O_2 + H$ (2.12)

2.4 - Mecanismo e técnicas de controle da emissão do NO_x

Existem dois caminhos distintos no controle das técnicas de emissão do NO_x: técnicas de pós-combustão e técnicas de combustão.

As técnicas de pós-combustão buscam diminuir o NO_x formado não levando em consideração a maneira como ele foi transformado. Essa técnica visa destruir o NO_x e não preveni-lo. Estas técnicas tentam adequar as emissões de poluentes às normas de controle ambiental vigentes, sendo que as três categorias relevantes de controle pós-combustão estacionárias ou de fontes móveis são: redução catalítica; redução não catalítica; e absorção de gases.

À medida que os mecanismos de formação do NO_x são entendidos, as técnicas para sua minimização evoluem de forma semelhante, pois projetos de queimadores e câmaras de combustão, analisadores e outros aplicativos são implementados para que as emissões dos óxidos de nitrogênio sejam diminuídas cada vez mais, em função do combate aos mecanismos que favorecem sua formações.

Identificando os mecanismos de formação de NO_x podem-se dividir as técnicas de combustão em quatro tipos básicos: queima com recirculação de gases de exaustão; queimadores de pré-mistura; e queimadores de baixo NO_x e ainda a técnica de Requeima (do inglês "Reburning"). Existem ainda queimadores de mistura rápida que conseguem atingir baixíssimos níveis de NO_x e que se valem da combinação de algumas dessas técnicas citadas e o uso de injeção de água ou vapor para diminuir a temperatura da câmara.

2.4.1 - Mecanismo do Óxido Nitroso para a remoção do NO

Altas concentrações de N₂O têm sido encontradas nos gases de exaustão da queima de carvão e óleo combustível segundo HAO *et al.* (1987).

O N_2O é um composto que se converte rapidamente nos gases de exaustão da combustão, conforme estudos realizados em chama laminar com pré-mistura conforme

ROBY e BOWMAN (1987). As reações 2.13 e 2.14 mostram a formação do óxido nitroso que é rapidamente convertido em N_2 conforme a reação 2.15.

 $NH + NO \Leftrightarrow N_2O + H$ (2.13)

 $NCO + NO \Leftrightarrow N_2O + CO$ (2.14)

$$N_2O + H \Leftrightarrow N_2 + OH \tag{2.15}$$

O N₂O é um subproduto do RAPRENO_X que será apresentado na seção 2.4.3 Este mecanismo é de particular interesse, pois, como mostram as reações 2.13 a 2.15, ele é responsável pela remoção do NO.

2.4.2 - Térmico De-NO_x

É uma técnica que se insere nas chamadas técnicas de pós-combustão. O mecanismo térmico De-NO_x é uma estratégia utilizada no controle das emissões de NO_x em processos de queima de combustíveis nitrogenados (N-combustível), uma vez que sua ação se dá após a formação do poluente, agindo nos gases de exaustão da combustão (MILLER e BOWMAN, 1989).

O mecanismo do térmico De-NO_X consiste na injeção de amônia (NH₃) nos gases de exaustão de combustores estacionários. A amônia inicia uma seqüência de reações que acabam por converter o óxido nítrico em nitrogênio molecular (figura 2.2).

Várias características químicas deste mecanismo têm motivado muitos estudos, como afirma MILLER e BOWMAN (1989). São estas principalmente:

- O mecanismo possui uma faixa estreita de temperatura de operação (1100 a 1400 K) sendo 1250 K seu ótimo, sem a presença de aditivo algum;
- Se houver condições de excesso de oxigênio a amônia é eficiente na redução de NO a N₂;

- Aditivos tais como hidrogênio e peróxido de hidrogênio (H₂O₂) abaixam a faixa de temperatura de operação;
- A presença de água promove uma pequena inibição no mecanismo, enquanto a temperatura ótima de operação aumenta levemente.



Figura 2. 2. Principais reações do mecanismo térmico De-NOx (MILLER E BOWWMAN, 1989)

2.4.3 - Mecanismo RAPRENOx

No mecanismo do RAPRENO_x (RAPid REduction of Nitrogen Oxides) consiste em injetar ácido cianúrico ((HOCN)₃) comercial nos gases de exaustão. Aquecido, o ácido cianúrico sublima e se decompõe sob a forma de ácido isociânico (reação 2.16) (MILLER e BOWMAN, 1989).

 $(\text{HOCN})_3 \Rightarrow 3 \text{ HNCO}$ (2.16)

O RAPRENO_x é um processo no qual os gases de exaustão da queima de Ncombustível são tratados com o objetivo de converter NO em N_2 assim como o térmico De- NO_x .

A conversão do NO a N_2 só ocorrerá a partir de 1000 K. A 1200 K quase todo NO já foi convertido, porém acima desta temperatura a redução do óxido nítrico a nitrogênio molecular diminui com o aumento da concentração do N_2O . Apesar das reações que compõem o mecanismo do RAPRENO_x não estarem estudadas como as do mecanismo do térmico De-NO_x, PERRY e SIEBERS (1986) citado por MILLER e BOWMAN (1989) sugerem uma seqüência de reações para explicar o mecanismo do RAPRENO_x (reações 2.17 a 2.23):

$HNCO \Leftrightarrow NH + CO$	\Rightarrow Inicialização	(2.17)
$NH + NO \Leftrightarrow N_2O + H$	\Rightarrow Inicialização	(2.18)
$H + HNCO \Leftrightarrow NH_2 + CO$		(2.19)
$NH_2 + NO \iff N_2 + H_2O$		(2.20)
$NH_2 + NO \iff NNH + OH$		(2.21)
$N_2H \Leftrightarrow N_2 + H$		(2.22)
$CO + OH \Leftrightarrow CO_2 + H$		(2.23)

Existem três categorias relevantes de controle pós-combustão estacionárias ou de fontes móveis são: redução catalítica; redução não catalítica; e absorção de gases.

2.4.4 - Redução Seletiva Não-Catalítica

A redução não-catalítica do NO_x é uma técnica baseada na injeção de compostos nitrogenados, normalmente amônia (NH₃), que é um agente redutor do óxido nítrico (NO) produzindo nitrogênio molecular (N₂). Além de amônia pura, são utilizados também compostos que se decomponham em NH₃ durante o processo.

Estudos experimentais feitos por AOKI *et al.* (1999) usam a uréia ($(NH_2)_2CO$) decomposta termicamente para produzir amônia e ácido cianúrico ($(HOCN)_3$; N₃) e ácido isociânico (HNCO). Observou-se que os mecanismos presentes neste processo são os já citados "térmico De-NO_x" e o RAPRENO_x. Duas equações mostram a decomposição da uréia:

 $(NH_2)_2CO \Rightarrow NH_3 + HNCO$ (2.24)

 $(NH_2)_2CO + H_2O \Longrightarrow NH_3 + CO_2 \tag{2.25}$
Os mecanismos de redução ocorrem conforme as reações (2.24) e (2.25) e o intervalo de temperatura está por volta de 1100 K a 1400 K, sendo o ótimo 1200 K, tornando difícil o controle desta técnica, em função de sua faixa estreita.

Em um trabalho de 1999, AOKI *et al.* obtiveram sucesso parcial a uma temperatura de 1250 K convertendo 90% do NO a N₂. Mas, abaixo desta temperatura a redução do óxido nítrico (NO) não ocorreu, e foi encontrada amônia não reagida nos gases de exaustão. No entanto acima de 1250 K ocorreu a conversão dos agentes redutores a NO e N₂O simultaneamente. Este trabalho conseguiu estabelecer as relações e os fatores responsáveis pela decomposição da uréia, e demonstrar que o uso desta técnica é útil nos processos de combustão.

2.4.5 - Redução seletiva catalítica

A redução catalítica é uma técnica cara, mas que já vem sendo muito utilizada para baixar os níveis de emissão de óxido de nitrogênio durante a combustão, quando não se consegue baixar estes níveis durante o processo.

Segundo CANTELLI e de LUCA (1999) a amônia também é um agente redutor do óxido nítrico a nitrogênio molecular na redução catalítica. A grande diferença em relação à redução não-catalítica é que, além da presença do catalisador, os próprios componentes do gás de exaustão também são usados como agentes redutores. Compostos como hidrogênio, gás natural, hidrocarbonetos não-queimados e monóxido de carbono (CO) somados à presença de catalisadores metálicos, conseguem promover a conversão do NO_x a nitrogênio molecular (RAO, 1991).

Duas etapas distintas do processo de redução catalítica dos óxidos de nitrogênio são mostradas. Na primeira etapa ocorre a conversão catalítica de todo o dióxido de nitrogênio (NO_2) em óxido nítrico (NO). Como já foi dito, o NO_2 é um gás marrom e o NO, incolor, sendo então esta etapa chamada de "Processo de Descoloração". A outra etapa consiste na destruição catalítica do resultado da etapa anterior, ou seja, a redução do oxido nitroso

(NO), transformando-o em nitrogênio molecular (N_2) na presença dos agentes redutores (RAO, 1991).

Os catalisadores de maior eficiência são o paládio e a platina, mas esses metais são altamente sujeitos a "envenenamento" por adsorção de enxofre no caso de queima de carvão ou óleo combustível, além de muito caros. A contaminação do catalisador limita a seletividade, que é a sua característica mais importante, segundo RAO (1991).

RAO (1991) afirma que com a seletividade no catalisador, o agente redutor age preferencialmente com o NOx, reduzindo o montante de reagente necessário para a neutralização do poluente. A ação de alguns redutores em uma redução seletiva é mostrada nas reações 2.26, 2.27 e 2.28:

$2NO + 2H_2 \Longrightarrow N_2 + 2H_2O$	(2.26)
$2\text{NO} + \text{CO} \Rightarrow \text{N}_2 + 2\text{CO}_2$	(2.27)

 $6NO + 4 NH_3 \Longrightarrow 5N_2 + 6 H_2O \tag{2.28}$

No caso de uma redução catalítica não-seletiva, as reações 2.29 e 2.30 ocorrem primeiro, seguidas da reação 2.31. Mas, a reação de redução do NO (reação 2.31) só ocorrerá quando todo oxigênio presente tiver reagido com o combustível (reação 2.29).

 $CH_4 + 2O_2 \Longrightarrow CO_2 + 2H_2O \tag{2.29}$

 $CH_4 + 4NO_2 \Longrightarrow CO_2 + 2H_2O + 4NO \tag{2.30}$

$$CH_4 + 4NO \Longrightarrow CO_2 + 2H_2O + 2N_2 \tag{2.31}$$

As técnicas de pós-combustão desenvolvidas em escala de laboratório são citadas por STECIAK *et al.* (1995) e se baseiam na adsorção química simultânea de óxidos de nitrogênio (NO_x) e de óxidos enxofre (SO_x) em sais de cálcio de ácidos carboxílicos (Ca(COOH)₂; Ca(CH₂COOH)₂) entre outros. O processo de pirólise dos sais orgânicos de cálcio injetados na linha dos gases de exaustão produz poros onde os poluentes são adsorvidos. Nestes poros o SO_x reage com os sais produzindo sulfato de cálcio (CaSO₄) e sulfito de cálcio (CaSO₃). Já o NO_x reage com os radicais CH_i formados pela decomposição do grupamento carboxílico, reduzindo o NO a N₂, em condições de mistura rica de combustível.

Pulverizam-se os sais de cálcio de ácido orgânico que são injetados e secos na linha de exaustão. O experimento foi realizado em uma atmosfera com temperatura entre 550 e 1250° C, contendo: 2000 ppmv de SO₂; 1000 ppmv de NO; 3% de O₂; e 12% de CO₂.

O propionato de cálcio (Ca(CH₂CH₂COOH)₂), entre os sais testados, foi o que ofereceu melhores resultados de remoção de NO_x e SO_x com um baixo tempo de residência (~ 1 segundo) e temperaturas maiores que 950° C onde se conseguiu remover mais que 80% tanto do SO_x como do NO_x presentes inicialmente.

A desvantagem desta técnica está no alto custo dos sais de cálcio de ácidos carboxílicos, em virtude do custo de produção do ácido carboxílico que atualmente provém do gás natural e do petróleo.

2.4.6 - Lavadores de Gás Tipo "Scrubber"

Uma técnica que se tem mostrado bastante eficiente no combate do NO_x é a lavagem dos gases de exaustão em lavadores do tipo "Scrubber". O lavador "Scrubber" transfere o poluente da fase gasosa para a fase líquida, para ser tratado ou mesmo reciclado. Esse tipo de lavador é tradicionalmente usado no combate ao SO_x em usinas termoelétricas (KASPER *et al.*, 1996). Uma solução básica usada na lavagem do NO_x é o hidróxido de sódio (NaOH) ou o hidrosulfito de sódio (NaHS) como afirmam ROSSI e UNFRIED (1997).

Os mecanismos que descrevem o processo de lavagem são mostrados pelas reações 2.32, 2.33 e 2.34, e o hidróxido de sódio NaOH é geralmente usado na remoção de óxidos de nitrogênio.

$$NO + NO_2 \Rightarrow N_2O_3$$
 (2.32)

 $N_2O_3 + 2NaOH \Longrightarrow 2 NaNO_2 + H_2O$ (2.33)

$$2NO_2 + 2NaOH \Longrightarrow NaNO_2 + NaNO_3 + H_2O$$
(2.34)

Teoricamente esses sais podem ser processados e posteriormente vendidos, mas o nitrito (NaNO₂) e o nitrato (NaNO₃) produzidos têm baixo valor comercial, fazendo com que esses subprodutos sejam tratados como dejetos e dispostos em aterros.

Soluções como esta tem grande desvantagem pelo alto custo de manutenção do lavador, e ainda tem a necessidade de remoção periódica dos sais precipitados em seu interior. Estes custos aumentam ainda mais quando se leva em consideração o tempo da parada para tal remoção.

Devido ao seu baixo custo e alta eficiência de remoção, o NaHS é outra base muito usada em soluções de lavagem do NO_x. Consegue-se retirar altas concentrações de óxidos de nitrogênio em gases com alta velocidade usando o hidrosulfito de sódio. As reações 2.35 e 2.36 descrevem o processo de conversão do NO_x a NaHSO₄ e N₂:

$NaHS + 2NO_2 \Longrightarrow NaHSO_4 + N_2$	(2.35)
--	--------

$$NaHS + 4NO \Rightarrow NaHSO_4 + 2N_2$$
 (2.36)

Contudo, o NaHS é considerado uma substância perigosa, exigindo que se faça uso de medidas de segurança adicionais na operação e no caso de vazamento acidental.

O procedimento para a neutralização dos efluentes do lavador "Scrubber" se faz necessário devido a sua alta alcalinidade mesmo antes da sua deposição final. Estes processos de neutralização geram gases como as mercaptanas e o hidrogênio sulfídrico (H_2S) com odor desagradável mesmo a baixas concentrações e com propriedades altamente tóxicas em altas concentrações.

Entre as alternativas para a substituição do hidrosulfito destaca-se o uso de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) que é um poderoso oxidante e forma soluções de ácido nítrico, diferentemente do NaOH e do NaHS, que formam sais de nitrato.

KASPER *et al.* (1996) destaca o uso de peróxido de hidrogênio no combate ao NO_x efluente e a possibilidade desta técnica vir a substituir a redução catalítica seletiva, (que tem um alto custo) e os queimadores de baixo NO_x (que ainda tem eficiência limitada). ROSSI e UNFRIED (1997) citam ainda que o uso de H_2O_2 pode se tornar vantajoso, quando fatores como problemas de operação, disposição dos sais produzidos, manutenção do lavador "Scrubber" e liberação de odores desagradáveis forem levados em consideração. KASPER *et al.* (1996) afirmaram que, no caso do processo já possuir um lavador tipo "Scrubber" para SO_x, as chances desta técnica se tornar atrativa economicamente aumentam.

Em testes experimentais KASPER *et al.* (1996) atingiram 75% de conversão para uma razão H_2O_2/NO de 1,6 e 97% de conversão para uma razão H_2O_2/NO de 2,6 em um reator a 500° C, sob pressão atmosférica e com tempo de residência de 0,7 segundos. O abatimento dos óxidos de nitrogênio utilizando perióxido de hidrogênio é representado pelas reações 2.37 e 2.38:

$$2NO + 2H_2O_2 \Rightarrow 2HNO_3 + 2H_2O$$

$$2NO_2 + H_2O_2 \Rightarrow 2HNO_3$$

$$(2.37)$$

$$(2.38)$$

A eficiência do peróxido de nitrogênio é semelhante ao hidróxido de sódio no combate ao NO_x , e ainda em alguns casos é um pouco mais eficiente devido ao fato das reações 2.37 e 2.38 agirem mais rapidamente em altas concentrações de NO_2 . Em relação ao hidrosulfito de sódio o H_2O_2 é menos eficaz, pois necessita de um tempo de contato maior entre as fases do que o necessário em aplicações de NaHS, segundo ROSSI e UNFRIED (1997).

Quanto aos riscos ao ambiente e os perigos operacionais, ROSSI e UNFRIED (1997) afirmam que o H_2O_2 é um produto químico compatível com o ambiente e que este apresenta um mínimo de risco de operação, principalmente quando diluído a concentrações abaixo de 8%, sabendo-se que em um lavador do tipo "Scrubber" trabalha-se normalmente com soluções de 3%.

2.4.7 - Recirculação de gases de exaustão

A recirculação de gases de exaustão (do inglês "Fuel Gas Recirculation – FGR") é um dos métodos mais usados na redução de NO_x segundo COSTA *et al.* (1996). Esta técnica baseia-se na recirculação de parte dos gases de exaustão, fazendo com que ele retorne, através de um duto externo, ao ponto de ignição. Neste percurso os produtos da combustão são então resfriados e em seguida misturado com ar fresco (RUÃO *et al.*, 1997). O resfriamento da porção recirculada somado à deficiência de oxigênio dentro da câmara provoca a diminuição do pico de temperatura reduzindo a formação de NO_x térmico considerado o principal mecanismo de formação de NO_x em combustíveis isentos de nitrogênio.

A instabilidade da chama, que provoca um aumento das emissões do monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos não queimados, é a grande desvantagem da recirculação de gases de exaustão segundo COSTA *et al.*, 1996 e BALTASAR *et al.*, 1997. MUZIO e QUARTUCY (1997) mostram que com uma taxa de recirculação de até 30% a estabilidade da chama não é afetada, porém acima disto pode haver uma perda na eficiência de queima. Entretanto RAO (1991) mostra que eficiência semelhante na redução de NO_x é conseguida com o aumento simultâneo da taxa de recirculação e o excesso de ar.

Variando o tipo de combustível (propano e etileno) e os níveis de excesso de ar (1%, 7% e 14%) COSTA *et al.* (1996) estudaram, em escala laboratorial, a influência da taxa de recirculação de gases de exaustão na estabilidade de chama, performance da combustão e emissão de poluentes, concluindo que:

- Em ambos os combustíveis o aumento da taxa de recirculação provocou queda na emissão de NO_x;
- A queda na emissão de NO_x não comprometeu a performance da combustão no que se refere à estabilidade de chama, eficiência de queima e emissão de CO;
- Nas condições de teste e com os referidos combustíveis observa-se uma taxa de recirculação ótima que reduz simultaneamente NO_x, CO e hidrocarbonetos não queimados;
- Atinge-se estabilidade de chama para taxas de recirculação de até 30% no caso do propano e de 50% para o etileno.

Consegue-se com essa técnica operar com baixos níveis de excesso de ar e com menor temperatura de combustão, evitando-se com isso o NO_x térmico.

2.4.8 - Queimadores com pré-mistura

Estudando a queima de gás combustível proveniente da gaseificação do carvão desenvolveram-se dois tipos de queimadores com pré-mistura visando alcançar os mesmos níveis de emissão de NO_x obtido na queima normal de gás natural segundo DÖBBELING *et al* (1996 e 1997). O gás obtido na gaseificação é uma mistura de H₂, CO e N₂ além de outros gases.

Uma relação ar/combustível próxima a 0,5 de coeficiente de excesso de ar com relação às condições estequiométricas é utilizada nos queimadores de pré-mistura, para se diminuir a temperatura de chama para valores abaixo de 1800 K, diminuindo também a formação do NO_x térmico (DÖBBELING *et al.*, 1997).

O risco destes queimadores é a possibilidade de ocorrer chama reversa na região de pré-mistura, caso o volume desta área seja suficiente para ocorrer a ignição (ALTPFART e CHRISTMAN, 1995).

2.4.9 - Queimadores de Baixo NO_x

Nas últimas décadas uma técnica que teve grande evolução, e ainda continua evoluindo, no controle da formação do NO_x em câmaras de combustão é o uso de Queimadores de Baixo $NO_x - QBN$ (do inglês "Low NO_x Burner – LNB"). Queimadores como estes merecem particular atenção, pois seu desenvolvimento está intimamente ligado à evolução dos trabalhos que estudam a interação entre mecanismos químicos e fenômenos físicos na formação do NO_x em processos de combustão.

O início dos anos 70 marca o desenvolvimento dos primeiros queimadores de baixo NO_x . HEAP *et al.* (1972) referenciados por MUZIO e QUARTUCY (1997) apresentam o projeto de um queimador desenvolvido no "IFRF" ("International Flame Research Foundation"), patrocinado pela EPA norte-americana com o intuito de estudar a formação de NO_x em chamas de difusão turbulenta. Os experimentos foram realizados em uma câmara de escala piloto e relacionavam a emissão de NO_x com parâmetros do queimador, tais como:

- Método de injeção do combustível;
- Grau de rotação do ar de combustão;
- Velocidade do ar de combustão;
- Ângulo de saída do bocal;
- Tipo de bocal;
- Grau de diluição do combustível (carvão pulverizado) no ar de combustão primário.

Segundo MUZIO e QUARTUCY (1997) o conceito atual de queimador de baixo NO_x foi proposto por TAKAHASHI *et al.* (1982), citados pelos primeiros, conforme o conceito MACT (do inglês "Mitsubishi Advanced Combustion Technology").

Os projetos de queimadores de baixo NO_x contêm em suas entradas de ar e de combustíveis dispositivos que direcionam a formação de uma Zona Central de Recirculação com mistura altamente rica em combustíveis, como mostram as figuras 2.3 e 2.4. Estes

projetos são citados por vários autores como JAWORZNO..., 1995; ALTPFART e CHRISTMAN, 1995; BEÉR, 1996; MUZIO e QUARTUCY, 1997; VAN DER LANS, 1997 e SANDELL, 1998. Assim se têm regiões pobres em oxigênio que, formadas pela injeção axial de combustível através da lança injetora na ZCR, direcionam o oxigênio necessário para a combustão por meio de um escoamento rotacional posterior a ZCR.

Nestes queimadores o controle da emissão de NO_x é dado em duas etapas segundo VAN DER LANS *et al.* (1997):

- Na ZCR, onde a temperatura é alta devido à recirculação de gases quentes, não ocorre formação de NO_x térmico, pois há deficiência de oxigênio;
- Na região posterior à ZCR, onde a temperatura é baixa e a concentração de oxigênio é alta devido a injeção de ar secundário também não ocorre a formação de NO_x térmico em virtude da baixa temperatura.



Figura 2. 3. Gerador de escoamento com rotação por entrada tangencial e axial de ar (BEÉR e CHIGIER, 1972. p.108)



Figura 2. 4. Gerador de escoamento com rotação por blocos móveis (BEÉR e CHIGIER, 1972. p.108)

Normalmente o uso de baixo excesso de ar é uma característica comum, mas não uma regra para queimadores de baixo NO_x . Alguns projetos de queimadores operam com alto nível de excesso de ar acoplado com um também alto nível de rotação do escoamento, a fim de manter a estabilidade de chama, segundo COE (1980). Aproveitando o efeito da rotação no escoamento opera-se com baixo excesso de ar tendo com isto uma performance melhor. Mas, neste caso ocorre a formação de uma grande zona de alta intensidade de chama e aumento nos níveis de emissão de NO_x , em relação à queima com menor efeito de rotação e maior excesso de ar.

SANDELL (1998) afirma que em relação aos queimadores tradicionais, os QBN podem reduzir a emissão entre 20 e 60%. E a EPA (1999) afirma que nestes queimadores acontece uma redução em torno de 70 a 90%.

As diferenças entre os QBN esta na forma pela qual o combustível é injetado e na geometria do gerador de rotação para o ar secundário. Segundo SANDELL (1998) os queimadores de baixo NO_x têm um alto investimentos em equipamento, porém seus gastos com manutenção são baixos.

2.4.10 - Queimador de mistura rápida

O desenvolvimento de um queimador industrial baseado nas relações entre estequiometria, temperatura e NO_x teve início em 1993 na Radian Corporation (Austin, Texas – EUA). Desenvolvido para queimar óleo combustível ou gás, o queimador de mistura rápida (do inglês "Rapid Mix Burner – RMB") conseguiu diminuir a emissão de NO_x para uma ordem de 10 ppm. Os detalhes deste queimador são descritos por ALTPFAART e CHRISTMAN (1995). A figura 2.5 mostra um esquema do princípio de operação do queimador de mistura rápida.



Figura 2. 5. Princípio de operação do queimador de mistura rápida (ALTPFART e CHRISTMAN, 1995. p.29)

Assim como os queimadores de baixo NO_x , o queimador de mistura rápida, que pode também ser chamado de queimador de ultrabaixo NO_x , considera o NO_x térmico como a maior fonte de óxidos de nitrogênio na queima de gás natural e combustíveis nitrogenados. Entretanto para atingir níveis de emissão de NO_x abaixo de 10 ppm, o mecanismo de NO_x imediato deve também ser considerado. A formação da zona de mistura rica em combustível no QBN promove a combustão incompleta nesta região. Com isso radicais hidrocarbonetos (CH_i) são produzidos iniciando a rota do NO_x imediato. Segundo ALTPFART e CHRISTMAN (1995) em condições de mistura rica onde a razão combustível/ar está abaixo de 0,6 (em relação à estequiometria) tanto HCN quanto NH₃ (produtos do NO_x imediato) são formados pela reação entre os radicais CH_i e o N₂. Quando a razão combustível/ar é menor que 0,5 praticamente todo NO_x formado provêm do NO_x imediato.

Em queimadores de baixo NO_x cerca de 20 ppm de NO_x imediato são formados na região de mistura rica em combustível. Esses 20 ppm não são destruídos no decorrer do processo limitando então a eficiência dos QBN no combate à formação de NO_x . Não se consegue, segundo ALTPFART e CHRISTMAN (1995), alcançar níveis de emissão de óxidos de nitrogênio abaixo de 10 ppm em queimadores de baixo NO_x .

Desta forma a Radian Co. entendeu que para alcançar baixíssima emissão de NO_x deveria evitar primeiramente a formação da zona de mistura rica em combustível, que poderia formar NO_x imediato. Em seguida, o projeto do queimador de mistura rápida precisaria diminuir a temperatura de chama a fim de reduzir o NO_x térmico.

A formação da zona de mistura rica em combustível foi evitada realizando uma eficiente mistura ar/combustível próximo à saída do queimador. Essa mistura perfeita aumenta a eficiência de queima, reduzindo a formação de radicais CH_i e consequentemente a formação de NO_x imediato.

A recirculação de gases de exaustão foi utilizada no projeto para controlar a temperatura de chama da combustão, reduzindo o NO_x térmico. Essa porção de gás recirculado é injetado com ar de combustão num ponto antes do bocal do queimador.

A mistura da porção de gás recirculado com o combustível se dá por meio de aletas fixadas na parte externa da lança de combustível. Existem, na base das aletas, cavidades que promovem a injeção de combustível. Este esquema promove uma mistura perfeita entre as fases antes do ponto de ignição. Um fluxo de ar secundário surge quando a escala de queima ultrapassa 30 GJ/h.

Esse queimador muito se parece com um queimador de pré-mistura. Entretanto possui uma importante distinção: no queimador de mistura rápida, o volume da região onde ocorre a pré-mistura é pequeno, o que evita a formação de chama reversa. A rápida mistura ocorrida neste queimador promove uma alta estabilidade de chama.

2.4.11 - Injeção de água ou vapor

Um meio simples usado para controlar a emissão de NO_x é a injeção de água ou vapor na zona de combustão da câmara. Segundo RAO (1991) os dados da época não ofereciam confiabilidade quanto ao seu uso em caldeiras, entretanto alguns resultados obtidos em turbinas a gás mostram um grande potencial para esta técnica.

O princípio básico da injeção da água ou do vapor é a redução que esta causa na temperatura da combustão, controlando com isso o NO_x térmico. RAO (1991) diz que a injeção de 5 a 10% (em relação ao fluxo de gases) de água ou vapor pode, em determinadas condições, diminuir o nível de temperatura da fornalha, da mesma forma que ocorreria usando a técnica da recirculação de gases de exaustão.

A desvantagem deste método de controle é a possível instabilidade de chama que resultaria numa perda de eficiência de queima.

2.4.12 - Injeção de hidrocarboneto para Requeima

Requeima (do inglês "Reburning") é um processo para a redução do NO_x pela adição de um combustível hidrocarboneto na zona de baixo fluxo de combustão, como mostrado na equação 2.39, sendo que o hidrocarboneto adicionado cria uma região rica em combustível, que acrescenta radicais de hidrocarbonetos CH_i que reagem com o NO_x para formar HCN, que pode ser reduzido a N₂, como mostrado anteriormente, utilizando o mecanismo do NO_x combustível.

$$NO + C_x H_v = HCN + \dots$$
 (2.39)

Esta reação de redução também pode ser uma redução para o NO. A zona de requeima normalmente é operada com temperatura mais baixa e com concentração de hidrocarboneto mais alta, em regiões menos turbulentas. A efetividade deste processo depende de vários fatores incluindo a mistura anterior e a estequiometria na região de requeima (HILL e SMOOT, 2000).

A eficiência da remoção do NO_x depende de muitos fatores, como o tipo e a quantidade de combustível de Requeima, localização onde ocorre a mistura com o ar injetado e a intensidade desta mistura, afirmam LISSANSKI *et al.* (2001).

A desvantagem da Requeima é a necessidade de criar uma região rica em combustível para se tornar efetiva. Isto é realizado pela adição de hidrocarboneto que pede um aumento do reator para que a queima deste combustível adicional seja completa. A zona rica em combustível também cria um ambiente redutor que podem conduzir à deterioração da fornalha, como afirmam HILL e SMOOT (2000).

Segundo HILL e SMOOT (2000), recentes trabalhos mostram que a Requeima pode ser executada em condições de oxidação mais gerais, ou seja, explorando pequenas regiões ricas em combustíveis que resultam em um sistema mais completo. Dados mostram que a Requeima em pequenas regiões pobres em combustíveis torna as reações mais lentas, diminui a temperatura e com isto não se aumenta a emissão do NO_x térmico.

2.5 - Fluidodinâmico de Câmaras de Combustão

BIZZO (1997) afirma que necessidade de se desenvolver queimadores com alta eficiência de queima através de uma boa estabilidade de chama motivou estudos da aerodinâmica de combustores.

O projeto de queimadores com alta eficiência de queima e baixo nível de emissão de poluentes exige o conhecimento da formas de escoamento no interior das câmaras de combustão (MAFRA, 2000).

Os queimadores de baixo NO_x têm sido desenvolvidos nas últimas duas décadas usando os princípios de cinética química da oxidação do nitrogênio e do estudo do escoamento no interior de câmaras de combustão.

Escoamentos laminares evoluem no interior da câmara a partir do bocal passando por quatro regiões distintas (figura 2.6). Entretanto, a presença de turbulência é de vital importância tanto para aumentar a eficiência de queima (BEÉR e CHIGIER, 1972) quanto para minimizar a emissão de NO_x (COE, 1980; AOKI *et al.*, 1992; ANDREWS *et al.*, 1992; SCHENELL *et al.*, 1993; ALTPFART e CHRISTMAN, 1995; HESSELMANN, 1997; VAN DER LANS *et al.*, 1997; YEGIAN e CHENG, 1998; ADRIAN HSIEH *et al.*, 1998; MAFRA, 2000).



Figura 2. 6. Região do jato sem turbulência (BEÉR e CHIGIER, 1972 p.10)

Entretanto a presença de escoamento turbulento dificulta a predição da emissão de NO_x devido à interação de fatores químicos com fatores aerodinâmicos. Acredita-se ainda que a emissão de NO_x é diretamente proporcional às flutuações locais de temperatura provocadas pelo escoamento com rotação (HAYHURST e VINCE, 1980).

Análises da literatura revelam que o número de rotação pode ser otimizado a fim de minimizar a emissão de poluentes nitrogenados e maximizar a eficiência da queima, pois quanto mais próximo das reações estequiométricas melhor a performance da combustão, mas parece haver contradições quanto à influência do escoamento com rotação na emissão do NO_x.

2.5.1 - Escoamento com rotação ("Swirl")

BEÉR e CHIGIER, (1972) descrevem estudos de escoamento com rotação (figura 2.7) a fim de melhorar a estabilidade de chama e consequentemente a eficiência de queima. A instabilidade de chama é responsável pela perda de calor na região de combustão devido à dispersão da chama. Numa chama dispersa a temperatura cai favorecendo a formação de CO devido à queima incompleta do combustível. Em um escoamento com rotação, ocorre a recirculação de gases próximos ao queimador, dando origem à região denominada Zona Central de Recirculação (ZCR).



(BEÉR e CHIGIER, 1972. p.103).

BEÉR e CHIGIER (1972) propuseram, um número adimensional, chamado de número de rotação (do inglês "Swirl Number") como mostra a equação 2.40, com a finalidade de avaliar a intensidade dos jatos com rotação.

$$S = \frac{G\varphi}{Gx.R} \tag{2.40}$$

sendo

e

$$G_{\varphi} = \int_{0}^{\kappa} (W.r).\rho.U.2\pi.r.dr$$
(2.41)

$$G_{x} = \int_{0}^{R} U.P.2\pi .r.dr + \int_{0}^{R} U.P.2\pi .dr$$
(2.42)

onde:

 G_{ϕ} – quantidade de movimento tangencial;

G_x – quantidade de movimento axial;

R – raio da saída do gerador de rotação;

U – componente axial da velocidade dos gases;

W - componente tangencial da velocidade dos gases;

r – posição radial;

P - pressão estática;

 ρ – densidade dos gases.

BEÉR e CHIGIER (1972) citam dois dispositivos usados na geração de escoamento com rotação: entrada tangencial e outra axial de ar e passagem por blocos móveis. Já VAN DER LANS *et al.* (1997), apresentam mais três formas de se promover este tipo de escoamento que são:

 Aletas axiais: usadas para injeção de ar primário ou em queimadores de pequena escala (JAWORZNO III, 1995);

- Aletas radiais: geralmente usadas em aplicações industriais para suprir ar secundário e terciário à combustão (ALTPFART e CHRISTMAN, 1995);
- Entrada tangencial dos gases: não é usado com freqüência, como afirma KENBAR, 1995.

Foi observado por BELTAGUI e MACCALLUM (1976a) que as dimensões da Zona Central de Recirculação (ZCR) em escoamentos altamente confinados, eram mais dependentes do diâmetro da fornalha do que do diâmetro do gerador de rotação, que normalmente é o próprio queimador. Desta forma propuseram uma nova definição de número de rotação substituindo o raio do gerador de rotação (R), pelo diâmetro da câmara (D) e omitindo o termo de pressão. O novo número de rotação (S*) permite estabelecer similaridade do escoamento com maior independência da relação do diâmetro da câmara de combustão e do diâmetro do queimador e da condição do escoamento ser isotérmico com chama. O trabalho demonstra ainda que existe uma relação linear entre a intensidade da ZCR e o número de rotação para escoamento confinado. Segundo BELTAGUI e MACCALLUM (1976b) a intensidade da ZCR é definida pela razão entre o fluxo reverso e o fluxo total de gases na região.

A similaridade entre escoamento com rotação a frio e escoamento com rotação a quente (combustão) foi estudado por EL-MAHALLAWAY *et al.* (1977) que concluiu que:

- Na combustão o aumento da velocidade axial diminui o tamanho da ZCR, isto ocorre devido a quantidade de movimento axial ocorrido neste processo;
- A combustão altera a distribuição das linhas de corrente, mas seu efeito sobre a quantidade de movimento tangencial é pequeno.

STULES *et al.* (1979) utilizaram-se de um modelo com água para comparar o comportamento de um combustor ciclônico. Baseado na observação do padrão de escoamento e na localização e formato na Zona de Recirculação propuseram uma correlação do numero de rotação a frio e levando em considerarão o efeito da combustão (equação 2.43).

$$S_{combustão} \approx S_{isotérmico} \times \left(\frac{T_{entrada}(K)}{T_{saida}(K)}\right) \approx S_{isotérmico} \left(\frac{\rho_{saida}}{\rho_{entrada}}\right)$$
 (2.43)

Estudos feitos por EL-MAHALLAWAY *et al.* (1977), WEBER e DUGUÉ (1992) propuseram as similaridades entre o escoamento com rotação a quente e o escoamento com rotação a frio, chegando às mesmas conclusões. Sugeriram então um número de rotação efetivo para o caso de fornalhas altamente confinadas e chamas com mistura perfeita (equação 2.44).

$$S_{efetivo} = S\left(\frac{G_{x(frio)}}{G_{x(combustão)}}\right)$$
(2.44)

A equação 2.44 simplifica-se no caso de baixo número de rotação (S < 0,7), ficando igual à equação 2.43 de STULES *et al.* (1979).

Segundo VAN DER LANS *et al.* (1997) não existe uma correlação universal que permita relacionar um dado número de rotação com o seu respectivo perfil de escoamento, quando este é gerado por diferentes geometrias. Isto torna inválida a comparação entre resultados quando o escoamento com rotação é produzido pelo mesmo tipo de gerador em diferentes geometrias de câmara de combustão.

2.5.2 - Distribuição do Tempo de Residência (DTR)

A Distribuição do Tempo de Residência (DTR) representa a distribuição dos tempos que cada fração do fluido permanece dentro do reator. Em câmaras de combustão é um parâmetro de grande importância quanto ao estudo da formação de NO_x. Entretanto a DTR em ambientes de combustão não tem sido amplamente estudada, devido à grande dificuldade de se estabelecer parâmetros de medida em condições tão adversas, instrumental adequado, além da dificuldade de rastreamento de um conjunto de partículas em um ambiente oxidante. Uma boa descrição é a teoria da Distribuição do Tempo de Residência, apresentada por LEVENSPIEL (1972).

Com o objetivo de analisar a estabilidade da chama CLAYPOLE e SYRED (1982) estudaram o escoamento com rotação. Com este trabalho propuseram um modelo simplificado para o escoamento na câmara. Nele, a região de chama é dividida em duas partes, sendo a primeira uma região de mistura perfeita (reator de mistura perfeita) e a segunda uma região sem mistura (reator de fluxo pistonado).

KENBAR (1995) estudou a aerodinâmica e a temperatura de combustão para uma câmara com injeção periférica de combustível, e construiu um perfil de velocidade axial experimental (figura 2.8) e também construiu perfis de temperaturas como na figura 2.9 usando como combustível o gás natural. Neste perfil observa-se uma região de intensa mistura promovida pelo refluxo próximo ao queimador e uma região de fluxo desenvolvido onde o perfil de velocidade é praticamente constante. Isso revela um comportamento semelhante a um reator bem misturado no início da câmara e de reator de fluxo pistonado na parte final.

Neste trabalho procurou-se usar a mesma forma de observação, mesmo sabendo das diferenças de combustível e número de rotação.



Figura 2. 8. Perfil de velocidade tangencial de uma câmara de combustão cilíndrica para um número de rotação de 0,90 (KENBAR, 1995. p.338).



BIZZO (1997) afirma que o modelo proposto por CLAYPOLE e SYRED (1982) é ideal para um incinerador com baixa emissão de poluentes. Uma distribuição não uniforme da DTR faz com que algumas partículas do fluido passem rapidamente pela câmara sem que tenham tido um tempo hábil para sua reação, enquanto outras partículas tenham um tempo de residência desnecessariamente maior que o tempo médio de residência.

O NO_x térmico é o mecanismo que é considerado a principal rota de formação de óxidos de nitrogênio em processos de combustão de combustíveis não-nitrogenados, pois tem uma baixa taxa de reação. Isso faz com que se desejem perfis de velocidade constantes na parte final da câmara, de modo a se evitar que algumas parcelas de fluido permaneçam dentro do reator tempo suficiente para formar NO_x, conforme visto em CARVALHO JR e LACAVA (2003)

"o mecanismo de Zeldovich, que normalmente representa 70% do NO_x formado, é mais lento que o processo de oxidação do combustível. Dessa forma quanto maior o tempo que os gases de combustão permanecerem em temperatura elevada maior será a quantidade total de NO_x formado".

2.6 Cinética química do etanol

Para entender a fase gás do processo de combustão do etanol, tem que se examinar a estrutura de etanol. Etanol é uma molécula ligeiramente polar com um ângulo de ligação de aproximadamente 105 graus entre o átomo de carbono central e o OH radical (figura. 2.10). Este ângulo de ligação é semelhante em tamanho para a molécula de água que também é ligeiramente polar na natureza. Por causa desta semelhança, água e etanol são miscíveis em todas as proporções.



Figura 2. 10. Ângulos de ligação do etanol e água (MARINOV, 1998).

Em concentrações maiores que 95%, para a extração da água do etanol é necessária a adição química de co-solventes. As forças de ligação do etanol são um híbrido de propano e metanol. O radical OH no etanol tem as mesmas forças de ligação que o OH radical no metanol. A ligação de carbono para carbono é semelhante em força para com o carbono para carbono que une o propano. Reações nessas partes da molécula de etanol acontecem da mesma maneira que na reação do metanol e propano.

Na cinética da fase gás do etanol quando ele é queimado, abre-se em três isômeros, CH3CH2O, CH3CHOH, e C2H4OH, dependendo de qual átomo de hidrogênio é afastado.

Por causa das forças de ligação diferentes na molécula, alguns mecanismos de reação são mais predominantes a uma temperatura que outro. O etanol pode reagir com vários outros radicais diferentes, há 15 hidrogênios disponíveis nas reações iniciais que podem acontecer. Estas reações são listadas na Tabela 2.1

Nº	Reação
1	C2H5OH + OH <= => C2H4OH + H2O
2	C2H5OH + OH <= => CH3CHOH + H2O
3	C2H5OH + OH <= => CH3CH2O + H2O
4	C2H5OH + H <= => C2H4OH + H2
5	C2H5OH + H <= => CH3CHOH + H2
6	C2H5OH + H <= => CH3CH2O + H2
7	C2H5OH + O <= => C2H4OH + OH
8	C2H5OH + O <= => CH3CHOH + OH
9	C2H5OH + O <= => CH3CH2O + OH
10	C2H5OH + CH3 <= => C2H4OH + CH4
11	C2H5OH + CH3 <= => CH3CHOH + CH4
12	C2H5OH + CH3 <= => CH3CH2O + CH4
13	C2H5OH + HO2 <= => C2H4OH + H2O2
14	C2H5OH + HO2 <= => CH3CHOH + H2O2
15	C2H5OH + HO2 <= => CH3CH2O + H2O2

 Tabela 2. 1. Reações de Combustão Iniciais de Etanol (MARINOV, 1998)

Também há quatro reações de decomposição que podem acontecer porque o etanol é uma molécula de múltiplos átomos (figura 2.11 topo), com forças internas que agem nestas reações. Todas as ligações têm freqüências vibracionais e rotacionais associadas a estas forças. Quando uma outra molécula está em sincronia com os modos harmônicos e vibracionais de uma molécula de etanol e elas colidem podem se decompor, perdendo um OH radical (figura 2.11B). Quando dois radicais de H alinham-se com a freqüência de rotacional, e dependendo da geometria do etanol, podem quebrar as ligações do carbono e oxigênio (figura 2.11B). A água pode se formar da decomposição do etanol (figura 2.11C).

A ligação do C-C também pode quebrar a reação de etanol inicial conforme figura 2.11D). Com estas situações acrescentam-se ainda mais quatro reações ao mecanismo de combustão de etanol (Tabela 2.2) (MARINOV, 1998).



Figura 2. 11. Decomposição da molécula do Etanol. *Topo*: Molécula de Etanol antes da decomposição; *A*: Formação de H2; *B*: Formação de radical OH; *C*: Formação de molécula de H₂O; *D*: cisão do C-C. (MARINOV, 1998)

No.	Reação		
16	C2H5OH + (M) <= => CH2OH + CH3 + (M)		
17	$C2H5OH + (M) \le = C2H5 + OH + (M)$		
18	$C2H5OH + (M) \le C2H4 + H2O + (M)$		
19	C2H5OH + (M) <= => CH3HCO + H2 + (M)		

 Tabela 2. 2. Reações de Decomposição de Etanol (MARINOV, 1998)

Na figura 2.12 são mostradas as principais rotas das reações para a combustão estequiométrica do etanol com o ar (EGOLFOPOULOS, *et al.* 1992; NORTON e DRYER, 1992). As reações iniciais dominantes dos H são mostradas na Tabela 2.1.

A maioria dos isômeros que prevalecem formarão CH_3CHOH que reage com oxigênio para formar acetaldeídos. Eteno é produzido do C_2H_4OH . Uma menor população

de isômeros é de CH₃CH₂O que forma formaldeídos. Cada um dos intermediários estáveis são potenciais poluentes como o acetaldeído, uma particular preocupação é que quase a metade do etanol pode decompor a CH₃CHOH (NORTON e DRYER, 1992).



Figura 2. 12. Principais rotas para combustão estequiométrica do etanol (EGOLFOPOULOS, *et. al*, 1992; NORTON e DRYER, 1992).

A análise executada por Egolfopolous, et al. (1992) mostra que a reação

$$C_2H_5OH + OH \le > C_2H_4OH + H_2O$$
 (2.45)

(a primeira reação na Tabela 2.1) era a única reação importante na combustão do etanol. Outras reações importantes nas cadeias das reações de oxidação do CO são:

$$H + O_2 \le => OH + O$$
 (2.46)

$$CO + OH \le D_2 + H \tag{2.47}$$

Essas reações, em geral são importantes na combustão de hidrocarbonetos. A reação 2.45, na combustão do etanol, mostra um aumento na produção de radicais OH para uma pequena dissociação de água na produção de catalisadores que favorecem a propagação da chama.

2.7 Velocidade de chama do etanol

Velocidade de chama é a velocidade de uma frente de chama de uma mistura ar/combustível, efetuada sob determinada condição. O conhecimento de parâmetros de velocidade de chama é útil para a intercambialidade dos combustíveis, no sentido de garantir a estabilidade da combustão em queimadores.

Dois fenômenos podem ocorrer em queimadores de gás, sendo um deles o deslocamento da chama quando a velocidade da mistura não queimada é maior que a velocidade de chama, e o outro, o retorno da chama quando sua velocidade é maior que a velocidade da mistura ar/combustível como afirma SANCHES (2000).

Para a medição de velocidade de chama em combustíveis líquidos existem diferentes métodos. Um dos métodos utiliza o velocímetro laser Doppler, como fez EGOLFOPOULOS, *et al.* (1989). Já GULDER (1984) faz uso de um vaso esférico de 0,325m de diâmetro e obtêm medições através de um dispositivo fotográfico, com 8000 fotos por segundo. Todos os métodos têm em comum a vaporização do combustível em várias temperaturas diferentes.

As medidas de velocidade para a queima de etanol foram encontradas em EGOLFOPOULOS, *et al.* (1992), GULDER (1982) ou ainda em MARINOV (1998), que fez um desenvolvimento numérico e comparativo entre os dois autores anteriores.

A figura 2.13 mostra os resultados obtidos por EGOLFOPOULOS, *et al.* (1992). Notemos que a maior velocidade laminar de chama encontrada foi de 48 cm/s à pressão de 1 atm com uma distribuição ar/combustível em torno de 1,08.



Figura 2. 13. Velocidade de chama do etanol por EGOLFOPOULOS, et al. (1992).

Já a figura 2.14 mostra a velocidade de chama do etanol comparada com outros combustíveis em GULDER (1984). A figura 2.15 mostra a velocidade de chama somente do etanol, retirada do gráfico anterior, nota-se que a maior velocidade encontrada foi de 0,609 m/s com o coeficiente estequiométrico da mistura de ar/combustível em torno de 1,08, diferente de GULDER (1982) que indica uma velocidade de 47 cm/s (figura 2.16).



Figura 2. 14. Velocidade de chama do etanol comparada com outros combustíveis (GULDER, 1984)



Coeficiente de Estequiométrico



Na figura 2.16 é mostrado um comparativo feito por MARINOV (1998) com seu equivalente numérico e os dados empíricos dos dois outros autores, GULDER (1982) e EGOLFOPOULOS (1992).



Figura 2. 16. Comparativo da velocidade de chama do etanol entre o método numérico de MARINOV (1998) e os outros autores.

Capítulo 3

Descrição da Bancada Experimental

A descrição da bancada, apresentada por BIZZO (1997) e MAFRA (2000), foi adaptada a este trabalho.

3.1 - Fluxograma do Processo

A bancada experimental é composta por uma câmara de combustão cilíndrica horizontal com um queimador equipado com dispositivo de regulagem do número de Rotação. O queimador pode ser alimentado com gás liquefeito de petróleo (GLP) e com vapor de combustível líquido, neste caso, etanol vaporizado, produzido num vaporizador de combustível. Os produtos de combustão saem da fornalha por um duto de exaustão, onde são resfriados rapidamente por um lavador e então succionados por um exaustor para a chaminé de descarga de gases que os lança para fora do laboratório. O fluxograma original da câmara com a linha de combustível (GLP) está apresentado na figura 3.1 (MAFRA, 2000); a figura 3.2 mostra a câmara já modificada. A figura 3.3 trás o esquema da câmara de combustão após as modificações.



Figura 3. 1. Fluxograma original da câmara com a linha de combustível líquido (MAFRA, 2000)



Figura 3. 2. Vista geral da bancada experimental.



Figura 3. 3. Fluxograma do processo e instrumentação da bancada modificada.

3.2 - Fornalha de Testes

A câmara de combustão tem formato cilíndrico com diâmetro interno de 470 mm e é construída em módulos de 600 mm, num total de 5 módulos, podendo medir até 3000 mm de comprimento. Neste trabalho foram utilizados três módulos, totalizando um comprimento de 1800 mm (figura 3.4). As dimensões da câmara foram adotadas de maneira que as sondas de medição de temperatura e concentração de gases produzissem pouca interferência no escoamento e que fosse possível reproduzir condições típicas encontradas em câmaras de combustão.

O corpo da fornalha é construído em chapa de aço carbono com revestimento interno de manta refratária com espessura de 150 mm. Na lateral da fornalha, em cada módulo, foi construída uma abertura retangular com dimensões 50 x 500 mm que permite a inserção de sondas para medição de temperatura e composição dos gases de combustão em 90% do comprimento da fornalha. O fechamento destas aberturas é feito com tijolo isolante de modo a permitir a introdução das sondas com a retirada de apenas um tijolo e fechada completamente por isolante térmico.



Figura 3. 4. Dimensões principais (em mm, sem escala, da câmara de combustão)

3.3 - Queimador

O queimador com número de rotação variável é construído com blocos direcionais, em aço inoxidável, conforme BEÉR E CHIGIER (1972). O número de rotação da fornalha é regulado através da variação da posição angular do bloco móvel, dosando a parcela de ar de combustão na direção radial e outra parcela de ar na direção angular, que possui uma componente de velocidade tangencial. A figura 3.5 apresenta o sistema de blocos móveis. A figura 3.6 mostra o esquema do conjunto do queimador.



Figura 3. 5. Sistema de blocos móveis para regulagem do número de rotação.



Figura 3. 6. Queimador com gerador de rotação do ar de combustão

A lança de combustível permite a injeção de GLP e de Etanol que correm paralelos no interior do duto central permitindo independência dos combustíveis. Com dispositivos de segurança, o sistema de combustão foi equipado com programador de combustão, sensor ultravioleta para detecção de chama, sistema de ignição por eletrodos e válvula solenóide na alimentação de GLP. Já na alimentação do etanol vaporizado o processo é todo manual, possuindo válvulas de fechamento rápido e, para manter a segurança, o etanol somente era injetado quando todo o sistema atingisse no mínimo 800°C. A vazão de GLP é medida por um rotâmetro e a vazão de ar de combustão por uma placa de orifício projetada segundo a norma ISO 5167.

3.4 - Vaporizador de Combustíveis

O vaporizador de combustíveis líquidos é composto de uma serpentina de aço inoxidável com nove metros (9 m) de comprimento e diâmetro interno de nove milímetros (9 mm), aquecido externamente por cinco resistências elétricas, sendo que as três resistências inferiores possuem potência de 1200 W e as duas superiores possuem potência de 1000 W. Todas as resistências possuem ligações elétricas independentes e a última resistência é ligada a um controlador digital de temperatura e que trabalha em on/off. O vaporizador é alimentado com combustível por uma pequena bomba rotativa automotiva em um circuito de alimentação, com um retorno para o excesso de combustível, limitada por uma válvula agulha e um manômetro para a verificação da pressão do circuito. Tem-se também um rotâmetro para a aferição da vazão de combustível que entra no vaporizador e ainda possui uma válvula agulha para o controle da vazão (figuras 3.7 e 3.8).



Figura 3. 7. Esquema do Vaporizador



Figura 3.8. Foto do Vaporizador

3.5 - Linha de Exaustão dos Gases de Combustão

O duto da linha de exaustão dos gases de combustão da fornalha tem 178 mm de diâmetro interno por 1200 mm de comprimento. É composto internamente por um prémoldado de fibra cerâmica rígida, com isolamento térmico de 120 mm de manta refratária. Na entrada do duto, foi instalado um misturador estático, construído em aço inoxidável refratário tipo AISI 310. A finalidade do misturador estático é homogeneizar a concentração dos gases de combustão na saída da fornalha antes da tomada de amostra, cuja sonda de amostragem está localizada no final do duto de saída. Além do misturador estático, um trecho reto de 5 diâmetros contribui para a homogeneização da mistura de gases e da temperatura de saída. Um termopar tipo K está instalado na mesma secção da sonda de amostragem e foi utilizado como temperatura de referência.

Os produtos de combustão são resfriados rapidamente por um lavador úmido de gases. Os gases são então succionados por um exaustor, que os envia à chaminé. Uma válvula tipo borboleta permite regular a vazão total de gases e a pressão na câmara de combustão. Um termopar tipo J e um manômetro de coluna de água indicam temperatura e pressão na entrada do exaustor. Um manômetro inclinado de coluna de água foi instalado na região central da câmara de combustão para monitorar a regulagem da pressão interna da câmara próximo de zero.

Para a fixação das sondas (pirômetro de sucção e sonda de amostragem de gases) utilizou-se uma mesa com rodas de aço que corre sobre trilhos, axialmente à bancada experimental, sendo que as sondas corriam firmemente, também sobre trilhos, trilhos estes, na posição radial. Tanto a mesa quanto o suporte das sondas tinham escalas fixas que serviam para a orientação das posições de colocação das sondas garantindo uma efetiva repetibilidade nas posições estudadas (figura 3.9).



Figura 3. 9. Fotos da mesa-suporte das sondas

3.6 - Descrição da Instrumentação

3.6.1 - Medidores de Vazão, Temperatura e Pressão.

Os instrumentos utilizados na bancada experimental e suas características estão listados nas Tabelas 3.1 a 3.4.

Item	Fluido	Тіро	Escala	Precisão	Fabricante
V1	GLP	Rotâmetro	1 a 11 Nm ³ /h, densidade 2,272 kg/m ³	3% + 0,11 Nm ³ /h	Gemu mod. 875/21/44
V2	Ar de combustão	Placa de orifício d/D = 0,77	Até 550 kg/h	0,8%	Laboratório norma ISO 5167, ed. 1980
V3	Produtos de combustão - saída do pirômetro de sucção	Rotâmetro	200 a 2500 Nl/h de ar, densidade 1,293 kg/m ³	3% + 25 Nl/h	Gemu mod. 875/21/15
V4	Etanol	Rotâmetro	0 a 43 l/h de etanol	3% l/h	Gilmont mod. 875/21

Tabela 3. 1. Características dos medidores de vazão.
Item	Fluido	Tipo	Precisão	Dimensões	Fabricante
T1	Ar de combustão	J	+- 4°C	3 mm, inox 316	Robert Shaw
Т2	Produtos de combustão - saída da fornalha	К	+- 1%	3 mm, inconel	Robert Shaw
Т3	Produtos de combustão - saída do lavador	J	+- 4°C	3 mm, inox 316	Robert Shaw
T4	Produtos de combustão - em chama - pirômetro de sucção	S	+- 0,5%	0,35 mm, tubo capilar 99% Al ₂ O ₃	Robert Shaw
Т5	Produtos de combustão - saída do resfriador do pirômetro de sucção	J	+- 4°C	1,6 mm, inox 316	Robert Shaw
Т6	Gás de amostragem - saída da sonda refrigerada	J	+- 4°C	1,6 mm, em inox 316	Robert Shaw
ТС	Vapor de etanol	J	+- 4°C	3 mm, inox 316	Robert Shaw
T8	Temperatura da resistência	J	+- 4°C	3 mm, inconel	Robert Shaw
Т9	Temperatura da serpentina	J	+- 4°C	3 mm, inconel	Robert Shaw
T10	Reserva	J	+- 4°C	3 mm, inconel	Robert Shaw

Tabela 3. 2. Características dos sensores de temperatura.

Tipo	Escala	Precisão	Fabricante	Modelo
J	-20 a 800° C	0,25% +- 1 dígito	Robert Shaw	IDT-800
K	-20 a 1250° C	0,25% +- 1 dígito	Robert Shaw	IDT-800
S	-20 a 1700 °C	0,25% +- 1 dígito	Robert Shaw	IDT-800

 Tabela 3. 3. Características dos medidores eletrônicos de temperatura.

Item	Fluido	Tipo	Escala	Precisão
P1	Ar de combustão	Coluna de água	-1000 a 1000 mm	1 mm
P2	Produtos de combustão - saída do lavador	Coluna de água	-1000 a 1000 mm	1 mm
Pk	Produtos de combustão - saída da fornalha	Coluna de água	-1000 a 1000 mm	1 mm
Р5	Água de recirculação do lavador/resfriador	Bourdon	0 a 10 kgf/cm ²	1 kgf/cm ²
P6	Pressão a jusante da praça de orifício	Coluna de água	-1000 a 1000 mm	1 mm
P7	Pressão a montante da praça de orifício	Coluna de água	-1000 a 1000 mm	1 mm
P8	Água de refrigeração da sonda de amostragem de gases	Bourdon	0 a 10 kgf/cm ²	1 kgf/cm ²
Р9	Água de refrigeração do pirômetro de sucção	Bourdon	0 a 10 kgf/cm ²	1 kgf/cm ²
P10	Câmara de combustão	Inclinado	10 mm	0,2 mm

Tabela 3. 4. Características dos medidores de pressão.

3.6.2 - Pirômetro de Sucção

A medida de temperatura dos gases de combustão no interior da fornalha foi feita com uma sonda de sucção de gases, onde um sensor de temperatura é parcialmente protegido da radiação no interior da fornalha por uma dupla couraça de material refratário. O pirômetro de sucção foi projetado e construído seguindo recomendações de projeto e operação de CHEDAILLE e BRAUD (1972).

A fim de interferir o mínimo no escoamento dos gases de combustão, foi selecionado o menor diâmetro possível, considerando as dimensões dos tubos de alumina e dos tubos capilares para suporte do termopar disponíveis comercialmente. O diâmetro externo da sonda na ponta de cerâmica é 15 mm. A figura 3.10 apresenta um desenho esquemático do pirômetro, enquanto a figura 3.11 mostra o fluxograma do sistema de sucção do pirômetro.



Figura 3. 10. Pirômetro de sucção.



Figura 3. 11. Fluxograma do sistema de sucção do pirômetro.

Para minimizar o erro de medição da temperatura do gás, CHEDAILLE e BRAUD (1972) recomendam velocidade de sucção da ordem de 100 a 200 m/s ou fluxos de sucção da ordem de 50 x 10^3 kg/m²h. Nas dimensões escolhidas no presente projeto, operou-se com taxa de sucção de 70 x 10^3 kg/m²h e velocidade na ponta do termopar de 85 m/s. Nestas condições, a massa succionada pelo pirômetro em operação representava menos de 0,5% da descarga total de gases dentro da câmara de combustão, produzindo pouca distorção das linhas de corrente do escoamento no interior desta.

A aquisição de dados foi feita através de um termopar tipo "S" conectado, por um cabo de extensão blindada eletromagneticamente, a uma placa de aquisição de dados da marca Linx, devidamente aterrada, com uma taxa de aquisição de 2500 pontos por segundo, e uma taxa de registro de 8,8 pontos por segundo, que foi estabelecida através de um programa desenvolvido para este fim em linguagem C.

3.6.3 - Sonda de Amostragem de Gases

A amostragem de gases em ambiente de reação química exige que a reação seja, interrompida no ponto de amostragem ou o mais próximo possível deste. CHEDAILLE e BRAUD (1972) sugerem que o resfriamento rápido para temperaturas menores do que 300°C interrompe a maioria das reações de combustão de modo que a composição da mistura não varie significativamente em relação ao ponto de amostragem no interior da câmara. Empiricamente foi estimado por CHEDAILLE e BRAUD (1972) que um tempo de resfriamento menor do que 0,003 segundos é satisfatório para os propósitos de análise de gás amostrado numa câmara de combustão. Com uma sucção de 5 l/min, gases a 1500°C são resfriados a 200 °C em menos de 0,002 segundos num tubo de 3 mm de diâmetro, refrigerado com água. Nestas condições, o comprimento necessário é da ordem de 30 mm.

Utilizaram-se duas sondas de amostragem, com diâmetro interno de 2 mm, refrigeradas com água. As sondas possuem uma câmara de mistura e de separação da água condensada, com um termopar para controle da temperatura dos gases já resfriados. No

circuito de sucção foi instalado um medidor de vazão para controlar a vazão do gás da amostra. A sucção é feita por uma bomba rotativa e o gás de amostra é enviado a um pequeno recipiente que permite o envio a cada um dos analisadores de gases: NO_x , O_2 e CO. A figura 3.12 apresenta um desenho esquemático de uma das sondas.



Figura 3. 12. Sonda de amostragem dos gases de combustão.

A figura 3.13 mostra o fluxograma do sistema de amostragem dos gases. O sistema possui uma válvula de alívio que permite regular a pressão no recipiente pressurizado. Todos os analisadores de gases também possuem suas próprias bombas de sucção, porém operando com vazões diferentes em cada analisador. A bomba de amostragem da sonda opera com vazão nominal de 5 litros/minuto. As principais características de cada analisador são apresentadas na Tabela 3.5. A calibragem do analisador de NO_x (analisador Horiba) foi realizada usando-se um gás padrão de 800 ppm, adquirido comercialmente.



Figura 3. 13. Fluxograma do sistema de amostragem dos gases.

Gás	Fabricante	Modelo	Sensor	Faixa de medição	Precisão	Amostragem
NO _x	Horiba	ENDA-1400	Infravermelho não dispersivo	0 a 1000 (ppm)	+-0,012% (em volume)	Contínua 3 l/min
со	Testo	325-I	Célula eletromecânica	0 a 40000 (ppm)	+- 10% (em volume)	Contínua 3 l/min
O_2	Horiba	ENDA-1400	Paramagnético	0 a 25%	+-0,012% (em volume)	Contínua 3 l/min

Tabela 3. 5. Características principais dos analisadores de gases.

Capítulo 4

Descrição do Procedimento Experimental

Antes de se iniciar os testes foi necessário um longo período para a manutenção da bancada, que se encontrava parada há mais de dois anos, e a fim de solucionar alguns problemas ocorridos em testes passados.

4.1 - Preparação e Recuperação da Bancada

Dentre os problemas que foram solucionados, inclui-se a manutenção do lavador resfriador dos gases de exaustão, que foi totalmente desmontado e alterado para que pudesse controlar efetivamente a temperatura dos gases na chaminé. Acrescentou-se ao distribuidor de água, dois injetores para que oferecesse uma maior dispersão. Este arranjo teve sua eficiência comprovada no início dos testes. Ainda foi reconstruída toda a distribuição dos conectores de pressão, bem como a instalação dos termopares.

Foi construído um novo painel para a ignição com troca de quase todos os componentes e com a reformulação de seu *layout*.

A construção de um vaporizador pressurizado foi realizada para que se pudesse trabalhar com a injeção do combustível na forma vapor, sendo que este contém dispositivos eletrônicos de controle de temperatura com controlador microprocessado.

Construiu-se ainda uma nova bateria de manômetros de coluna de água, para se ter um melhor controle das pressões do sistema.

O período de preparação da câmara para os testes contou ainda com problemas menores tais como: substituição dos termopares, reinstalação das linhas de manômetros, recuperação do eletrodo responsável pela ignição, construção de uma linha de combustível (etanol), manutenção do analisador de gases da marca HORIBA, construção de uma central de acondicionamento dos cilindros de gases padrões e projeto de uma nova bancada para análise dos gases, que garantisse um eficiente selo contra a entrada de ar falso.

4.2 - Variáveis de Operação

Os testes foram realizados de forma a possibilitar conclusões plausíveis a respeito do processo de combustão e suas emissões. Potência nominal da câmara de combustão, temperatura dos gases de saída e o grau de mistura entre ar e os combustíveis (rotação) são os três principais parâmetros da combustão, que foram levados em consideração durante o planejamento dos experimentos.

Os efeitos do tempo de residência não foram levados em consideração neste trabalho. Para que não houvesse o risco deste parâmetro comprometer os resultados fixamos próximo a 2 segundos o tempo de residência médio para todos os testes.

Os efeitos da temperatura foram estudados realizando-se os testes em duas condições de temperatura dos gases de saída da câmara: 1000 e 1175 °C. As temperaturas foram escolhidas usando-se de critérios tais como: garantia da combustão; variação suficiente que permitisse notar a influência da temperatura; preservação da bancada e da instrumentação e segurança no processo de operação e amostragem.

Por fim o grau de mistura foi estudado considerando a função direta do número de rotação aplicado ao fluxo do ar de combustão, da mesma forma que BIZZO (1997) e MAFRA (2000) operaram com números de rotação que variaram de 0,364 a 1,463.

A pressão da câmara foi mantida nula para se evitar a entrada de ar falso, no caso de pressão negativa, e a perda de calor, no caso de pressão positiva.

A temperatura dos gases na saída do lavador foi controlada para que não ocorresse o comprometimento do exaustor no caso de alta temperatura, e nem a condensação de vapor antes da chaminé no caso de temperatura baixa. A condensação do vapor antes da chaminé é prejudicial, pois poderia provocar acúmulo de água na voluta do exaustor centrífugo.

Foi mantida a pressão positiva no sistema de amostragem de gases a fim de evitar a entrada de ar falso e também como forma de monitorar o entupimento da sonda e/ou da linha de amostragem.

Parâmetro	Valor Assumido
Temperatura dos gases de exaustão	1000 e 1175 °C
Pressão da câmara	Pressão manométrica Nula
Pressão no sistema de amostragem	~ 100 mmCA
Rotacional Swirl	0,684 e 1,315

O resumo das principais variáveis de controle é mostrado na Tabela 4.1.

Tabela 4. 1. Principais parâmetros e variáveis de operação.

As condições de operação da câmara de combustão foram monitoradas a fim de garantir que os processos de amostragem estivessem ocorrendo em regime permanente. No

entanto os primeiros testes revelaram que após o sistema entrar em equilíbrio as condições de operação pouco se alteram.

4.3 - Caracterização do Sistema Experimental

4.3.1 - Combustível

O combustível utilizado foi o etanol comercial, por se tratar de um combustível renovável de fácil obtenção e por não conter na sua composição nitrogênio o que evita a formação do óxido de nitrogênio pelo mecanismo do NO_x combustível, e com perspectiva de aumento significativo em sua utilização.

O etanol tem sua composição C_2H_5OH , que é um derivado dos hidrocarbonetos, diferindo deles por possuir na sua estrutura molecular o grupo OH altamente polar. Suas moléculas encontram-se ligadas entre si pelos mesmos tipos de forças intermoleculares que agregam as moléculas de água.

O GLP comercial é composto basicamente por propano (C_3H_8) e butano (C_4H_{10}), com pequenas frações de etano, propeno e buteno, que são desprezadas. Desta forma considerou-se que sua composição em massa é 50% propano e 50% butano conforme especificação do fornecedor do combustível (Petrobras).

Propriedade	Valor
PCS	35.197 kJ/kg
PCI	24.919 kJ/kg
Densidade a 20° C	0,8 g/cm ³

Tabela 4. 2. Propriedades do Etanol

Propriedade	Valor
PCS	45.932 kJ /kg
PCI	42.782 kJ/kg
Densidade a 20° C	2,06 kg/m ³

Tabela 4. 3. Propriedades do GLP

4.3.2 - Estequiometria de Combustão do GLP e do Etanol

A relação estequiométrica da reação de combustão do etanol e do GLP, para a composição proposta, é apresentada pelas equações 4.1 e 4.2.

Balanço estequiométrico do etanol:

$$C_2H_5OH + 3(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O + 11,28N_2$$
(4.1)

Balanço estequiométrico do GLP:

 $1,16 C_{3}H_{8} + 0,88 C_{4}H_{10} + 11,52 (O_{2} + 3,76 N_{2}) \rightarrow 7 CO_{2} + 9,04 H_{2}O + 43,32 N_{2}$ (4.2)

4.3.3 - Relação Ar/Combustível

A relação em massa ar/combustível para a estequiometria proposta pela equação 4.1 e 4.2 é representada pelas equações 4.3 e 4.4.

Relação ar/combustível do etanol:

.

$$\left(\frac{Ar}{Comb.}\right)_{massa} = \varphi.8,953 \tag{4.3}$$

Relação ar/combustível do GLP:

$$\left(\frac{Ar}{Comb.}\right)_{massa} = \varphi.15,50\tag{4.4}$$

onde:

 ϕ - coeficiente de excesso de ar.

4.3.4 - Tempo Médio de Residência dos Gases

O tempo médio de residência, que foi fixado em aproximadamente 2 segundos para todos os testes, é dado pela equação 4.5.

$$\bar{\mathbf{t}} = \frac{\dot{\mathbf{v}}}{\mathbf{V}} \tag{4.5}$$

onde:

 \overline{t} - tempo médio de residência;

- \dot{v} vazão total dos gases calculado na temperatura de saída da câmara (m³/s);
- V volume da câmara em m³.

4.3.5 - Potência Específica da Câmara

A potência específica (\dot{w}_{PCS}) da câmara de combustão, que é função do poder calorífico superior do combustível, é calculado pela equação 4.6:

$$\dot{w}_{PCS} = \frac{\dot{m}_{e \tan ol}.PCS}{V} \tag{4.6}$$

onde:

 $\dot{m}_{combustivel}$ - vazão de Etanol ou de GLP em (kg/s)

Para as duas temperaturas de operação a procurou-se manter potência específica média da câmara de combustão como apresenta na Tabela 4.4.

Potência Específica Média da Câmara						
1000 °C	1000 °C ~250 kW/m ³					
1175 °C	$\sim 290 \text{ kW/m}^3$					

Tabela 4. 4. Potência específica da câmara de combustão.

4.3.6 - Número de Rotação (S')

O número de rotação S' para um gerador de rotação de blocos móveis, como utilizado neste trabalho, é calculado pelas equações 4.7 e 4.8, a partir das dimensões do queimador, sendo que estas equações apresentaram boa correlação com resultados experimentais (BEÉR e CHIGIER, 1972):

$$S' = \sigma \cdot \frac{R}{2.B} \left[1 - \left(\frac{R_h}{R}\right)^2 \right]$$
(4.7)

$$\sigma = \frac{2.\pi}{z.\xi_m} sen\beta \frac{\cos\beta \left[1 + \tan\beta . \tan\left(\frac{\xi}{2}\right)\right] \left(\frac{\xi}{\xi_m}\right)}{\left\{1 - \left[1 - \cos\beta \left(1 + \tan\beta . \tan\left(\frac{\xi}{2}\right)\right)\right] \frac{\xi}{\xi_m}\right\}^2}$$
(4.8)

onde:

R - raio do duto de saída do queimador;

R_h - raio da lança de combustível, interno ao duto de saída do queimador;

B - largura dos canais formados pelos blocos móvel e fixo do gerador de rotação do queimador.

 σ - coeficiente da quantidade de movimento tangencial, calculado pela equação 4.8;

z - quantidade de blocos móveis;

- β ângulo de entrada do bloco tangencial do gerador de rotação;
- ξ ângulo da posição de ajuste dos blocos móveis;
- ξ_m ângulo máximo da posição de ajuste dos blocos móveis.

A câmara de combustão cilíndrica, projetada por BIZZO (1997) e utilizada neste trabalho apresenta um mecanismo de roscas paralelas que promove o movimento do bloco móvel do queimador alterando o número de rotação. Este mecanismo apresenta uma relação que permite relacionar o número de fios de rosca com o seu respectivo número de rotação. A Tabela 4.5 mostra a relação entre a posição da rosca e o número de rotação para os valores de S' estudados neste trabalho.

Posição (números de roscas)	Número de Rotação Efetivo (S')
12	0,684
15	0,887
17	1,027
19	1,170
21	1,315
23	1,463

Tabela 4. 5. Relação entre a posição na rosca e o número de rotação do queimador.

A figura 4.1 (abaixo) traz as posições dos pontos que foram estudados neste trabalho.

Q/X 0.	00-		•••	•••	0 0 0 0	8 8 8 8	0 0 0 0		••••	_
-0.	50	•	•	•	•	•	•	•	•	
	0.00)	0	.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50
						X	/D			

Pontos da câmara onde foram medidos os dados das concentrações e das temperaturas

Figura 4.1. Disposição dos pontos

4.3.7 - Experimentos realizados

Os testes foram divididos em quatro etapas correspondendo às duas temperaturas de saída dos gases (1000 e 1175 °C) de dois combustíveis (GLP e Etanol).

Para cada uma das temperaturas e combustível realizaram-se os seguintes experimentos:

- Variação do número de rotação (S'): nas condições de operação, variando o número de rotação para os valores apresentados na Tabela 4.5, (utilizando a rotação acima de 0,684, pois a chama do etanol abaixo desta rotação ficava muito instável), enquanto uma sonda de amostragem fixada no final da câmara coletava amostras para análise de concentração de NO_x, O₂ e CO, nos gases de exaustão;
- Perfil de concentração: dentre os seis valores de número de rotação aplicados ao escoamento escolheu-se dois onde foram levantados, através da sonda de amostragem móvel, os perfis de concentrações de NO_x, O₂ e CO no interior da câmara de combustão;
- Perfil de temperatura: nos mesmos dois números de rotação escolhidos para a construção dos perfis de concentração, levantou-se através do pirômetro de sucção os perfis de temperatura no interior da câmara.

Os perfis levantados no interior da câmara foram construídos considerando-se que os mesmos eram simétricos em relação ao eixo axial central. Desta forma as medidas foram realizadas somente em uma das metades (em relação ao eixo axial central) da câmara de combustão, conforme figura 4.1. Estas considerações foram feitas, pois dados empíricos mostraram que não houve variações significativas nos valores dos dados obtidos da metade

posterior da câmara e não trariam contribuição relevante, a não ser uma dificuldade a mais para a obtenção destes perfis.

Capítulo 5

Apresentação e análise dos resultados

Os resultados deste trabalho são apresentados com o objetivo de possibilitar uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos na fluidodinâmica de uma câmara de combustão cilíndrica, com injeção de ar através de jatos com rotação e a formação do NO_x ao longo da câmara. O tempo de residência foi fixado em cerca de dois segundos e foram escolhidas duas temperaturas de saída da câmara.

Os níveis de emissão de poluentes foram medidos em relação ao número de rotação da câmara e foram escolhidas duas condições de operação semelhantes, para os dois combustíveis diferentes, para a construção dos perfis de concentração e temperatura no interior da câmara de combustão.

Os perfis de concentração de O_2 e de CO, foram levantados para que se tivesse uma informação complementar da forma do escoamento e do processo de combustão e para uma visualização do consumo de combustível e do oxidante. O perfil de temperatura, acoplado ao perfil de concentração de O_2 (o ar para a combustão), permite a comparação com o perfil de concentração do NO_x a fim de estudar o mecanismo de formação deste último no interior da câmara de combustão cilíndrica com injeção de ar.

O efeito da temperatura de operação é observado em cada um dos parâmetros apresentados, uma vez que os testes foram realizados em duas temperaturas distintas (1000

e 1175 °C). A exceção se dá no perfil de CO, em que devido à capacidade do analisador TESTO, a concentração atingiu o fundo de escala em várias localizações.

A tabela 5.1 mostra os valores médios das condições de operação da câmara de combustão nos teste a 1000 e 1175 °C. Esses valores foram escolhidos em função destas temperaturas, pois estas foram as principais referências de operação da câmara de combustão.

Temperatura	1000 °C	1175 °C
Excesso de ar para o GLP	65 %	19 %
Excesso de ar para o ETANOL	100%	42%
Relação (Ar/Comb.) _{massa} GLP	26,6	19,3
Relação (Ar/Comb.) _{massa} ETANOL	17,2	11,8
Tempo de residência	2 s	2 s
Potência específica média do GLP	240 kW/m^3	280 kW/m^3
Potência específica média do ETANOL	210 kW/m ³	290 kW/m ³

Tabela 5.1. Condições médias de operação da câmara

5.1 - Número de rotação

As relações existentes entre as emissões de NO_x , O_2 e o número de rotação, para duas temperaturas de operação são mostradas pelas figuras 5.1, 5.2, respectivamente. As emissões de NO_x tiveram uma variação sutil com relação os números de rotação e as outras condições (combustível e temperatura), a não ser pela variação das emissões do etanol à maior temperatura (1175°C). Posteriormente na análise dos perfis de temperatura verificouse que para o etanol, as temperaturas dentro da câmara foram maiores que as temperaturas do GLP nos mesmos pontos no interior da câmara. Os valores de S' escolhidos para a construção dos perfis de concentração e de temperatura foram 0,684 e 1,315 por serem representativos das duas regiões observadas na figura 5.1: a região de baixa rotação e outra de mais alta rotação, onde possíveis influências de rotação poderiam ser mais perceptíveis.

Devido ao excesso de ar utilizado na combustão, o oxigênio serviu como um indicador da forma com que o escoamento e a reação da mistura evoluem no interior da câmara de combustão.



Figura 5. 1. Emissão de NO_x em função do número de rotação na saída dos gases no ponto A da figura 3.3, com barras de erro nos valores obtidos.

A figura 5.2. apresentou o teor de oxigênio na saída da câmara de combustão em relação ao número de rotação e à temperatura de saída dos gases. Já para os valores de emissão de CO, não foram feitas plotagens, pois foram zero em todos as condições de operação.



Figura 5. 2. Emissão de O_2 em função do número de rotação na saída dos gases no ponto A da figura 3.3, com barras de erro nos valores obtidos.

5.2 - Apresentação dos dados de temperaturas e concentrações.

Em virtude do grande número de dados obtidos, foram escolhidos alguns dados considerados mais relevantes para a apresentação neste trabalho. O conjunto completo de dados experimentais e os gráficos estão no Apêndice I.

Para os levantamentos dos perfis de concentração e temperatura foi considerada a simetria com relação ao eixo central da câmara de combustão. Desta forma foram realizadas as medidas somente em metade da câmara de combustão, e foram considerados os mesmos valores para os pontos diametralmente opostos com a finalidade de uma melhor visualização da apresentação.

As medições na câmara de combustão cilíndrica foram realizadas em 56 pontos distintos para cada concentração e temperatura, em dois números de rotação. Esses pontos são mostrados na figura 5.3.



Figura 5. 3. Pontos onde foram verificadas as concentrações e as temperaturas na câmara de combustão cilíndrica.

A cada posição x/D estudada foi construído um gráfico com seus respectivos pontos y/D. Sendo assim foram feitos 8 gráficos para cada perfil de concentração, 8 para cada perfil de temperatura, em dois números de rotação diferentes, perfazendo um total de 96 gráficos. O gráfico da figura 5.4 mostra o perfil de temperatura do etanol nas posições x/D = 0.85 com temperatura de referência 1000°C e rotacional S'= 0.684 como exemplo.



Figura 5. 4. Perfil de temperatura do etanol.

Foram construídos ainda, gráficos do perfil completo de concentrações e temperaturas em três dimensões, onde se mostram a variação de temperatura ou as concentrações no eixo z, ao longo das posições radiais y e as posições axiais x. A figura 5.5 apresenta um exemplo que mostra a concentração de NO_x do GLP com número de rotação S'= 0,684, na temperatura de referência 1175°C.



Figura 5. 5. Perfil em 3 dimensões do NO_x do etanol.

Outro conjunto de gráficos elaborados traz as comparações entre temperatura e NO_x e entre as concentrações de O_2 e NO_x . A figura 5.6 mostra o comparativo das concentrações de NO_x e O_2 do GLP, na posição x/D = 3,19, à temperatura de referência 1000°C e com o número de rotação S' = 1,315.



Figura 5. 6. Perfil comparativo de concentração entre NO_x e O₂ do GLP.

Por fim foram construídos os perfis de concentrações de NO_x , O_2 e temperatura onde se mostram os contornos de isoconcentração e isotérmicas. Estes gráficos utilizam o programa Surfer 3.2, que interpola os dados obtidos e traça as linhas de isoconcentração e isotérmicas.

Não foi possível construir gráficos para as concentrações de CO com este programa, pois este perfil possui uma amplitude muito grande em poucos pontos e em grande parte dos pontos as concentrações estão muito próximas de zero. A figura 5.7 mostra o exemplo deste gráfico com os contornos do O_2 , na temperatura de referência 1000°C e número de rotação S'= 0,684, sendo que os intervalos da concentração são de 0,5%.



Figura 5.7. Perfil dos contornos de concentração do O₂ do GLP.

5.3 - Análise dos resultados dos perfis de temperatura

A recirculação de gases no interior da câmara, somada aos fenômenos de efeito de parede e distância do queimador, influenciam o perfil de temperatura no interior da câmara de combustão. As figuras 5.9 a 5.16 apresentam a variação de temperatura com relação ao tempo, obtidas com a aquisição de dados do termopar do pirômetro de sucção. A figura 5.8 apresenta as posições do termopar para as temperaturas de operação 1000 e 1175°C, medidas para os dois combustíveis (etanol e GLP) e com os dois números de rotação S' = 0,684 e S' = 1,315.

Nota-se que a amplitude da variação da temperatura é inversa ao número de rotação, ou seja, quando o número de rotação é menor (S'= 0,684) a variação é maior chegando até 130°C (para o etanol), mas nesta mesma posição, com uma rotação maior (S'= 1,315) a variação cai para uma ordem de 45°C (ainda para o etanol). Assim temos que quanto maior o número de rotação menor a variação de temperatura. Isto é observado em todas as condições, independente do combustível.

Observa-se também que a variação de temperatura na parte final da câmara de combustão (x/D = 2,72) é menor que na posição mais próxima ao queimador (x/D = 0,38). È possível que haja uma correlação entre as magnitudes da variação de temperatura e o número de rotação, mas este fenômeno não foi investigado neste trabalho.





Figura 5.8. Posições estudadas nos gráficos das figuras 5.9 a 5.16.



Figura 5. 9. Variação de temperatura do etanol com número de rotação S'= 0,684 e temperatura de referência 1000°C



Figura 5. 10. Variação de temperatura do etanol com número de rotação S'= 1,315 e temperatura de referência 1000°C



Figura 5. 11. Variação de temperatura do etanol com número de rotação S'= 0,684 e temperatura de referência 1175°C



Figura 5. 12. Variação de temperatura do etanol com número de rotação S'= 1,315 e temperatura de referência 1175°C



Figura 5. 13. Variação de temperatura do GLP com número de rotação S'= 0,684 e temperatura de referência 1000°C



Figura 5. 14. Variação de temperatura do GLP com número de rotação S'=1,315 e temperatura de referência 1000°C



Figura 5. 15. Variação de temperatura do GLP com número de rotação S'= 0,684 e temperatura de referência 1175°C



Figura 5. 16. Variação de temperatura do GLP com numero de rotação S'= 1,315 e temperatura de referência 1175°C

As figuras 5.17 a 5.20 apresentam os perfis de temperatura para o GLP e etanol na temperatura de referência 1000°C e número de rotação 0,684 para as posições iniciais (S' = 0,15) e final (S' = 3,19) da câmara de combustão

Observa-se que o e etanol apresenta uma temperatura maior na região central da câmara de combustão em relação ao GLP. Já nas proximidades da parede da câmara de combustão o comportamento é inverso, o GLP apresenta temperatura maior que o obtido na combustão do etanol. Este comportamento é recorrente na operação da câmara à temperatura de referência 1175°C, como pode ser observado nos gráficos de temperatura no Apêndice I.



Figura 5. 17. Variação de temperatura ao longo do perfil x/D = 0,15, S' = 0,684 para o etanol à temperatura de referência 1000°C.



Figura 5. 18. Variação de temperatura ao longo do perfil x/D = 0,15, S' = 0,684 para o GLP à temperatura de referência 1000°C.



Figura 5. 19. Variação de temperatura ao longo do perfil x/D = 3,19, S' = 0,684 para o etanol à temperatura de referência 1000°C.



Figura 5. 20. Variação de temperatura ao longo do perfil x/D = 3,19, S' = 0,684 para o GLP à temperatura de referência 1000°C.

O gráfico de isotermas ao longo de toda a câmara que é mostrado nas figuras 5.21 e 5.22, com temperatura de referência 1175°C e número de rotação S' = 1,315, para os dois combustíveis. A figura 5.23 traz o GLP a 1175°C e número de rotação S' = 0,684.

Observando os contornos de isotérmicas do início da câmara (próximo ao queimador) até próximo à saída dos gases, nota-se que existe uma homogeneidade maior na distribuição de temperatura do GLP quando comparada com o etanol. Por exemplo, para o GLP à temperatura de referência de 1175 °C, com número de rotação S' = 1,315, a temperatura próxima ao queimador (no centro da câmara) fica em torno de 1380°C e próxima à saída atinge uma temperatura aproximada de 1300°C, com uma diferença em torno de 80°C.

Nota-se que a temperatura sempre estará maior que a temperatura de referencia, pois esta temperatura é medida no duto de saída da câmara, garantindo que a temperatura dentro do equipamento estará numa temperatura adequada para a formação do NO_x .

Já para o etanol nas mesmas condições, ou seja, temperatura de referência 1175°C e S' = 1,315, a temperatura fica próxima dos 1500°C no centro da câmara e na saída dos gases fica próxima de 1350 °C, uma diferença em torno de 150°C.

Quando se observa somente o número de rotação, para o mesmo combustível, nota-se que não existe uma grande variação na distribuição de temperatura para os números de rotação maiores em relação aos menores, como por exemplo, para o GLP com número de rotação S' = 1,315 e temperatura de referência 1175°C, a temperatura varia de 1380°C, próximo ao queimador, para 1300°C no final da câmara, próximo a saída dos gases, apresentando uma diferença de 80°C.

Já com o número de rotação menor (S' = 0,684) e a mesma temperatura de referência (1175°C), verifica-se que no início da câmara a temperatura fica próxima a 1400°C e no final da câmara, próxima a 1330°C, apresentando uma variação de 70°C. Esse comportamento também é verificado no etanol.



Figura 5. 21. Perfil de contornos de temperatura do etanol.



Figura 5. 22. Perfil de contornos de temperatura do GLP.



Figura 5. 23. Perfil de contornos de temperatura do GLP.

5.4 - Análise dos resultados dos perfis de concentração do NO_x

As condições típicas de operação das câmaras de paredes quentes com alto excesso de ar e alta temperatura favorecem, segundo MILLER e BOWMAN (1989), a formação do NO_x térmico. Os testes realizados tentam simular estas condições de combustão, alto excesso de ar e altas temperaturas, a fim de avaliar a real influência desses fatores somado à forma de injeção de ar, através de jatos com rotação, na emissão de NO_x .

Para a temperatura de referência 1000°C os perfis de concentração do NO_x para S' = 0,684 (figura 5.24 e 5.25) revelam, na região central, picos discretos para os primeiros perfis de GLP e picos bem definidos para o etanol. Ao longo da câmara os perfis de concentração tendem a se tornarem mais planos.

Para o número de rotação mais intenso (S' = 1,315) as figuras 5.26 e 5.27 mostram que os perfis de concentração de NO_x apresentam um comportamento semelhante aos perfis anteriores, na região próxima ao queimador, independente do combustível utilizado.



Figura 5. 24. Perfil de concentração do NO_x para o etanol à temperatura de referência 1000°C, com número de rotação S' = 0,684.



Figura 5. 25. Perfil de concentração do NO_x para o GLP à temperatura de referência 1000°C, com número de rotação S' = 0,684.



Figura 5. 26. Perfil de concentração do NO_x para o etanol à temperatura de referência 1000°C, com número de rotação S' = 1,315.



Figura 5. 27. Perfil de concentração do NO_x para o GLP à temperatura de referência 1000°C, com número de rotação S' = 1,315.

As figuras 5.28 a 5.31, apresentam as isoconcentrações de NO_x no interior da câmara de combustão para o etanol e o GLP com número de rotação S' = 0,684 e S' = 1,315, para uma temperatura de referência 1175°C.

Observando os contornos de isoconcentração para o NO_x do GLP nota-se que existe uma maior homogeneidade das concentrações quando comparadas as do etanol, desde o início da câmara (próximo ao queimador) até a saída dos gases no final da mesma.

Exemplificando, para o GLP à temperatura de referência de 1175°C e número de rotação S' = 0,684 foi observado, no início da câmara, uma concentração aproximada de 60 ppm de NO_x e no final da câmara, uma concentração aproximada de 77 ppm, ou seja, com uma diferença de 17ppm.

Já no etanol, para a mesma temperatura e mesmo número de rotação, observou-se no início da câmara uma concentração aproximada de apenas 25 ppm de NO_x e no final da câmara, uma concentração em torno de 98 ppm, com uma diferença de 73 ppm.

Quando se observa apenas a variação do número de rotação, nota-se que não houve uma influência significativa nas concentrações de NO_x, da mesma forma ao que se observou na variação de temperatura, com exceção notável na combustão do etanol a 1175°C.



Figura 5. 28. Perfil da concentração do NO_x no etanol.

Perfil de concentração do NO_x no GLP. S'= 1,315. Temp. ref. 1175ºC. Intervalo 2 ppm



Figura 5. 29. Perfil da concentração do NO_x no GLP.

No perfil de concentração de NO_x S' = 1,315, temperatura 1175°C do GLP (figura 5.29) observa-se uma brusca diminuição dos valores de concentração de NO_x na região central da câmara de combustão. Isso é explicado pois este experimento foi realizado em duas etapas, em virtude da formação de fuligem no queimador que obstruiu o sensor óptico de segurança, causando apagamento da chama de medição. Tentou-se repetir o experimento para que houvesse continuidade, mas o fenômeno se repetiu. Assim o experimento teve que ser realizado em duas etapas causando uma pequena diferença entre os perfis de isoconcentração.



Figura 5. 30. Perfil da concentração do NO_x no etanol.





Figura 5. 31. Perfil da concentração do NO_x no GLP.

Pode-se notar que há um incremento na formação do NO_x na condição apresentada e que isto se deu com temperaturas muito altas no interior da câmara de combustão. Isso vai ao encontro do que afirma HAYHURST e VINCE (1980), que a forte dependência das reações que compõe o mecanismo do NO_x térmico com relação à temperatura se deve à alta energia de ativação ($E_A = 315 \text{ kJ/mol}$) deste mecanismo, que torna o mecanismo proposto por Zeldovich altamente sensível à temperatura. Isto é verificado nas figura 5.32 e 5.33 quando se compara a temperatura e a formação do NO_x.



Figura 5. 32. Perfil comparativo da temperatura com a concentração do NO_x no início da câmara na queima do etanol com S' = 1,315 e temperatura de referência 1000°C



Figura 5. 33. Perfil comparativo da temperatura com a concentração do NO_x no início da câmara na queima do GLP com S' = 1,315 e temperatura de referência 1000°C

A temperatura não é o único fator na formação do NO_x apesar de ter relevância. Como afirma CARVALHO JR e LACAVA (2003), cada sistema necessita de condições diferentes de combustão e é necessário entender como essas condições influenciam a emissão de NO_x , entre elas a razão de equivalência entre a excesso de ar e temperatura, tempo de residência e as condições de chama, têm sua influência na formação do NO_x .

As figuras 5.34 e 5.35 mostram distribuição do NO_x comparada com a disponibilidade de oxigênio.
A disponibilidade de oxigênio também está relacionada com as reações de combustão, que por sua vez se relaciona com o gradiente a temperatura. Nota-se que a formação do NO_x é muito mais dependente da temperatura local do que da concentração do oxigênio local.



Figura 5. 34. Comparativo das concentrações de oxigênio e de NO_x para o etanol com S' = 0,684 e temperatura de referência 1175°C



Figura 5. 35. Comparativo das concentrações de oxigênio e de NO_x para o GPL com S' = 1,315 e temperatura de referência 1000° C

5.5 - Análise dos resultados dos perfis de concentração do Oxigênio

Os perfis de concentração de oxigênio permitem que se tenha uma idéia da evolução da combustão no interior da câmara, pois a queda na concentração deste gás indica o andamento da reação da combustão relacionado ao consumo de oxigênio.

Neste experimento os perfis de concentração de oxigênio foram utilizados para estimar o tamanho da zona central de recirculação (ZRC) de forma qualitativa. As linhas de isoconcentração do oxigênio definem o gradiente de oxidação no interior da câmara. Nas figuras 5.36 e 5.37 é mostrado de forma qualitativa a delimitação da zona central de recirculação (ZCR) a partir do gradiente de oxigênio medido.

O tamanho da ZCR é limitado pela região onde o perfil de concentração de O_2 se torna plano. Neste momento tem-se um escoamento do tipo pistonado, caracterizando a região de escoamento desenvolvido.

A formação das regiões de recirculação, em especial a ZCR, é comprovada através dos perfis de velocidades para escoamentos com rotação em câmaras de combustão nos trabalhos de KENBAR *et al.* (1995) e BIZZO (1997).

Na configuração das linhas de concentração do oxigênio no etanol e no GLP é perceptível uma diferença, pois o etanol tem uma distribuição mais alongada enquanto o GLP tem uma distribuição espalhada mais próxima ao queimador, lembrando que o etanol é queimado na forma de vapor saturado a 130°C enquanto o GLP é injetado na forma natural a pressão atmosférica. Estas características, juntamente com a cinética química de cada um destes combustíveis mais a turbulência têm influências distintas nas configurações das linhas de concentração do oxigênio, que são de difícil identificação, pois não se tem as medidas de velocidade no interior da câmara de combustão.

Outra característica que deve ser observada é a velocidade de jato de injeção para os dois combustíveis, onde o etanol tem uma velocidade aproximada de 55 m/s e o GLP tem velocidade aproximada de 27 m/s.



Perfil de O_2 do etanol. S' = 1,351. Temp. ref. 1175°C. Intervalo 0,5 %

Figura 5. 36. Perfil de concentração do O₂ do etanol



Figura 5. 37. Perfil de concentração do O2 do GLP

5.6 - Análise dos resultados dos perfis de concentração do CO

As figuras 5.38 e 5.39 mostram os perfis de concentração de CO a 1175 °C, nos quais podemos ver que a concentração é muito alta no início da câmara, próximo ao queimador, e que do meio da câmara para o final encontramos valores próximos ou mesmo iguais a zero indicando que a queima está praticamente completa neste setor.

Estes valores extremamente altos no início da câmara mostram que nesta região a queima ainda não está completa, e podemos observar que em uma distância relativamente pequena há uma diminuição brusca da concentração do monóxido de carbono.



Figura 5. 38. Gráfico das emissões do CO do etanol



Figura 5. 39. Gráfico das emissões do CO do GLP

Nos pontos onde as curvas não se completam é porque essas medições atingiram o fundo de escala do medidor Testo 325-I, que tem uma escala de até 45000 ppm.

Mesmo com uma alta concentração de CO no início da câmara não se notou formação de fuligem na combustão do etanol, o que não ocorreu com o GLP onde tivemos vários momentos de entupimento da sonda, o que obrigou a várias paradas para o desentupimento, independente do número de rotação utilizada. Isto também foi verificado por MAFRA (2000). No entanto no final da câmara de combustão as concentrações foram baixas e não houve entupimento das sondas.

A formação de fuligem foi muito grande para o GLP, principalmente para o perfil com alta rotação (S = 1,315) e temperatura de referência 1175°C, com excesso de ar menor, ocorrendo cristalização de fuligem na ponta do queimador, detalhes estão mostrados no Apêndice II. É provável que grande parte da combustão do GLP ocorra antes da posição x/D = 0.15 em que foram feitas as medições, isso é detectado quando se observa a distribuição das concentrações de CO.

Quando comparadas às velocidades de saída do jato no tubo injetor, observa-se que para o GLP o jato atinge uma velocidade aproximada de até 27m/s e o jato do etanol vaporizado e superaquecido a 130°C atinge uma velocidade aproximada de até 55m/s.

Capítulo 6

Conclusão e sugestões para próximos trabalhos

6.1 - Conclusão e considerações finais

Este trabalho estudou a formação e a emissão de CO, O_2 e NO_x, na combustão de GLP e etanol vaporizado em uma câmara de combustão cilíndrica horizontal com isolamento térmico. Nos testes realizados foram mantidos constantes o tempo de residência dos gases e a potência especifica da câmara de combustão, foram utilizados duas temperaturas de saída dos gases (1000°C e 1175) e foram variados os números de rotação relativos à injeção de ar no queimador.

Os resultados obtidos mostraram influência da fluidodinâmica do escoamento, representada pelo número de rotação do queimador, na emissão de NO_x e CO, como é notado na combustão do etanol com temperatura de saída a 1175°C . Neste caso, as emissões de NO_x foram aumentadas significativamente com o aumento do número de rotação.

A evolução da combustão do etanol mostrou-se diferente da evolução da combustão do GLP, como pode ser verificado através da distribuição de CO e O_2 no interior da câmara de combustão, determinadas para os números de rotação S'= 0,684 e S'= 1,315. Foi

constatado que o início da zona de reação para o etanol localizou-se um pouco mais distante do que no caso do GLP, que está muito mais próximo ao queimador.

No entanto, a velocidade de saída do jato de etanol e GLP foram diferentes, sendo da ordem de 55 m/s para o etanol e 27m/s no caso do GLP. Sendo assim, além de prováveis diferenças entre as velocidades de chama do etanol e do GLP, a configuração e características do jato de gás combustível podem ter grande importância na evolução da combustão e formação de poluentes.

Considerando a distribuição da temperatura foi constatada uma relação direta na formação do NO_x , pois é notório que picos de temperatura no interior da câmara de combustão levam as concentrações de NO_x a ter um salto significativo. Foi constatado que a formação dos óxidos de nitrogênio pelo mecanismo do NO_x térmico tem forte dependência da temperatura e pouca dependência da concentração local de oxigênio.

A distribuição de temperatura no interior da câmara de combustão no caso do etanol mostrou-se muito mais heterogênea que no caso do GLP, e coincidente com locais de maior concentrações de NO_x . No entanto regiões de alta temperatura coincidem com regiões de baixa concentração de O_2 , indicando a evolução da combustão através do consumo de O_2 .

Esta homogeneidade do GLP pode ser explicada por uma possível formação de fuligem no interior da câmara de combustão, que aumentaria a radiação e conseqüentemente uma melhor de distribuição de calor, em comparação com a combustão do etanol.

6.2 - Sugestões para trabalhos futuros

A intensidade e tamanho das zonas de recirculação (central e externa) podem ser melhor definidas através da construção dos perfis de velocidade no interior da câmara. Este trabalho daria maior consistência e melhoraria o relacionamento entre os dados obtidos. No entanto reconhece-se a dificuldade experimental e a necessidade de recursos materiais de alto custo para a medição de velocidade direcional dos gases em região de alta chama.

A utilização da grande quantidade de dados experimentais acoplados à simulação computacional da fluidodinâmica permite estabelecer e ajustar modelos matemáticos para a cinética das reações e da formação de NOx.

O aperfeiçoamento e desenvolvimento da técnica de análise dos contornos das isoconcentrações de O_2 e CO, além dos contornos de isotérmicas, podem possibilitar que se estabeleçam qualitativamente os limites da zona central de recirculação (ZCR) e da evolução da reação de combustão.



Figura 6. 1. Estudo qualitativo do gradiente de concentração do O₂.

Efetuar alterações físicas na câmara de combustão que permitam a experimentação de outras técnicas de controle de NO_x, tais como recirculação de gases de exaustão e prémistura na região do queimador são de real importância na comparação entres as diferentes técnicas. A combinação destas técnicas numa mesma operação também é passível de investigação.

A utilização de ferramentas estatísticas acopladas a modelos de turbulência podem ser utilizadas para se investigar a relação das flutuações locais de temperatura com a formação de NO_x.

Referências Bibliográficas

- ADRIAN HSIEH, T. C., DAHM, W. J. A., DRISCOLL, J. F. "Scaling laws for NO_x emission performance of burners and furnaces from 30 kW to 12 MW". *Combustion and Flame*, v.114, p.54-80, 1998.
- ALTPFART, G. R., CHRISTMAN, R. "Gas burner offers less than 10 ppm NO_x". *Modern Power Systems*, p.27-30, Nov. 1995.
- ANDREWS, G. E. *et al.* "High-intensity burners with low NO_x emissions". *Part A: Journal of Power and Energy*, v.206, p.3-17, 1992.
- AOKI, H. *et al.* "Effect of swirling flow on unburned ratio and nitrogen oxide concentration in a spray combustion system". *Experimental Thermal and Fluid Science*, New York, v.5, p.838-847, 1992.
- AOKI, H., *et al.*. "Measurement of urea thermal decomposition reaction rate for NO selective non-catalytic reduction". In: FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON TECHNOLOGIES AND COMBUSTION FOR A CLEAN ENVIRONMENT, 1999, Lisboa-Portugal. *Anais...* Lisbon Portugal, 1999. p.115-118
- BALTASAR, J. *et al.* "Fuel gas recirculation in a gas-fired laboratory furnace: measurements and modeling". *Fuel*, v.76, n.10, p.919-929, 1997.
- BEÉR, M. J., CHIGIER, N. A. Combustion Aerodynamics. London: Applied Science Publishers LTD, 1972. 264p.

- BELTAGUI, S. A., KENBAR, A. M. A., MACCALLUM, N. R. L. "Comparation of measured isothermal and combustion confined swirling flows: Peripheral fuel injection". *Experimental Thermal and Fluid Science*, v.6, p.147-1456, 1993.
- BIZZO, W. A. Emissão de monóxido de carbono e hidrocarbonetos totais em câmara de incineração: Efeito do número de rotação e composição do combustível. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, 1997. 116p. (Tese, Doutorado em Engenharia Mecânica)
- BIZZO, W. A., CARDOSO, A. L., GOLDSTEIN Jr., L. "Construção e calibração de dois modelos de tubo de Pitot de 5 furos para aplicação em câmaras de combustão". In: 6º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS TÉRMICAS, 11-14 de novembro, Florianópolis. *Anais*...
- BRAGA, A., PEREIRA, L. A. A., SALDIVA, P. H. N. "Emissões veiculadas e impactos na saúde em áreas urbanas no Brasil. In: SUSTENTABILIDADE NA GERAÇÃO E USO DE ENERGIA NO BRASIL: OS PRÓXIMOS VINTE ANOS. 2002, Conferência realizada na Unicamp. *Anais em CD*...
- CANTELLI, M., de LUCA, S. J. "Oxidação de NO_x de pequenas fontes fixas por oxidação alcalina". In: 20° CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1999, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro, 1999. p.2842-2850.
- CARVALHO Jr., João Andrade de, LACAVA, Pedro Teixeira. *Emissões em processos de combustão*. São Paulo : Editora Unesp, 2003.
- CLAYPOLE, T. C., SYRED, N. "The stabilisation of flames in swirl combustors". *Journal* of the Institute of Energy, vol. IV no 422, pp.14-18, 1982.
- COSTA, M., RUÃO, M., CARVALHO, M. G. "On the influence of flue-gas recirculation on pollutant emissions from a small-scale laboratory furnace". *Archivum Combustionis*, v.16, n.1-2, p.77-86, 1996.
- DÖBBELING, K. *et al.* "Low NO_x premixed combustion of Mbtu fuels in a research burne". *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, v.119, p.553-558, 1997.

- DÖBBELING, K. *et al.* "Low NO_x premixed combustion of Mbtu fuels using the ABB double cone burner (EV burner)". *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, v.118, p.46-53, 1996.
- DRAKE, M. C. *et al.* "Superequilibrium and thermal nitric oxide formation in turbulent diffusion flames". *Combustion and Flame*, v.69, p.347-365, 1987.
- DUPONT, V. *et al.* "The reduction of NO_x formation in natural gas burner flames". *Fuel*, v.72, n.4, p.497-503, 1993.
- EGOLFOPOLOUS, F. N., D. X. Du, C. K., LAW, "A study on ethanol oxidation kinetics in laminar premixed flames, flow reactors, and shock tubes," In: *Twenty-Fourth International Symposium on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 833-841, 1992.
- EL-MAHALLAWY, F. M., *et al.* "Effect of combustion and similarity between hot and cold flow patterns in a cylindrical oil fired furnace". *Flow, Mixing and Heat Transfer in Furnace*, K.H.Khalil (ed), Pergamon Press, Oxford, 1997. 248p.
- FENIMORE, C. P. "Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames". In.: 13TH Symposium (International) on Combustion, 1970, Salt Lake City, Utah. Combustion Institute. Pittsburgh, Pa, 1971. p. 373-380.
- FENIMORE, C. P., JONES,G.W. "Nitric oxide decomposition at 2200 degrees K 2400 degrees K". Journal of Physical Chemistry, v. 61, n.5, p.654-657, 1957
- GULDER, O. L. Nineteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, p 275, 1982
- GULDER, O. L. "Burning velocities of ethanol-isooctane blends". *Combustion and Flame* v. 56 p. 261-268, 1984.
- HAO, W. M. *et all.* "Nitrous oxide concentrations in coal, oil, and gas furnace flame". *Combustion Science and Technology*, v.55, p. 23-32, 1987
- HAYHURST, A. N., VINCE, I. M. "Nitric oxide formation from N₂ in flames: the importance of 'Prompt' NO". *Progress in Energy and Combustion Science*, v.6, p.35-51, 1980.

- HEAP, M. P. *et al.*. "The effect of burner parameters on nitric oxide formation in natural gas and pulverized fuel flames". In: AMERICAN FLAME DAYS: Conf. Spansored by the America Flame Committee. *Anais...*1972.
- HESSELMANN, G. J. "Optimization of combustion by fuel testing in a NO_x reduction test facility". *Fuel*, v.76, n.13, p.1269-1275, 1997.
- HILL, S. C., SMOOT, L. D., "Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems". *Progress in Energy and Combustion Science* v. 26, p. 417-458.
- JAWORZNO III cleans up. Modern Power Systems, p.43-47, Nov. 1995.
- KASPER, J. M., CLAUSEN III, C. A., COOPER, C. D. "Control of nitrogen oxide emissions by hydrogen peroxide-enhanced gas-phase oxidation of nitric oxide". *Journal of Air and Waste Management Association*, v.46, n.2, p.127-133, 1996.
- KENBAR, A. M. A., BELTAGUI, S. A., MACCALLUM, N. R. L. "Combustion aerodynamics of a gas-fired furnace with peripheral injection". *Experimental Thermal* and Fluid Science, v.10, p.335-346, 1995.
- LEVENSPIEL, O. Engenharia das Reações Químicas. Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 1972. 481p.
- LISSIANSKI, V. V. *et all.* "Reburning Chemistry-Mixing Model". *Combustion and Flame*, v. 125 p. 1310-1319 (2001).
- MAFRA, M. R. Estudos da influência do número de rotação na formação do NOx em uma câmara de combustão cilíndrica. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, 2000. 108p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica)
- MARINOV, N. M., "A detailed chemical kinetic model for high temperature ethanol oxidation," U.S. Department of Energy/Lawrence Livermore National Lab, Contract W-7405-ENG-48, 1998.
- MEUNIER, Ph., COSTA, M., CARVALHO, M. G. "The formation and destruction of NO in turbulent propane diffusion flames". *Fuel*, v.77, n.15, p.1705-1714, 1998.
- MILLER, J. A., BOWMAN, C. T. "Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion". *Progress in Energy and Combustion Science*, v.15, p.287-338, 1989.

- MUZIO, L. J., QUARTUCY, G. C. "Implementing NO_x control: research to application". *Progress in Energy and Combustion Science*, v.23, p.266-233, 1997.
- NORTON, T. S., F. L. DRYER, "An experimental and modeling study of ethanol oxidation kinetics in an atmospheric pressure flow reactor," *International Journal of Chemical Kinetics*, Vol. 24, pp. 319 – 343, 1992.
- RAO, C. S. *Environmental pollution control engineering*. New Delhi, India: Wiley Eastern Limited, 1991. 431p.
- ROBY, R. J., C. T. BOWMAN, "Formation of N2O in laminar, premixed, fuel-rich flames". *Combustion and Flame*, 70, 119-123, 1987.
- ROSSI, N. J., UNFRIED, K. G. "NO_x control with hydrogen peroxide". *Metal Finishing*, p.16-19, Apr. 1997.
- SANDELL, M. "Putting NOx in a box". Pollution Engineering, p. 56-58, Mar. 1998.
- SCHNELL, U., KAESS, M., BRODBEK, H. "Experimental and numerical investigation of NO_x formation and its basic interdependencies on pulverized coal flame characteristics". *Combustion Science and Technology*, v.93, p.91-109, 1993.
- STECIAK, J. *et al.* "Dual SO₂-NO_x concentration reduction by calcium salts of carboxylic acids". *Journal of Environmental Engineering*, p.595-604, 1995.
- STULES, A. C. *et al.*. "A study of modulatable cyclone combustors using gaseous fuel". *J. Inst. Energy*, p.159-168, dec. 1979.
- TAKAHASHI,Y., *et al.*. "Developmente of 'MACT' in-furnance NO_x removal process for steam generators". In: 1982 SYMP. ON STATIONARY COMBUSTION, 1982, Dallas,TX. *Anais...*1982.
- VAN DER LANS, R. P., GLARBORG, P., DAM-JOHANSEN, K. "Influence of process parameters on nitrogen oxide formation in pulverized coal burners". *Progress in Energy and Combustion Science*, v.23, p.349-377, 1997.
- WEBER, R., DUGUÉ, J. "Combustion accelerated swirling flows in high confinements". *Progress in Energy Combustion*, v.18, n.4, p.349-367, 1992.

- YEGIAN, D. T., CHENG, R. K. "Development of a lean premixed low-swirl burner for low NO_x practical applications". *Combustion Science and Technology*, v.139, p.207-227, 1998.
- ZELDOVICH, Ya. B. *et al. The mathematical theory of combustion and explosions*. p.30-36, Consultants Bureau, 1985.

Apêndice I Tabelas e gráficos dos dados obtidos

Nas páginas seguintes são apresentados as tabelas e os gráficos de todos os dados obtidos no experimento realizado nesta dissertação.

Resultados do Etanol a temperatura de referência 1000°C, rotação S' 0,684

Planilha para cálculo de tempo de residência para combustíveis não-nitrogenados e isentos de enxofre.

* considere cada molécula como um combustível diferente (mesmo não tendo carbono) ** mantenha pelo menos um valor diferente de 0 nos combustíveis não utilizados

combustíveis + Ar = gases de queima

comb1 + comb2 + comb3 + comb4 + Ar = CO2 + H2O + 3,76N2

	combustível 1							
С		2						
Н		6						
0		1						
	20,13043							

combustível 2								
С		0						
Н		2						
0		1						
	4,111111							

combustíve	13	combustível 4			
С	0	С		0	
Н	1	Н		1	
0	0	0		0	
nº moles	0	n	º moles	0	

combustível 1	=	=	0,926	%
combustível 2	=	=	0,074	%
combustível 3	=	=	0	%
combustível 4	=	=	0	%

ExAr	2,19	
volume da câmara	0,383	m3
temperatura em C	1000	С
temperatura em K	1273,15	K
pressão	1	atm
massa do combustível	8,197	kg/h
PCS	35197,9	kj/kg

relação ar/combustível estequiométrica*	=	8,290518	:1	
* proporção estequiométrica de ar /combustível em bas	e de peso			

massa total de ar necessária com exce ar	sso de =	148,8267	Kg/h
massa total de ar + combustível	=	157,0237	Kg/h
potência específica w=m.PCS/	/ =	209,2524	W
tempo de residência	=	2,3	m/s

		Perfi	l de tem	peratura do	o etanol. S'	= 0,684, te	emperatu	ıra de ref	erência 10	00°C	
posição	posição	número	média	confiança	confiança	mediana	mínimo	máximo	variância	desvio	erro
x/D	y/D	de	media	-95%	95%	mediana		талто	vanancia	padrão	padrão
	0	1204	1292,2	1291.0	1293,5	1291.5	1220.2	1363.3	514,12	22,67	0.653
	0.04	1213	1296.1	1294.8	1297.3	1295.5	1238.9	1364.4	468.16	21.64	0.621
0.15	0.09	1216	1290.5	1289,2	1291.8	1289.5	1219.5	1362.7	520,79	22,82	0.654
0,15	0,15	1209	1064.2	1062.5	1066.0	1061 7	077.0	1156 1	2231,00	20.29	0.975
	0.34	1071	1045.0	1043.5	1046.4	1043.5	982.5	1117 0	579.52	24 07	0.0736
	0.5	1202	1032.7	1032.0	1033.3	1033.4	994.7	1065.1	135.90	11.66	0.336
	0	1208	1203,4	1202,4	1204,4	1202,4	1155,4	1258,9	318,16	17,84	0,513
	0,04	1205	1215,8	1214,7	1216,8	1214,0	1165,9	1271,3	353,79	18,81	0,542
	0.09	1067	1201.0	1199.9	1202.1	1200.3	1157.0	1250,7	340.64	18,46	0,565
0,36	0.15	977	1211.7	1210.5	1212.8	1212.3	1157.2	1264.0	349.84	18,70	0.598
	0.23	1209	1162.4	1161.2	1163.6	1161.3	1108.2	1216.3	449.35	21,20	0.610
	0.34	1206	1157.9	1157.0	1158.8	1158.0	1009.5	1205.0	256.60	16.02	0,461
	0,5	014	11571	1156.0	1124,4	1124,4	11166	1100,4	230,18	15.01	0,457
	0.04	1204	1172.8	1172.0	1173.7	1172.6	1124.3	1217.2	231.46	15.29	0.556
	0.04	1204	1186.5	1185.6	1187.4	1186.1	1146.7	1229.2	237.36	15.41	0.443
0.6	0.15	810	1180.2	1178.9	1181.6	1178.6	1140.1	1237.2	381.86	19.54	0.687
-,-	0.23	1208	1184.0	1183.0	1185.0	1184.4	1137.0	1230.8	323.13	17.98	0.517
	0,34	1215	1178,3	1177,5	1179,1	1177,9	1129,1	1231,0	204,21	14,29	0,410
	0.5	1205	1166.0	1165,2	1166,9	1166.3	1115,6	1201.0	205,06	14,32	0,413
	0	1264	1146.5	1145.8	1147.2	1146.3	1115.6	1186,1	160.08	12,65	0,356
	0.04	1205	1161.8	1161.1	1162.5	1162.5	1126.9	1204,2	150.31	12,26	0.353
0.05	0,09	1205	1174,4	1173,8	1175,1	1173,6	1141,4	1210,3	124,52	11,16	0,321
0,85	0.15	846	1190.1	1189.3	1190.9	1190.6	1157.1	1221,4	140.43	11.85	0,407
	0.23	1212	1199.7	1199.0	1200.4	1199.9	1164.6	1240,4	153,85	12,40	0.356
	0.34	1167	1102.0	1198.9	1104.9	1104.4	11070	1229.0	77.95	16 70	0.253
	0.5	940	1154.3	1152.9	1154.7	1154.2	1137.0	1176.4	52.88	7 27	0,409
	0.04	1208	1152.6	1152.2	1153.0	1152.2	1133.6	1174.8	51 18	7 15	0,207
	0.09	1203	1138.4	1137.9	1138.9	1137.5	1119.2	1163.5	71.53	8.46	0.244
1,4	0.15	1656	1159.5	1159.2	1159.8	1160.3	1128.8	1176.3	43.00	6.56	0.161
	0,23	764	1168,7	1168.3	1169,1	1169,2	1152,6	1183,5	29,94	5,47	0,198
	0,34	1060	1174,4	1173,9	1174,9	1173,8	1152,0	1195,8	69,09	8,31	0,255
	0,5	1203	1163,4	1162.9	1164.0	1164,1	1130,7	1187,2	99,28	9,96	0,287
	0	1202	1138.0	1137.8	1138.3	1137.7	1125.9	1152.8	20,69	4,55	0,131
	0.04	1204	1145.4	1145.1	1145.6	1145.5	1129.7	1158.9	25.25	5.02	0.145
2.04	0.09	1195	1148./	1148.3	1149,1	1149,2	1132,4	1168.0	41,96	6,48	0,18/
2,04	0,15	1205	1152,3	1152,1	1152,0	1152,0	1140.0	1164,5	20,06	4,48	0,129
	0.23	1204	1162.2	1162.0	1162.5	1162 /	1142.3	1174 5	22,73	4,77	0.121
	0.54	1204	1151.3	1151.0	1151.7	1152.3	1133.8	1165.3	36.26	6.02	0.173
	0.0	1202	1125.6	1125.4	1125.9	1125.7	1113.2	1137.5	21.80	4 67	0.135
	0.04	1200	1130.3	1130.1	1130.5	1130.1	1119.9	1143.5	12.61	3.55	0.103
	0,09	1220	1133,9	1133,7	1134,2	1133,9	1120,7	1147,4	20,19	4,49	0,129
2,72	0,15	1202	1136,5	1136,3	1136,7	1136,4	1126,1	1151,1	11,67	3,42	0,099
	0.23	1203	1141.6	1141,4	1141,8	1141,5	1131.8	1151.8	11,32	3,36	0,097
	0.34	1257	1144,2	1144.0	1144,4	1144,2	1133.6	1155.6	12,48	3.53	0,100
	0,5	1207	1133,3	1133,0	1133,7	1134,3	1115,8	1148,4	34,60	5,88	0,169
	0	1210	1124.5	1124.3	1124.7	1124.5	1115.8	1133.5	8.34	2.89	0.083
	0.04	1199	1126.5	1126.3	1126,7	1126.5	1118.2	1136.0	9,64	3.10	0.090
2 10	0.09	1201	1125./	1125,6	1125.9	1125.6	1100.0	1134./	6.40	2.66	0.07/
5,19	0.15	1201	1121 0	1120,0	1121.0	1120.0	1120.0	1128.2	7 26	2,33	0.079
	0.34	1199	1134.5	1134.4	1134.7	1134.5	1124.3	1142.2	8 24	2,71	0,070
	0.5	1204	1114 4	1113.9	1115.0	11172	1085.2	1131.3	103.35	10.17	0,293

$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	Perfil de concentração do NO _x no etanol. S'=0,684, temperatura de referência 1000°C, em ppm								
$0,15 = \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	x/D	y/D		tom	adas			média	desvio padrão médio
$0.35 5 5 5 6 5 5.2 0.447 \\ 0.23 7 7 6 6 6 6 6.4 0.548 \\ 0.15 18 16 18 19 18 17.8 1.095 \\ 0.09 27 27 25 25 25 25.8 1.095 \\ 0.04 23 26 30 31 33 28.6 4.037 \\ 0 31 31 31 32 33 28.6 4.037 \\ 0 31 31 31 32 33 28.6 4.037 \\ 0 35 10 10 10 10 10 10 10.0 0.000 \\ 0.35 14 14 14 15 15 14.4 0.548 \\ 0.23 17 18 20 19 19 19 18.6 1.140 \\ 0.35 0.04 32 32 23 24 24 23.4 0.548 \\ 0.23 17 18 20 19 19 18.6 1.140 \\ 0.09 28 28 28 27 27 27.6 0.548 \\ 0.09 28 28 28 27 27 27.6 0.548 \\ 0.04 32 32 33 33 33 332 33.2 0.447 \\ 0.5 12 12 12 13 11 12.0 0.707 \\ 0.35 18 17 18 19 19 18.2 0.837 \\ 0.23 30 29 28 28 27 28.4 1.140 \\ 0.15 35 35 35 35 35.0 0.000 \\ 0.09 38 39 38 38 38 38.8 38.8 1.304 \\ 0.04 42 42 43 42 43 42.4 0.548 \\ 0 0.15 35 35 35 35 35.0 0.000 \\ 0.09 38 39 38 38 38 38.8 38.8 1.304 \\ 0.6 0.15 35 21 20 21 21 19 20.4 0.894 \\ 0.23 26 25 26 27 26.0 0.707 \\ 0.35 30 30 31 31 31 31 30.6 0.694 \\ 0.6 0.09 42 42 41 41 41 41 41.4 41.4 41.4 41.4 41.4 \\ 0.04 41 41 41 41 41 41.4 41.4 41.4 41.4 41.4 \\ 0.04 40 39 39 38 38 39.2 0.837 \\ 0.6 0.15 36 30 31 31 31 31 30.6 0.548 \\ 0.35 30 29 29 29 20 30 30 29.6 0.548 \\ 0.03 30 31 31 31 31 30.6 0.548 \\ 0.04 41 41 41 41 41 41 41.4 41.$		0,5	6	5	4	4	4	4,6	0,894
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0,35	5	5	5	6	5	5,2	0,447
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	0,15	0,23	7	7	6	6	6	6,4	0,548
$0.99 27 27 25 25 25 25 25.8 1,095 \\ 0.04 23 26 30 31 33 28.6 4,037 \\ 0 31 31 31 31 32 31 31.2 0,447 \\ 0.5 10 10 10 10 10 10.0 0,000 \\ 0.35 14 14 14 15 15 14.4 0,548 \\ 0.23 17 18 20 19 19 19 18.6 1,140 \\ 0.23 17 18 20 19 19 19 18.6 1,140 \\ 0.04 32 32 23 23 24 24 23.4 0,548 \\ 0.09 28 28 28 27 27 27.6 0,548 \\ 0.04 32 32 33 33 32 32.4 0,548 \\ 0.04 32 32 33 33 32 32.4 0,548 \\ 0 0 33 33 34 33 33 33 3$		0,15	18	16	18	19	18	17,8	1,095
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		0,09	27	27	25	25	25	25,8	1,095
$0,36 = \begin{bmatrix} 0 & 31 & 31 & 31 & 32 & 31 & 31,2 & 0,447 \\ 0,55 & 10 & 10 & 10 & 10 & 10 & 10,0 & 0,000 \\ 0,35 & 14 & 14 & 14 & 15 & 15 & 14,4 & 0,548 \\ 0,23 & 17 & 18 & 20 & 19 & 19 & 18,6 & 1,140 \\ 0,15 & 23 & 23 & 23 & 24 & 24 & 23,4 & 0,548 \\ 0,09 & 28 & 28 & 28 & 27 & 27 & 27,6 & 0,548 \\ 0,04 & 32 & 32 & 33 & 33 & 32 & 32,2 & 0,447 \\ 0,04 & 32 & 32 & 33 & 33 & 33,2 & 0,447 \\ 0,05 & 12 & 12 & 12 & 13 & 11 & 12,0 & 0,707 \\ 0,35 & 18 & 17 & 18 & 19 & 19 & 18,2 & 0,837 \\ 0,23 & 30 & 29 & 28 & 28 & 27 & 28,4 & 1,140 \\ 0,15 & 35 & 35 & 35 & 35 & 35 & 35,0 & 0,000 \\ 0,09 & 38 & 39 & 38 & 38 & 38 & 38,2 & 0,447 \\ 0,04 & 42 & 42 & 43 & 42 & 43 & 42,4 & 0,548 \\ 0 & 41 & 39 & 38 & 38 & 38 & 38,8 & 1,304 \\ 0,35 & 19 & 17 & 17 & 17 & 17 & 17,4 & 0,894 \\ 0,35 & 21 & 20 & 21 & 21 & 19 & 20,4 & 0,894 \\ 0,23 & 26 & 26 & 25 & 26 & 27 & 26,0 & 0,707 \\ 0,35 & 30 & 30 & 31 & 31 & 31 & 30,6 & 0,548 \\ 0,04 & 41 & 41 & 41 & 41 & 41 & 41, & 0,548 \\ 0,04 & 41 & 41 & 41 & 41 & 41 & 41, & 0,548 \\ 0,04 & 41 & 41 & 41 & 39 & 41 & 40,6 & 0,894 \\ 0,23 & 26 & 26 & 25 & 26 & 27 & 26,0 & 0,707 \\ 0,35 & 30 & 30 & 31 & 31 & 31 & 30,6 & 0,548 \\ 0,04 & 41 & 41 & 41 & 39 & 41 & 40,6 & 0,894 \\ 0,23 & 26 & 26 & 25 & 26 & 27 & 26,0 & 0,707 \\ 0,35 & 30 & 30 & 31 & 31 & 31 & 30,6 & 0,548 \\ 0,04 & 41 & 41 & 41 & 39 & 41 & 40,6 & 0,894 \\ 0,23 & 28 & 27 & 28 & 28 & 27 & 27,6 & 0,548 \\ 0,04 & 40 & 39 & 39 & 39 & 38 & 35, 35,0 & 0,707 \\ 0 & 32 & 31 & 31 & 31 & 31 & 31,2 & 0,447 \\ 0,04 & 35 & 36 & 35 & 35 & 35,0 & 0,707 \\ 0 & 32 & 31 & 31 & 31 & 31 & 31,2 & 0,447 \\ 0,5 & 48 & 47 & 47 & 46 & 45 & 466 & 1140 \\ 0,5 & 48 & 47 & 47 & 46 & 45 & 466 & 1140 \\ 0,5 & 48 & 47 & 47 & 46 & 45 & 466 & 1140 \\ 0,5 & 48 & 47 & 47 & 46 & 45 & 466 & 1140 \\ 0,5 & 48 & 47 & 47 & 46 & 45 & 466 & 1140 \\ 0,5 & 48 & 47 & 47 & 46 & 45 & 466 & 1140 \\ 0,5 & 48 & 47 & 47 & 46 & 45 & 466 & 1140 \\ 0,5 & 48 & 47 & 47 & 46 & 45 & 466 & 1140 \\ 0,5 & 48 & 47 & 47 & 46 & 45 & 466 & 1140 \\ 0,5 & 48 & 47 & 47 & 46 & 45 & 466 & 1140 \\ 0,5 & 48 & 47 & 47 & 46 & 45 & 466 & 1140 \\ 0,5 & 48 & 47 & 47 &$		0,04	23	26	30	31	33	28,6	4,037
$0,36 = \begin{bmatrix} 0.5 & 10 & 10 & 10 & 10 & 10 & 10. & 10. & 0.000 \\ 0.35 & 14 & 14 & 14 & 15 & 15 & 14,4 & 0,548 \\ 0,036 & 0,15 & 23 & 23 & 23 & 24 & 24 & 23,4 & 0,548 \\ 0,09 & 28 & 28 & 28 & 27 & 27 & 27,6 & 0,548 \\ 0.04 & 32 & 32 & 33 & 33 & 32 & 32,4 & 0,548 \\ 0 & 33 & 33 & 34 & 33 & 33 & 33,2 & 0,447 \\ 0 & 33 & 33 & 34 & 33 & 33 & 33,2 & 0,447 \\ \hline 0 & 35 & 12 & 12 & 12 & 13 & 11 & 12.0 & 0,707 \\ 0,35 & 18 & 17 & 18 & 19 & 19 & 18,2 & 0,837 \\ 0,23 & 30 & 29 & 28 & 28 & 27 & 28,4 & 1,140 \\ 0,015 & 35 & 35 & 35 & 35 & 35 & 35.0 & 0,000 \\ \hline 0,09 & 38 & 39 & 38 & 38 & 38 & 38,2 & 0,447 \\ 0,04 & 42 & 42 & 43 & 42 & 43 & 42,4 & 0,548 \\ 0 & 0 & 41 & 39 & 38 & 38 & 38 & 38,2 & 0,447 \\ 0,04 & 42 & 42 & 43 & 42 & 43 & 42,4 & 0,548 \\ 0,05 & 19 & 17 & 17 & 17 & 17 & 17,4 & 0,894 \\ 0,35 & 21 & 20 & 21 & 21 & 19 & 20,4 & 0,894 \\ 0,35 & 21 & 20 & 21 & 21 & 19 & 20,4 & 0,894 \\ 0,35 & 21 & 20 & 21 & 21 & 19 & 20,4 & 0,894 \\ 0,35 & 21 & 20 & 21 & 21 & 19 & 20,4 & 0,894 \\ 0,35 & 21 & 20 & 21 & 21 & 19 & 20,4 & 0,894 \\ 0,04 & 41 & 41 & 41 & 41 & 41 & 41,4 & 0,548 \\ 0,04 & 41 & 41 & 41 & 39 & 38 & 39 & 39 & 38 \\ 1,40 & 0 & 40 & 39 & 39 & 38 & 39,2 & 0,837 \\ 1,40 & 0,15 & 36 & 36 & 35 & 35 & 35, & 35,0 & 0,707 \\ 0 & 40 & 40 & 39 & 39 & 38 & 39,2 & 0,837 \\ 1,40 & 0,15 & 36 & 36 & 35 & 35 & 35,35 & 35,0 & 0,707 \\ 0 & 32 & 31 & 31 & 31 & 31 & 31,2 & 0,447 \\ 0,04 & 35 & 36 & 35 & 35 & 35,35 & 35,0 & 0,707 \\ 0 & 32 & 31 & 31 & 31 & 31 & 31,2 & 0,447 \\ 0,04 & 35 & 36 & 35 & 35 & 35,35 & 35,0 & 0,707 \\ 0 & 32 & 31 & 31 & 31 & 31 & 31,2 & 0,447 \\ 0,04 & 35 & 36 & 35 & 35 & 35,0 & 0,707 \\ 0 & 32 & 31 & 31 & 31 & 31 & 31,2 & 0,447 \\ 0,04 & 35 & 36 & 35 & 35 & 35,0 & 0,707 \\ 0 & 32 & 31 & 31 & 31 & 31 & 31,2 & 0,447 \\ 0,04 & 35 & 36 & 35 & 35 & 35,0 & 0,707 \\ 0 & 32 & 31 & 31 & 31 & 31 & 31,2 & 0,447 \\ 0,05 & 48 & 47 & 47 & 46 & 45 & 466 & 1140 \\ 0,05 & 0,06 & $		0	31	31	31	32	31	31,2	0,447
$0,36 = \begin{bmatrix} 0,35 & 14 & 14 & 14 & 15 & 15 & 14,4 & 0,548 \\ 0,23 & 17 & 18 & 20 & 19 & 19 & 18,6 & 1,140 \\ 0,15 & 23 & 23 & 23 & 24 & 24 & 23,4 & 0,548 \\ 0,09 & 28 & 28 & 28 & 27 & 27 & 27,6 & 0,548 \\ 0,04 & 32 & 32 & 33 & 33 & 32 & 32,4 & 0,548 \\ 0 & 0 & 33 & 33 & 34 & 33 & 33 & 33,2 & 0,447 \\ 0,5 & 12 & 12 & 12 & 13 & 11 & 12,0 & 0,707 \\ 0,35 & 18 & 17 & 18 & 19 & 19 & 18,2 & 0,837 \\ 0,23 & 30 & 29 & 28 & 28 & 27 & 28,4 & 1,140 \\ 0,60 & 0,15 & 35 & 35 & 35 & 35 & 35,0 & 0,000 \\ 0,09 & 38 & 39 & 38 & 38 & 38 & 38,2 & 0,447 \\ 0,04 & 42 & 42 & 43 & 42 & 43 & 42,4 & 0,548 \\ 0 & 41 & 39 & 38 & 38 & 38 & 38,8 & 1,304 \\ 0,35 & 19 & 17 & 17 & 17 & 17 & 17,4 & 0,894 \\ 0,35 & 21 & 20 & 21 & 21 & 19 & 20,4 & 0,894 \\ 0,35 & 21 & 20 & 21 & 21 & 19 & 20,4 & 0,894 \\ 0,35 & 21 & 20 & 21 & 21 & 19 & 20,4 & 0,894 \\ 0,35 & 21 & 20 & 21 & 21 & 19 & 20,4 & 0,894 \\ 0,23 & 26 & 26 & 25 & 26 & 27 & 26,0 & 0,707 \\ 0,35 & 0,15 & 38 & 38 & 40 & 40 & 40 & 39,2 & 1,095 \\ 0,09 & 42 & 42 & 41 & 41 & 41 & 41,4 & 0,548 \\ 0,04 & 41 & 41 & 41 & 39 & 38 & 38 & 39,2 & 0,837 \\ 0,40 & 40 & 40 & 39 & 39 & 38 & 39,2 & 0,837 \\ 1,40 & 0,15 & 36 & 36 & 35 & 35 & 35 & 35,4 & 0,548 \\ 0,09 & 38 & 38 & 38 & 39 & 39 & 38 & 39,2 & 0,837 \\ 1,40 & 0,15 & 36 & 36 & 35 & 35 & 35 & 35,4 & 0,548 \\ 0,04 & 35 & 36 & 35 & 35 & 35 & 35,4 & 0,548 \\ 0,09 & 38 & 38 & 38 & 39 & 39 & 38 & 39,2 & 0,837 \\ 0,04 & 35 & 36 & 35 & 35 & 35, 35,4 & 0,548 \\ 0,04 & 35 & 36 & 35 & 35 & 35, 35,4 & 0,548 \\ 0,04 & 35 & 36 & 35 & 34 & 35 & 35,0 & 0,707 \\ 0 & 32 & 31 & 31 & 31 & 31 & 31, 2 & 0,447 \\ 0,05 & 48 & 47 & 47 & 46 & 45 & 466 & 1140 \\ 0,05 & 0,04 & 35 & 36 & 35 & 34 & 35 & 35,0 & 0,707 \\ 0 & 32 & 31 & 31 & 31 & 31 & 31,2 & 0,447 \\ 0,05 & 0,04 & 35 & 36 & 35 & 34 & 35 & 35,0 & 0,707 \\ 0 & 32 & 31 & 31 & 31 & 31 & 31,2 & 0,447 \\ 0,05 & 0,04 & 35 & 36 & 35 & 34 & 35 & 35,0 & 0,707 \\ 0 & 32 & 31 & 31 & 31 & 31 & 31,2 & 0,447 \\ 0,05 & 0,06 & 0,07 & 0,05 & 0,0707 \\ 0 & 32 & 31 & 31 & 31 & 31 & 31,2 & 0,447 \\ 0,05 & 0,04 & 35 & 36 & 35 & 34 & 35 & 35,0 & 0,707 \\ 0 & 32 & 31 & 31 & 31 & 31$		0.5	10	10	10	10	10	10.0	0.000
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0,35	14	14	14	15	15	14,4	0,548
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	0.00	0,23	17	18	20	19	19	18,6	1,140
0.09 28 26 26 27 27 27 27 0.0348 $0.04 32 32 33 33 32 32.4 0.548$ $0 33 33 34 33 33 32 32.4 0.548$ $0 33 33 34 33 33 33.2 0.447$ $0.5 12 12 12 13 11 12.0 0.707$ $0.35 18 17 18 19 19 18.2 0.837$ $0.23 30 29 28 28 27 28.4 1.140$ $0.09 38 39 38 38 38 38.5 35.0 0.0000$ $0.09 38 39 38 38 38 38.8 38.2 0.447$ $0.04 42 42 42 43 42 43 42.4 0.548$ $0 41 39 38 38 38 38.8 38.8 38.8 1.304$ $0.55 19 17 17 17 17 17.4 0.894$ $0.55 19 17 17 17 17 17.4 0.894$ $0.35 21 20 21 21 19 20.4 0.894$ $0.23 26 26 25 26 27 26.0 0.707$ $0.85 0.15 38 38 40 40 40 39.2 1.095$ $0.09 42 42 41 41 41 41.4 41$	0,36	0,15	23	23	23	24	24	23,4	0,548
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0,09	20	20	20	27	27	27,0	0,540
$0,60 = \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0,04	<u>32</u>	<u>32</u>	33	22	<u>32</u>	32,4	0,340
0.35 12 12 12 13 11 12.0 0.707 $0.35 18 17 18 19 19 18.2 0.837$ $0.23 30 29 28 28 27 28.4 1.140$ $0.60 0.15 35 35 35 35 35 35 35$		05	10	10	10	10	11	12.0	0,447
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0.5	18	17	18	10	19	18.2	0.707
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0,00	30	29	28	28	27	28.4	1 140
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	0.60	0,20	35	35	35	35	35	35.0	0,000
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	0,00	0,09	38	39	38	38	38	38.2	0 447
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0.04	42	42	43	42	43	42.4	0.548
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0	41	39	38	38	38	38.8	1.304
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0.5	19	17	17	17	17	17.4	0.894
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0,35	21	20	21	21	19	20,4	0,894
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0,23	26	26	25	26	27	26,0	0,707
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	0,85	0,15	38	38	40	40	40	39,2	1,095
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0,09	42	42	41	41	41	41,4	0,548
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0,04	41	41	41	39	41	40,6	0,894
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0	40	40	39	39	38	39,2	0,837
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0.5	30	30	31	31	31	30.6	0.548
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0,35	30	29	29	30	30	29,6	0,548
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	1.10	0,23	28	27	28	28	27	27,6	0,548
0,09 38 38 39 39 38,4 0,048 0,04 35 36 35 34 35 35,0 0,707 0 32 31 31 31 31,2 0,447 0,5 48 47 47 46 45 46.6 1.140	1,40	0,15	36	36	35	35	35	35,4	0,548
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0,09	38	38	38	39	39	38,4	0,548
0 32 31 31 31 31 31,2 0,447		0,04	30	21	30	21	21	30,0	0,707
		0.5	10	47	17	16	45	46.6	1 1 4 0
		0.35	40	47	47	40	43	40.0	0.548
		0.23	45	46	45	46	45	45.4	0.548
2.04 0.15 40 40 41 42 40.6 0.894	2.04	0,15	40	40	40	41	42	40.6	0.894
0,09 51 50 51 50 50.6 0.548	_,• .	0,09	51	50	51	51	50	50.6	0,548
0,04 51 51 50 48 49 49,8 1,304		0,04	51	51	50	48	49	49,8	1,304
0 51 50 50 46 50 49,4 1,949		0	51	50	50	46	50	49,4	1,949
0.5 51 52 52 52 52 51.8 0.447		0,5	51	52	52	52	52	51,8	0,447
0,35 50 50 49 49 49,6 0,548		0,35	50	50	50	49	49	49,6	0,548
0,23 49 49 49 50 49,2 0,447	2,72	0,23	49	49	49	49	50	49,2	0,447
2,72 0,15 56 56 55 55 55,4 0,548		0,15	56	56	55	55	55	55,4	0,548
0,09 53 54 53 54 53,4 0,548		0,09	53	54	53	53	54	53,4	0,548
0,04 52 52 51 50 51,4 0,894		0,04	52	52	52	51	50	51,4	0,894
0 55 56 55 56 56 55,6 0,548		0	55	56	55	56	56	55,6	0,548
		0.5	58	58	58	58	58	58.0	0.000
		0,35	56	56	55	55	55	55,4	0,548
	2 10	0,23	54	54	54	54	55	54,2	0,447
3,13 0,10 04 04 03 03 04 03,0 0,048 0,048 0,048	3,19	0,15	54	54	53	53	54	53,6 E0 1	0.548
0,03 03 00 00 00 00,4 0,048		0,09	59	59	50	57	57	57 G	0,040
0 57 57 57 57 56 56.8 0.447		0,04	57	57	57	57	56	56.8	0,447

Perfil de concentração do O ₂ no etanol. S'=0,684 temperatura de referência 1000°C em %								
					desvio			
X/D	y/D			media	padrao médio			
	0,5	17,3	17,3	17,3	17,3	17,3	17,30	0,000
	0,35	16,9	16,9	16,9	16,8	16,9	16,88	0,045
0,15	0,23	15,3	15,1	15,2	15,3	15,3	15,24	0,089
	0,15	7,8	7,4	7,3	7,5	7,5	7,50	0,187
	0,09	5,9	6,0	5,9	5,9	6,0	5,94	0,055
	0,04	4,9	4,8	4,6	4,6	4,4	4,66	0,195
	0	5,5	5,5	5,5	5,7	5,7	5,58	0,110
	0,5	16,8	16,8	16,9	16,9	16,9	16,86	0,055
	0,35	1,6	15,6	15,5	15,5	15,5	12,74	6,228
	0,23	12,4	12,4	12,6	12,6	12,6	12,52	0,110
0,36	0,15	9,0	8,6	8,8	8,7	8,7	8,76	0,152
	0,09	8,0	7,9	7,9	7,9	8,2	7,98	0,130
	0,04	8,0	8,0	8,2	8,5	7,9	8,12	0,239
	0	8,6	8,6	9,0	9,4	9,4	9,00	0,400
	0,5	16,6	16,5	16,4	16,3	16,5	16,46	0,114
	0,35	15,0	15,1	14,8	14,6	14,6	14,82	0,228
	0,23	11,6	11,7	11,8	11,9	12,1	11,82	0,192
0,60	0,15	9,2	9,0	8,9	8,9	9,0	9,00	0,122
	0,09	8,4	8,4	8,7	8,7	8,8	8,60	0,187
	0,04	8,6	8,6	8,6	8,7	8,5	8,60	0,071
	0	10,5	10,7	10,8	10,8	10,8	10,72	0,130
	0,5	15,6	15,8	15,7	15,6	15,7	15,68	0,084
0,85	0,35	14,8	14,8	14,8	14,8	14,9	14,82	0,045
	0,23	13,8	13,7	13,7	13,6	13,3	13,62	0,192
	0,15	10,8	10,8	10,8	10,9	10,8	10,82	0,045
	0,09	10,5	10,8	10,8	10,8	10,8	10,74	0,134
	0,04	11,1	11,1	11,2	11,2	11,3	11,18	0,084
	0	11,5	11,7	11,8	11,7	11,7	11,68	0,110
	0,5	13,6	13,5	13,7	13,6	13,6	13,60	0,071
	0,35	14,1	14,0	13,9	13,8	13,9	13,94	0,114
1 40	0,23	14,0	14,0	14,0	14,0	13,9	10,90	0,045
1,40	0,15	12,7	12,7	12,0	12,9	12,9	12,00	0,100
	0,09	12,4	12,5	12,4	12,4	12,4	12,42	0,045
	0,04	13,0	13,0	13,0	12,9	12,0	12,94	0,069
	0.5	11.8	11.6	11.6	11.5	11.8	11.66	0,043
	0.35	11.3	11.5	11.0	11,5	11,0	11.42	0,134
	0.23	11,0	11.8	11.8	11.8	11.7	11.76	0.055
2 04	0.15	12.2	12.3	12.2	12.1	12.2	12 20	0.071
2,01	0.09	11.0	10.9	10.9	11.0	11.0	10.96	0.055
	0.04	11.0	11.0	11.1	11.1	11.1	11.06	0.055
	0	11,1	11,1	11,2	11,1	11,1	11,12	0,045
	0,5	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,80	0,000
	0,35	10,9	10,8	10,9	10,9	10,9	10.88	0,045
	0,23	11,2	10,9	10,9	10,9	10,9	10,96	0,134
2,72	0,15	10,4	10,4	10,5	10,4	10,4	10,42	0,045
	0,09	10,6	10,6	10,6	10,6	10,5	10,58	0,045
	0,04	10,8	10,8	10,8	10,9	10,9	10,84	0,055
	0	10,4	10,3	10,3	10,3	10,4	10,34	0,055
	0,5	10,0	10,0	10,0	10,1	10,2	10,06	0,089
	0,35	10,5	10,4	10,4	10,4	10,5	10,44	0,055
	0,23	10,4	10,4	10,4	10,3	10,3	10,36	0,055
3,19	0,15	10,4	10,4	10,4	10,4	10,5	10,42	0,045
	0,09	9,8	9,9	10,0	9,9	9,9	9,90	0,071
	0,04	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,10	0,000
	0	10,2	10,2	10,3	10,3	10,3	10,26	0,055

Perfil de concentração do CO no etanol. S'=0,684 temperatura de referência 1000°C em ppm								
	desvio							
x/D	v/D			tomadas	média	padrão		
-						médio		
	0,5	370	360	362	378	381	370	9,3
	0,35	400	383	378	381	383	385	8,6
0,15	0,23	2895	2856	3069	3184	3362	3073	208,9
	0,15	37690	41980	40600	42750	43130	41230	2202,9
	0,09	acima	do fundo de	e escala do e	equipamento	0 6,0%	#DIV/0!	#DIV/0!
	0,04	40200	41650	42320	42500	42820	41898	1041,1
	0	20540	20430	20380	20260	20080	20338	175,8
	0,5	0	0	0	0	0	0	0,0
	0,35	37	43	66	64	43	51	13,4
	0,23	4297	4082	4016	3914	3887	4039	164,1
0,36	0,15	18900	16970	17770	18360	18110	18022	718,2
	0,09	19720	19870	20030	19120	16130	18974	1626,7
	0,04	13580	13970	15210	13960	14510	14246	632,6
	0	8372	7511	6993	7555	6503	7387	698,3
	0,5	0	0	0	0	0	0	0,0
	0,35	0	0	0	0	0	0	0,0
	0,23	2181	2812	2//1	2124	1898	2357	410,6
0,60	0,15	9800	8496	9600	8/34	9332	9192	559,0
	0,09	9801	9230	9164	9246	9	7490	4189,8
	0,04	7067	/144	7998	7520	7213	/388	381,7
	0	1993	1903	1611	1663	3/14	2177	874,0
	0,5	0	0	0	0	0	0	0,0
	0,35	0	0	0	0	0	0	0,0
0.95	0,23	1501	1900	0	1760	1777	1062	0,0
0,05	0,15	1920	1699	1501	1/09	1705	1600	200,4
	0,09	580	752	891	015	033	81/	1/0,0
	0,04	104	130	141	146	138	132	16 58915
	0.5	0	0	0	0	0	0	0
	0.35	0	0	0	0	0	0	0
	0.23	0	0	0	0	0	0	0
1.40	0.15	0	0	0	0	0	0	0
, -	0.09	0	0	0	0	0	0	0
	0,04	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,5	0	0	0	0	0	0	0
	0,35	0	0	0	0	0	0	0
	0,23	0	0	0	0	0	0	0
2,04	0,15	0	0	0	0	0	0	0
	0,09	0	0	0	0	0	0	0
	0,04	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,5	0	0	0	0	0	0	0
	0,35	0	0	0	0	0	0	0
	0,23	0	0	0	0	0	0	0
2,72	0,15	0	0	0	0	0	0	0
	0,09	0	0	0	0	0	0	0
	0,04	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,5	0	0	0	0	0	0	0
	0,35	0	0		0	0	0	0
2 10	0,23	0	0	0	0	0	0	0
3,19	0,15	0	0	0	0	0	0	0
	0,09	0	0	0	0	0	0	0
	0,04	0	0	0	0	0	0	0
	· · ·			0			0	



Perfil de temperatura S'= 0,684 temp. ref. 1000°C



Perfil de concentração de NOx S'=0,684 temp. ref. 1000°C



Perfil de concentrção de O2 do etanol S'=0,684 temp. Ref. 1000°C



Concentração de CO do Etanol S'=0,684 temp. ref. 1000°C



Concentração de NO_x e temperatura do Etanol S'=0,684 temp. ref. 1000ºC



Concentração de NOx e O2 do Etanol S'9,684 temp.de ref. 1000°C









Resultados do etanol à temperatura de referência 1000°C, rotação S' 1,315

Planilha para cálculo de tempo de residência para combustíveis não-nitrogenados e isentos de enxofre.

* considere cada molécula como um combustível diferente (mesmo não tendo carbono)

** mantenha pelo menos um valor diferente de 0 nos combustíveis não utilizados

combustíveis + Ar = gases de queima comb1 + comb2 + comb3 + comb4 + Ar = CO2 + H2O + 3,76N2

	combustível 1							
С		2						
Н		6						
0		1						
	nº moles 20,13043							

combustível 2						
С		0				
Н		2				
0		1				
nº	4,111111					

	combustível 3						
С		0					
Н		1					
0		0					
	nº moles	0					

]	combustível 4							
	С		0					
	Н		1					
	0		0					
	n⁰	0						

combustível 1	=	0,926	%
combustível 2	=	0,074	%
combustível 3	=	0	%
combustível 4	=	0	%

ExAr	2,07	
volume da câmara	0,383	m3
temperatura em C	1000	С
temperatura em K	1273,15	K
pressão	1	atm
massa do combustível	8,542	kg/h
PCS	35197.9	ki/ka

relação ar/combustível estequiométrica*	=	8,290518	:1				
* proporção esteguiométrica de ar (combustival em base de pase							

proporção estequiométrica de ar /combustível em base de peso

massa total de ar neces ar	sária com excesso de	=	146,5924	Kg/h	
massa total de ar + com	bustível	=	155,1344	Kg/h	
potência específica	w=m.PCS/v	=	218,0595	W	
tempo de residência		=	2,414229	m/s	

	Perfil de temperatura do etanol. S' = 1,315, temperatura de referência 1000°C										
posição	posição	número	média	confiança	confiança	mediana	mínimo	máximo	variância	desvio	erro
	0	1047	1389,4	1388,2	1390,7	1388,7	1343,5	1437,7	418,83	20,47	0,63
0,15	0,04	1220	1413.8	1412,3	1415,2	1421,8	1327,5	1456,5	656,72	25.63	0,73
	0,09	994	1416.0	1414,9	1417,0	1418,2	1346,5	1457,2	266,99	16,34	0,52
	0,15	983	1319,5	1317,2	1321,9	1322,9	1164,6	1406,7	1404.85	37,48	1,20
	0,23	972	976.0	972,7	979,3	983.0	869,9	1101.8	2818.33	53,09	1,70
	0,34	1204	866,6	865,9	867,3	864,9	841,3	909,4	139,64	11,82	0,34
	0,50	1209	826,8	826.0	827,5	827,7	795,5	865,9	179,49	13,40	0.39
	0	1200	1506,4	1505.8	1506.9	1507,1	1441,7	1531.3	98.62	9,93	0,29
	0,04	725	1498,3	1497,7	1498,9	1498,9	1465,5	1525.8	76,19	8,73	0.32
	0.09	1205	1470.9	1470.0	1471.8	1473.9	1383.3	1505.4	276,14	16.62	0,48
0,36	0,15	1206	1363,0	1361,4	1364,7	1365,9	1278,3	1427,4	849,61	29,15	0,84
	0.23	1246	1221,1	1217,9	1224.3	1207.5	1100.3	1369.9	3341.67	57,81	1,64
	0.34	1212	951,4	949,7	953,1	944.9	898.5	1034.0	890,70	29,84	0,86
	0.50	1215	911,7	909,9	913,4	913,1	845.8	1015.6	969.32	31,13	0,89
	0	1204	1404,7	1402.5	1406.8	1408.8	1287.0	1494.8	1452,42	38,11	1,10
	0,04	1204	1471,1	1469,5	1472,7	1475,0	1381,0	1524,1	823,08	28,69	0,83
	0.09	1208	1325,1	1322,3	1328.0	1319,7	1211.7	1460.6	2601.97	51.01	1,47
0,6	0.15	1205	1238,7	1236.8	1240,5	1237,2	1141.0	1342.4	1097.21	33,12	0.95
	0,23	1205	1127,9	1126,7	1129.0	1124,9	1077.6	1202,1	422,86	20,56	0.59
	0.34	725	1062.6	1061,2	1064,1	1063,2	1012,0	1108.0	415,48	20.38	0,76
	0,50	1081	982,4	981,9	982,8	982,4	962,3	1011,8	57,53	7,59	0,23
	0	1205	1389.3	1387.3	1391.2	1389.8	1284.9	1466.0	1167.91	34.17	0,98
	0.04	1206	1328.0	1324.8	1331.1	1319.5	1212.0	1461.7	3121.00	55.87	1.61
0.05	0.09	1201	1291.3	1289.3	1293.4	1288.9	1206.5	1404.7	1320.99	36.35	1.05
0,85	0.15	1200	1262.2	1260.1	1264.3	1261.6	1169.5	1368.3	1370.86	37.03	1.07
	0,23	1197	1154,1	1151,6	1156,6	1143,7	1074,2	1290,2	1935,42	43,99	1,27
	0.34	1234	1085.1	1084.2	1086.1	1082.9	1049.9	1147.1	274.64	16.57	0.47
	0,50	753	1025.3	1024.2	1026.4	1027.9	980,7	1060.9	253,44	15.92	0.58
	0	1207	1194.9	1193.2	1196.6	1193.0	1133.9	1304.6	915.15	30.25	0.87
	0.04	1208	1163.7	1161./	1165.6	1154.2	1114.0	12/4./	11/8.59	34.33	0.99
1 4	0,09	1216	1187,8	1186,2	1189,3	1182,5	1144,3	1267,6	746,92	27,33	0,78
1,4	0.15	969	1209.2	1207.4	1211.0	1205.4	1157.6	12/2.2	822,38	28.68	0.92
	0.23	1136	1145.7	1143.5	1147.8	1129.9	1102.5	1242.8	1358.88	36.86	1.09
	0.34	1219	1129.6	1128,4	1130,7	1125.9	1087.8	1197.3	426,64	20.66	0.59
	0.50	1213	1032.3	1030.6	1034.1	1033.2	946.1	1162,4	998.34	31.60	0.91
	0	1207	1102,7	11077	1103,4	11077	1121,3	1194,0	162,05	7.05	0,37
	0.04	1000	1145.0	11454	1146.4	1144.0	1107.0	1172.6	49,67	7.05	0.26
2 04	0.09	1200	1156.0	1145,4	1140,4	1144.0	1127.0	1102.0	00,94	9.00	0.20
2,07	0.10	1233 860	1152.0	1152.7	115/ 2	1152.0	1100./	1170.0	30,/3	9,70	0.20
	0.20	1224	1120 6	1120.1	11/10 0	1120 0	1116 /	1160 5	69.47	8 33	0.21
	0,54	1224	1130.2	1120.7	1130.8	1120.1	11083	1162.2	05,42	0,00	0.24
	0.00	1158	1139.2	1120 6	11/0 0	1120 /	1131.8	1153.8	11 22	3 35	0.20
	0.04	1206	1144.0	11/22.8	114/1	11/2 9	1136.2	1154.4	7.56	2 75	0.10
	0.04	1200	1139.7	1139.5	1139.9	1140.3	1126.8	1152.3	18.04	4 25	0.00
2.72	0.15	1203	1136.8	1136.6	1137.0	1136.7	1129.3	1148.0	8.59	2.93	0.08
_,	0.23	1218	1139.5	1139.3	1139.7	1139.1	1129.8	1158.8	15 28	3.91	0.11
	0.34	1226	1133.2	1133.0	1133.4	1133.0	1123.9	1146 7	11.05	3.32	0.09
	0.50	1215	1107.9	1107.0	1108 7	1112 1	1066.6	1133.5	231 45	15.21	0.44
	0	1207	1124.0	1123.9	1124.1	1124.0	1118.7	1129.7	3.20	1.79	0.05
	0.04	928	1125.5	1125.4	1125.7	1125.3	1119.9	1130.7	3.75	1.94	0.06
	0.09	1208	1127.5	1127.4	1127.6	1127.5	1121.9	1131.9	2.79	1.67	0.05
3,19	0,15	1203	1127.2	1127.1	1127.3	1127.0	1120.7	1135.9	5.93	2,44	0,07
, í	0.23	1205	1128.6	1128.5	1128.8	1128.6	1122.7	1138.4	5.74	2.40	0.07
	0,34	1205	1127.1	1126.9	1127.3	1126.9	1119.2	1136.5	11.08	3,33	0,10
	0,50	1207	1103,2	1102,5	1104,0	1107,0	1069,0	1122,9	195,81	13,99	0,40

Perfil de concentração do NO _x no etanol. S' = 1,315, temperatura de referência 1000, em ppm								
x/D	y/D		toma	adas			média	desvio padrão
	0,5	23	22	22	22	23	22,4	0,548
0,15	0.35	22	21	20	20	19	20,4	1,140
	0.23	21	22	21	22	21	21,4	0,548
	0,15	26	26	27	26	26	26,2	0,447
	0.09	32	34	35	37	37	35.0	2,121
	0.04	53	54	54	58	58	55,4	2,408
	0	40	41	42	42	41	41,2	0,837
	0,5	30	29	29	29	28	29,0	0,707
	0.35	32	32	34	35	34	33,4	1,342
	0.23	37	38	38	38	38	37,8	0,447
0,36	0,15	41	41	41	41	41	41,0	0,000
	0.09	45	46	45	44	44	44,8	0,837
	0,04	44	43	44	45	45	44,2	0,837
	0	49	48	47	46	47	47,4	1,140
	0,5	31	31	31	31	31	31,0	0,000
	0.35	36	37	36	37	37	36,6	0,548
	0,23	46	45	47	46	46	46,0	0,707
0,60	0,15	50	49	48	49	49	49,0	0,707
	0.09	50	49	50	51	51	50,2	0,837
	0.04	50	50	50	49	49	49,6	0,548
	0	49	48	46	45	45	46,6	1,817
	0,5	36	36	36	35	36	35,8	0,447
	0.35	41	41	41	40	42	41,0	0,707
	0,23	48	48	47	48	48	47,8	0,447
0.85	0,15	48	48	48	49	50	48,6	0,894
	0.09	49	48	49	50	49	49,0	0,707
	0.04	47	46	46	47	47	46,6	0,548
	0	47	47	47	47	47	47,0	0,000
	0,5	46	46	46	45	45	45,6	0,548
	0.35	48	49	49	48	48	48,4	0,548
	0,23	48	48	48	48	48	48,0	0,000
1,40	0,15	46	46	45	46	46	45,8	0,447
	0.09	47	47	47	47	46	46,8	0,447
	0.04	46	45	46	45	45	45,4	0,548
	0	47	46	46	46	47	46,4	0,548
	0.5	44	45	45	46	45	45.0	0,707
	0.35	49	48	48	49	49	48,6	0,548
	0.23	49	50	49	50	50	49.6	0,548
2,04	0.15	51	51	51	52	52	51,4	0.548
	0.09	51	50	50	51	51	50.6	0,548
	0.04	48	48	49	51	51	49,4	1,517
	0	51	51	51	50	50	50,6	0,548
	0.5	53	54	54	54	54	53,8	0,447
	0.35	54	54	55	54	55	54,4	0.548
	0,23	53	54	54	53	53	53,4	0,548
2,72	0.15	55	54	55	55	54	54,6	0,548
	0.09	54	54	54	54	54	54,0	0,000
	0.04	54	53	54	53	53	53,4	0.548
	0	54	53	53	53	53	53.2	0.447
	0.5	55	54	54	55	54	54,4	0.548
	0.35	59	59	59	58	58	58.6	0.548
	0.23	56	56	57	57	56	56,4	0,548
3,19	0.15	54	53	52	52	53	52.8	0.837
	0.09	56	55	55	55	55	55.2	0.447
	0.04	54	55	55	55	55	54,8	0,447
	0	58	59	59	58	58	58,4	0.548

Perfil de concentração do O₂ no etanol. S'=1,315, temperatura de referência 1000°C, em %										
x/D	y/D		toma	adas			média	desvio padrão		
	0.5	14,7	14.9	15.0	14,9	14,9	14,9	0,110		
	0.35	15.6	15.2	15.4	15.6	15,7	15,5	0,200		
0,15	0,23	14,9	14.8	14,7	14.5	14.5	14,7	0.179		
	0.15	9.8	9.8	8.9	10.2	10,4	9,8	0,576		
	0.09	5,7	5,4	6,3	6,0	5,8	5,8	0,336		
	0.04	3,2	2,5	2,0	1,7	1,7	2,2	0,638		
	0	4,9	4,7	4,4	4,5	4,9	4,7	0,228		
	0.5	14.6	14,4	14,5	14,6	14.6	14,5	0.089		
0.36 0,60 0,85	0.35	13.0	13,1	13.0	13.0	13.2	13,1	0,089		
	0,23	12,7	12.5	12,5	12,5	12.6	12,6	0.089		
	0,15	11.7	11.6	11.6	11.6	11.3	11.6	0,152		
	0.09	9.9	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	0.089		
	0.04	8.8	8,7	8,7	8,6	8.6	8,7	0.084		
	0	7,8	7,4	7,6	7,7	7,9	7,7	0,192		
	0.5	14,2	14.3	14.3	14.3	14,2	14,3	0.055		
	0.35	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13,2	0.000		
	0,23	10,7	10,7	10,7	10.6	10.6	10,7	0.055		
0,60	0,15	10.4	10.4	10.5	10.6	10.6	10.5	0,100		
	0.09	10,1	10.2	10,2	10,1	10,1	10,1	0,055		
	0.04	10.4	10.4	10.3	10,4	10,4	10,4	0.045		
	0	10,7	10.9	10.8	10.8	10.8	10,8	0,071		
	0.5	13.6	13.7	13.7	13.7	13,7	13,7	0.045		
	0.35	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	0.000		
	0,23	11.0	11.0	11.0	11,1	11,2	11,1	0,089		
0,85	0,15	11.0	11.1	10.9	11.0	10,9	11,0	0,084		
	0.09	10.9	10.8	10.9	10,9	10,9	10,9	0,045		
	0,04	10.9	10.9	10.9	10,9	10,9	10,9	0.000		
	0	11,1	11,1	11.0	11.0	11.0	11,0	0.055		
	0.5	11,4	11.4	11.5	11.5	11.5	11,5	0,055		
	0.35	10.5	10.5	10.6	10.6	10.6	10,6	0.055		
	0.23	11.2	11.1	11.2	11.1	11,1	11,1	0.055		
1.40	0.15	11.8	11.8	11.8	11.8	11.7	11,8	0,045		
	0.09	11.5	11.6	11.5	11.6	11.6	11,6	0.055		
	0.04	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11,9	0,000		
	0	11,4	11,4	11.5	11.5	11.5	11.5	0.055		
	0.5	11.8	11.6	11.6	11.6	11.7	11.7	0.089		
	0.35	10.9	10.8	10.8	10.7	10.8	10.8	0.071		
	0.23	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8	0.000		
2,04	0,15	10.7	10.7	10.6	10.6	10.6	10,6	0,055		
	0.09	10.2	10.3	10.5	10.3	10.3	10.3	0,110		
	0.04	10.8	10.7	10.6	10.5	10.5	10,6	0,130		
	0	10.5	10.6	10.6	10,6	10.7	10,6	0.071		
	0.5	10,4	10.4	10.3	10.3	10,2	10,3	0.084		
	0.35	10.2	10.2	10.1	10.2	10.2	10,2	0,045		
0.70	0.23	10.2	10.2	10.3	10.3	10.3	10.3	0.055		
2,72	0,15	10.0	10.0	10.0	10.1	10.0	10.0	0.045		
	0.09	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	0.000		
	0.04	10.2	10.2	10.3	10.3	10.3	10.3	0.055		
		10,2	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	0,045		
1	0.5	10,4	10.3	10,4	0.7	10,4	10,4	0.045		
1	0.35	<u>9,0</u>	9.0	3,0	<u> </u>	9.0 10.1	9,0	0.045		
2 10	0.45	10.0	10.0	10.0	10.0	10.1	10.0	0,040		
3,19	0.15	10.3	10.5	10.5	10.5	10.5	10.0	0.089		
I	0.09	10.1	10.2	10.2	10.2	10.3	10,2	0.071		
	0,04	0.4 0.7	0 A A	0 7	0 7	9.7	0 7	0,000		
L	0	5,7	0,0	5,7	5,7	5,7	5,7	0,040		

Perfil de concentração do CO no etanol. S'=1,315, temperatura de referência 1000°C, em ppm											
x/D	y/D		toma	adas			media	desvio padrão			
	0.5	48	43	40	29	35	39.0	7.314			
0.15	0.35	80	75	77	85	77	78.8	3.899			
	0.23	2222	3217	868	881	1144	1666.4	1029.593			
	0.15	19960	14030	10340	11180	10280	13158.0	4097.685			
	0.09	39000	33010	36000	42000	49300	39862.0	6250.098			
	0.04						-				
					<u>^</u>		0.0	0.000			
0.36	0.5	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
	0.35	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
	0.23	479		0	0	0	0.0	0.000			
	0.15	4/8	447	301	388	324	399.6				
	0.09	6420	6222	6059	5001	6057	6160.6	102 505			
	0.04	0420	9012	7722	7672	7976	0109.0 9272.9	992 422			
	0.5	0	0313	0	1012	0	0.072.0	0.000			
	0.35	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
0.60	0.00	Ő	0	Ő	0	0	0.0	0.000			
0.60	0.15	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
0.00	0.09	Ő	Ő	Ő	0	Ő	0.0	0.000			
	0.04	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
	0	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
	0.5	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
	0.35	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
	0.23	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
0.85	0.15	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
	0.09	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
	0.04	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
		0	0	0	0	0	0.0	0.000			
	0.5	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
	0.35	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
1 40	0.23	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
1.40	0.15	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
	0.03	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
	0	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
	0.5	Ő	0	0	0	0	0.0	0.000			
	0.35	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
	0.23	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
2.04	0.15	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
	0.09	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
	0.04	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
	0	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
	0.5	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
	0.35	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
0 70	0.23	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
2.12	0.15	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
	0.09	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
	0.04	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
	0.5	0	0 0	0 0	0	0 0	0.0	0.000			
	0.35	ŏ	Ő	ŏ	Õ	Ő	0.0	0.000			
	0.23	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
3.19	0.15	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
	0.09	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
	0.04	0	0	0	0	0	0.0	0.000			
	0	0	0	0	0	0	0.0	0.000			



Perfil de temperatura do etanol S'= 1,315 temp. ref. 1000°C



Concentração NOx do Etanol S'=1,351 temp. de ref.1000°C


Concentração de O2 do Etanol S'=1,351 temp. ref. 1000°C



Concentração de CO do Etanol S'=1,351 temp. de refer. 1000°C



Concentração de NO_x e temperatura do Etanol S'=1,315 temp. ref. 1000ºC



Concentração de NOx e O2 Etanol S'=1,315 temp. ref. 1000°C



Perfil de temperatura Etanol S'=1,315 temp. ref. 1000°C intervalo de 20°C





Perfil de concentração do O2 do etanol S'=1,315 temp. ref. 1000°C intervalo 0,5 % 0.50 13.0 12.5 10. S -12.0 11.5 11.0 11.0 10.5 у/D 0.00 15 95 <10.5 117.0 11.0 13.0 -0.50 1.00 0.50 1.50 2.00 3.00 2.50 x/D

Resultados do Etanol à temperatura de referência 1175°C, rotação S' = 0.684

Planilha para cálculo de tempo de residência para combustíveis não-nitrogenados e isentos de enxofre.

* considere cada molécula como um combustível diferente (mesmo não tendo carbono)

** mantenha pelo menos um valor diferente de 0 nos combustíveis não utilizados

combustíveis + Ar = gases de queima

comb1 + comb2 + comb3 + comb4 + Ar = CO2 + H2O + 3,76N2

	combustível 1						
С		2					
Н		6					
0		1					
	nº moles	20,13043					

combustível 2							
C 0							
Н		2					
0	1						
nº	4,111111						

	combustível 3					
С		0				
Η		1				
0		0				
	nº moles 0					

combustível 4									
С		0							
Н		1							
0		0							
n ^s	0								

combustível 1	=	0,926	%
combustível 2	=	0,074	%
combustível 3	=	0	%
combustível 4	=	0	%

ExAr	1,42	
volume da câmara	0,383	m3
temperatura em C	1175	С
temperatura em K	1448,15	K
pressão	1	atm
massa do combustível	11,39	kg/h
PCS	35197,9	kj/kg

relação ar/combustível estequiométrica*	=	8,290518	:1
* ~			

* proporção estequiométrica de ar /combustível em base de peso

massa total de ar neces ar	sária com excesso de	=	134.0892	Ka/h	
massa total de ar + com	bustível	=	145,4792	Kg/h	
potência específica	w=m.PCS/v	=	290,763	W	
tempo de residência		=	2,2725	m/s	

Perfil de temperatura do etanol. S' = 0,684 temperatura de referência 1175°C										
posição y/D	número de amostras	média	confiança -95%	confiança 95%	mediana	mínimo	máximo	variância	desvio padrão	erro padrão
0	1200	1583,8	1582,9	1584,7	1585,4	1526.3	1604,8	259,2	16,1	0,46
0,04	1274	1598,7	1598,2	1599,2	1604,7	1550,6	1604,8	94,6	9,7	0,27
0,09	1217	1557,3	1556,1	1558,5	1558,5	1498,2	1604,5	426,6	20,7	0,59
0,15	1203	1415,3	1413,8	1416,9	1414,2	1322,8	1491,7	716,9	26,8	0,77
0,23	1201	1350,4	1349,0	1351,7	1351,5	1286,1	1444,0	555,6	23,6	0,68
0,34	727	1337,6	1336,0	1339,3	1340,0	1269,3	1393,1	504,4	22,5	0,83
0,50	1255	1184,9	1183,5	1186,2	1184,5	1106,3	1253,1	553,9	23,5	0,66
0	1200	1482.1	1480.9	1483.3	1481,2	1429.8	1552.0	481.0	21.9	0.63
0,04	1206	1490,9	1489,7	1492,1	1489,8	1429,6	1559,7	479,3	21,9	0,63
0,09	1093	1477,9	1476,6	1479,1	1476,3	1418,0	1538,7	461,5	21,5	0,65
0,15	1200	1431,4	1430,1	1432,7	1431,1	1363,8	1499,5	522,0	22,8	0,66
0,23	/52	1389,1	1387,7	1390,6	1390,9	1316,6	1442,6	418,7	20,5	0,75
0,34	1102	13/8,8	13/7,8	13/9,8	13/9,7	1326,1	1420,2	268,0	16,4	0,49
0,50	9/3	1317,0	1316,0	1318,0	1317,5	12/1,6	1361,4	245,1	15,7	0,50
0	1208	1422.1	1421,1	1423,1	1420,5	1363.8	1496,1	330.4	18,2	0.52
0,04	1208	1421,0	1420,5	1422,7	1420,2	1079.6	1490,6	356,0	18,9	0,54
0,09	1100	1440,7	1440,0	1440,0	1440,7	1202.0	1402.4	403,0	22,0	0,63
0,15	1000	1430,3	1433,3	1437,4	1430,3	1392,0	1403,4	209,0	16.0	0,47
0,23	1209	1421,1	1420,3	1422,0	1419,5	1271.2	14/2,0	1/0.9	10,0	0,45
0,54	1200	136/ 3	1363.6	1365.0	1365.8	1327.2	1307 1	149,0	12,2	0,35
0,50	1242	1402 5	1401.0	1402.2	1401.2	1062 2	1450.4	150.0	10.6	0,00
0.04	717	1402.5	1401.0	1403.2	1401.3	1378.0	1450,4	176.0	13.3	0.50
0,04	1210	1400.0	1/19 3	1420.8	1/18 3	1380.6	1464.9	185.5	13.6	0,00
0.05	1200	1427 4	1426.6	1428.1	1425.9	1392.4	1465 7	170.0	13.0	0,33
0,13	970	1414 4	1413.5	1415.2	1413.8	1385.6	1453.9	168.5	13.0	0,30
0.20	1205	1407.8	1407.3	1408.4	1407 7	1379.7	1435.2	82.5	9.1	0,42
0.50	1200	1383.6	1383.2	1384 1	1384 5	1354.9	1406.7	717	85	0,20
0,00	1226	1405.0	1404 5	1405 5	1404.6	1377.9	1439.1	75.0	87	0.25
0.04	1201	1399.9	1399.3	1400.5	1398.7	1369.6	1437.1	110.7	10.5	0.30
0.09	1201	1401.8	1401.3	1402.2	1401.3	1381.9	1430.5	65.4	8.1	0.23
0.15	1201	1404.4	1403.9	1404.9	1403.6	1380.6	1431.7	73.1	8.5	0.25
0.23	1201	1404.4	1403.9	1404.9	1403.6	1380.6	1431.7	73.1	8.5	0.25
0,34	1204	1396.3	1395.9	1396.6	1396,3	1378,4	1414,7	42,9	6,6	0,19
0,50	1204	1364,0	1363,5	1364,4	1364,3	1337,0	1383,5	64,7	8,0	0,23
0	1202	1372,1	1371,7	1372,4	1372,0	1352,6	1390,7	38,4	6,2	0,18
0,04	1290	1372,7	1372,4	1373,0	1372,4	1358,1	1391,7	36,8	6,1	0,17
0,09	1203	1381,3	1381,0	1381,7	1381,5	1367,6	1396,7	29,0	5,4	0,16
0,15	1202	1381,9	1381,6	1382,2	1381,9	1360,9	1398,2	34,1	5,8	0,17
0,23	1202	1386,6	1386,3	1386,9	1386,9	1369,3	1405,5	30,9	5,6	0,16
0,34	1203	1385,0	1384,6	1385,3	1385,2	1365,4	1404,9	39,0	6,2	0,18
0,50	1201	1362,1	1361,4	1362,8	1364,3	1316,5	1385,4	153,0	12,4	0,36
0	1199	1344.2	1343,7	1344.6	1342,9	1326.2	1370.6	53,3	7,3	0,21
0,04	1203	1346,1	1345,9	1346,4	1346,2	1331,3	1361,2	22,8	4,8	0,14
0,09	1200	1353,0	1352,8	1353,3	1352,9	1338,4	1365,9	22,5	4,7	0,14
0,15	1201	1360,4	1360,1	1360,7	1360,4	1347,5	1373,2	20,2	4,5	0,13
0,23	1211	1358,1	1357,8	1358,3	1358,2	1345,0	1370,4	19,0	4,4	0,13
0,34	1073	1355.7	1355,4	1356,0	1355.8	1338,9	1368,7	24,3	4,9	0,15
0,50	1201	1302,5	1300,7	1304,4	131/,1	1215,2	1347,5	1057,7	32,5	0,94
0	1039	1343.6	1343,4	1343.8	1343.6	1334.3	1353.3	10.0	3.2	0.10
0,04	1205	1345,4	1345,2	1345,5	1345,5	1335,6	1356,7	10,0	3,2	0,09
0,09	1187	1348,2	1348,0	1348,4	1348,2	1339,0	1356,4	10,0	3,2	0,09
0,15	1211	1350,3	1350,1	1350,5	1350,2	1341,1	1359,1	9,4	3,1	0,09
0,23	932	1349,8	1349,5	1350,0	1349,9	1339,0	1360,8	12,5	3,5	0,12
0,34	825	1346,4	1346,1	1346,7	1346,6	1331,3	1359,8		4,2	0,14
0,50	1207	1310,6	1309,3	1311,9	1318,4	1234,8	1345,4	521,3	22,8	0,66

Perfil de concentração do NO _x no etanol. S'=0,684, temperatura de referência 1175°C, em ppm									
x/D	y/D		toma	adas			média	desvio padrão	
	0.5	28	28	27	26	27	27.2	0.837	
	0,35	25	26	26	26	26	25,8	0,447	
0,15	0,23	25	25	25	25	24	24,8	0,447	
	0,15	23	23	23	22	23	22,8	0,447	
	0,09	21	20	20	21	21	20,6	0,548	
	0,04	20	20	21	21	21	20,6	0.548	
	0	20	20	22	21	21	20,8	0,837	
	0.5	37	36	36	35	35	35.8	0.837	
0,36	0.35	40	42	42	42	43	41.8	1,095	
	0,23	43	44	44	44	43	43,6	0.548	
	0,15	36	39	39	38	38	38,0	1,225	
	0.09	37	37	37	37	37	37.0	0.000	
	0.04	36	36	36	36	37	36.2	0.447	
	0	40	41	41	40	40	40.4	0.548	
	0.5	40	41	40	41	40	40.4	0.548	
	0.35	48	49	49	49	49	48.8	0.447	
	0.23	55	55	56	55	56	55.4	0.548	
0.60	0.15	59	60	60	59	6	48.8	24 021	
0,00	0,10	58	58	58	59	59	58.4	0.548	
	0.04	61	62	60	60	60	60.6	0,894	
	0,01	60	60	60	61	61	60.4	0,548	
	0.5	51	51	50	50	51	50.6	0,548	
	0.5	56	57	57	57	57	56.8	0.548	
	0,00	61	62	62	62	62	61.8	0,447	
0.85	0.25	66	66	65	66	65	65.6	0,447	
0,05	0,15	68	68	68	60	68	68.2	0,340	
	0,09	71	72	72	72	72	72.0	0,447	
	0,04	70	71	72	72	73	72,0	0,707	
	0.5	96	95	86	96	96	95.9	0,040	
	0.3	00 79	- <u>0</u> 5 - 79	70	70	00 01	70.0	1 225	
	0,35	70	70	79	79	70	79,0	1,220	
1 40	0,23	79	79	70	73	79	70,0	0.837	
1,40	0,15	70	70	77	77	70	77.0	0,007	
	0,09	76	76	77	77	70	77,0	0,000	
	0,04	70	70	77	77	70	70,0	0,037	
	0	70	70		04	01	77,4	0,040	
	0.5	94	92	93	94	94	93,4	0.094	
	0,35	92	91	91	91	90	91,0	0,707	
2.04	0,23	93	93	93	93	93	93,0	0,000	
2,04	0,15	90	80	80	00	00	99.4	0,094	
	0,09	00	09	09	00	00	00,4	0,340	
	0,04	09	09	09	09	90	09,2	0,447	
		91	91	92	91	91	91,2	0,447	
	0.5	94	94	93	94	95	94.0	0.707	
	0,35	93	93	93	94	95	93,0	0,094	
0.70	0,23	93	94	93	93	94	93,4	0,540	
2,12	0,15	93	33	94	94	94	33,0	0,548	
	0,09	93	93	94	94	94	93,6	0,548	
	0,04	96	95	95	96	96	95,6	0,548	
	0	94	94	94	95	95	94,4	0,548	
	0,5	100	98	99	100	101	99.6	1.140	
	0,35	98	99	99	97	97	98,0	1,000	
0.10	0,23	100	99	99	99	98	99,0	0,707	
3,19	0,15	102	101	100	99	100	100,4	1,140	
	0,09	98	99	99	99	99	98,8	0,447	
	0,04	98	98	98	98	98	98,0	0,000	
	0	98	97	97	98	98	97,6	0,548	

Perfil de concentração do O ₂ no etanol, S' = 1,315, temperatura de referência 1175°C, em %									
x/D	y/D			tomadas	média	desvio padrão médio			
	0,5	13,6	13,6	13,5	13,6	13,6	13,58	0,045	
	0,35	13,1	13,0	13,0	12,8	12,8	12,94	0,134	
	0.23	12,3	12,2	12.3	12.3	12.3	12,28	0,045	
0,15	0.15	11,1	11,2	11.3	11,1	10.8	11,10	0,187	
	0.09	8.5	8.7	8,3	8,3	8,4	8,44	0,167	
	0,04	6,2	6,1	6,0	6,0	6,0	6,06	0,089	
	0	5,1	4.8	4.3	4.3	4.3	4,56	0.371	
	0.5	12,7	12,6	12,8	12.8	12,7	12,/2	0.084	
	0.35	11.2	11,1	10.9	10.9	10.9	11,00	0,141	
0,36	0.23	10.5	10,1	10,1	10.1	10.2	0.56	0,173	
0,36	0,15	9,7	9,5	9,0	9,5	9,5	9,00	0,009	
	0.09	7.2	7.2	7.2	73	73	7.24	0.045	
	0.04	6.2	65	63	63	6.1	6.28	0.000	
	0.5	12.0	11 9	11.9	12.0	12.0	11 96	0.055	
	0.35	11.9	10.6	10.2	10.2	10.3	10.64	0,000	
	0.23	9.1	9.0	9.0	9.0	9.0	9.02	0.045	
0.60	0.15	8.0	7.9	7.8	7.9	7.9	7.90	0.071	
	0.09	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,30	0,000	
	0.04	6,9	6,8	7,0	7,0	6,9	6,92	0,084	
	0	6,7	6,7	6,6	6,6	6,5	6,62	0,084	
	0.5	11,4	11.5	11,6	11,5	11.0	11,40	0,235	
	0.35	10,2	10.3	10.2	10.3	10.3	10,26	0.055	
	0.23	9,3	9,3	9.3	9,3	9,4	9,32	0,045	
0,85	0.15	8.5	8.3	8,2	8,3	8,2	8,30	0,122	
	0,09	7,7	7,7	7,7	7,7	7,6	7,68	0,045	
	0.04	7.3	7.3	7,2	7.3	7,2	7,26	0.055	
	0	7.2	7,2	7.2	7,1	7,1	7,16	0.055	
	0.5	7,4	/.5	7,4	7,4	7,4	7,42	0.045	
	0.35	0.4	0.3	0,2	0,2	0,2	0,20 8,20	0,069	
1.40	0.25	8.0	8.0	8.0	8.0	81	8.02	0,100	
1,40	0.09	8.1	8.2	8.1	8.1	8.0	8 10	0.043	
	0.04	7.6	7.6	7.6	7.5	7.5	7.56	0.055	
	0	7.4	7.4	7.4	7.5	7.5	7.44	0.055	
	0.5	6.7	6.6	6.6	6.6	6.6	6.62	0.045	
	0.35	6,7	6,6	6,7	6,7	6,7	6,68	0,045	
	0,23	6,6	6,7	6,7	6,7	6,6	6,66	0,055	
2,04	0,15	7,4	7,2	7,2	7,2	7,3	7,26	0,089	
	0.09	7,4	7.3	7.3	7,3	7,4	7,34	0.055	
	0,04	6,9	6,9	6,8	6,8	7,0	6,88	0,084	
	0	6.9	6.9	7.0	7.0	7.0	6,96	0.055	
	0.5	7,2	7.1	7,2	7,2	7,1	7,16	0.055	
	0.35	6.9	6.9	6.8	6.8	6.8	6,84	0.055	
0.70	0.23	6.8	6.8	6.8	6.8	6,9	6,82	0.045	
2,72	0,15	7,0	6.7	6,9	67	0,9	6.92	0,045	
	0.09	0.0 6.7	0./ 67	0,/	0,/	0,0 67	0,70		
	0.04	67	6.6	67	67	67	6 68	0.055	
<u> </u>	0.5	6.4	6.0	6.4	6.4	6.4	6 40	0,040	
	0.35	6.4	6.5	6.5	6.5	6.5	6.48	0.045	
	0.23	6.5	6.5	6.4	6.4	6.6	6.48	0.084	
3.19	0.15	6.6	6.6	6.6	6.7	6.6	6.62	0.045	
5,10	0.09	6.8	6.7	6.8	6.8	6.8	6.78	0.045	
	0.04	6.8	6.8	6.8	6.9	6.9	6,84	0,055	
	0	6,9	6,9	6,8	6,8	6,8	6,84	0,055	

x/D y/D	Perfil de concentração do CO no etanol. S' = 0,684, temperatura de referência 1175°C, em ppm								
0.5 235 246 246 249 246 244.4 5.11 0.15 435 457 481 497 500 497 486.4 15.05 0.15 4322 4829 4919 5042 4703.8 320.24 0.09 13790 14220 14010 13930 13750 13940.0 188.41 0.04 26210 29180 28660 27950.0 111.04 0 42890 43960 44420 44670 44076.0 711.29 0.5 0 0 0 0 0 0.00 0.00 0.35 0 0 0 0 0 0.00 0.00 0.00 0.36 0.128 1234 1382 1334 1638 1375.4 156.0 0.36 0 0 0 0 0 0 0.00 0.00 0.36 0 0 0 0 0 0 <th>x/D</th> <th>y/D</th> <th></th> <th></th> <th>tomadas</th> <th></th> <th></th> <th>média</th> <th>desvio padrão</th>	x/D	y/D			tomadas			média	desvio padrão
0.35 457 481 497 500 497 486.4 18.05 0.15 0.23 1159 1156 1180 1215 1209 1183.8 27.44 0.09 13790 14220 14010 13930 13750 13940.0 188.41 0.04 26210 29180 27800 28000 28560 27950.0 1111.04 0.42890 43960 44420 44470 44670 44076.0 711.29 0.5 0 0 0 0 0 0 0.00 0.00 0.36 0.15 12280 1243 13324 13344 1332 123.51 156.00 0.00		0,5	235	246	246	249	246	244,4	5,41
0.15 0.15 1150 1180 1215 1209 1183.8 27.44 0.04 12320 14220 14010 13330 13750 13940.0 188.41 0.04 26210 22180.0 28000 28560 27950.0 1111.04 0 42290 43960 44420 44440 44670 44076.0 711.29 0.5 0 0 0 0 0 0 0.00 0.00 0.35 0 0 0 0 0 0.00 0.00 0.00 0.23 0 0 0 0 0 0 0.00 0.00 0.00 0.04 4864 8723 9000 8736 8811 8792.8 123.62 0.5 0 0 0 0 0 0.00 0.00 0.00 0.60 0.5 0 0 0 0 0 0.00 0.00 0.00 0.00 <td></td> <td>0,35</td> <td>457</td> <td>481</td> <td>497</td> <td>500</td> <td>497</td> <td>486,4</td> <td>18,05</td>		0,35	457	481	497	500	497	486,4	18,05
0.15 0.15 4322 4429 4419 5042 4703.8 2320.24 0.04 13280 14220 14010 13350 13240.0 1884.41 0.04 26210 21800 22800 28850 22950.0 1111.04 0.5 0 0 0 0 0 0.0 0.00 0.00 0.35 0 0 0 0 0 0.0 0.00 0.00 0.35 0 0 0 0 0 0.0 0.00 0.00 0.00 0.35 0 0 0 0 0 0.0 0.00	0,15	0.23	1159	1156	1180	1215	1209	1183.8	27,44
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		0.15	4322		4829	4919	5042	4703,8	320,24
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0.09	13790	14220	14010	13930	13750	13940.0	188,41
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0.04	26210	29180	27800	28000	28560	27950.0	1111.04
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0	42890	43960	44420	44440	44670	44076.0	711,29
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0.5	0	0	0	0	0	0.0	0,00
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0.35	0	0	0	0	0	0,0	0,00
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	0.26	0.23	1290	1242	1292	1224	1629	1275 4	156.00
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	0,30	0.15	1200	1243	1024	1055	1030	1070,4	21.21
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		0.09	8694	8723	9000	8736	8811	8792.0	123.62
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		0.04	12460	12900	13510	13360	13180	13082.0	415.36
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0.5	0	0	0	0	0	0.0	0.00
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0.35	0 0	0	0	0	0	0,0	0.00
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0.23	Ő	0	0	Ő	0 0	0.0	0.00
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	0.60	0.15	206	165	164	131	144	162.0	28.43
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	0,00	0.09	1256	1222	1254	1254	1276	1252.4	19.36
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		0.04	2258	2143	1986	2196	2333	2183.2	131.06
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		0	3361	3481	3532	3727	3551	3530,4	132,49
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		0,5	0	0	0	0	0	0	0
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		0,35	0	0	0	0	0	0	0
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0,23	0	0	0	0	0	0	0
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	0,85	0,15	0	0	0	0	0	0	0
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0.09	0	0	0	0	0	0	0
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		0.04	0	0	0	0	0	0	0
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0	0	0	0	0	0	0	0
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0.5	0	0	0	0	0	0	0
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0.35	0	0	0	0	0	0	0
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	1 10	0.23	0	0	0	0	0	0	0
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	1.40	0.15	0	0	0	0	0	0	0
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0.09	0	0	0	0	0	0	0
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0.04	0	0	0	0	0	0	0
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0.5	0	0	0	0	0	0	0
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0.5	0	0	0	0	0	0	0
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0.00	0	0	0	0	0	0	0
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	2.04	0.15	Ő	0	Ő	Ő	Ő	0	0
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	_,	0.09	Ő	Ő	Ő	Ő	0	0	0
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0.04	Ő	Ő	Ő	Ő	0	0	0
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0	0	0	0	0	0	0	0
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0,5	0	0	0	0	0	0	0
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0.35	0	0	0	0	0	0	0
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0.23	0	0	0	0	0	0	0
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	2,72	0,15	0	0	0	0	0	0	0
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0,09	0	0	0	0	0	0	0
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		0.04	0	0	0	0	0	0	0
$3.19 \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$		0	0	0	0	0	0	0	0
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		0.5	0	0	0	0	0	0	0
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$		0.35	0	0	0	0	0	0	0
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	0.10	0.23	0	0	0	0	0	0	0
0.09 0	3,19	0.15	0	0	0	0	0	0	0
		0.09	0	0	0		0	0	0
		0.04	0	0	0	0	0	0	0



Perfil de temperatura etanol S' = 0,684 temp. ref. 1175°C



Concentração de NOx (ppm) do Etanol S'= 0,684 temperatura de referência 1175 °C



Concentração de O2 (%) do etanol S' = 0,684 temperatura de referência 1175 °C



Concentração de CO (ppm) do etanol S' = 0,684 temp. de refer.1175°C



Concentração de NO_x e temperatura do Etanol S'=0,684 temp. ref. 1175ºC



Concentração de NOx (ppm) e O2 (%) do Etanol S' = 0,684 temp. de ref. 1175 °C



Resultados do Etanol à temperatura de referência 1175°C, rotação S' 1,315

Planilha para cálculo de tempo de residência para combustíveis não-nitrogenados e isentos de enxofre.

* considere cada molécula como um combustível diferente (mesmo não tendo carbono)

** mantenha pelo menos um valor diferente de 0 nos combustíveis não utilizados

combustíveis + Ar = gases de queima

comb1 + comb2 + comb3 + comb4 + Ar = CO2 + H2O + 3,76N2

combustível 1							
С		2					
Н		6					
0		1					
	20,13043						

combustível 2								
С		0						
Н		2						
0		1						
nº	4,111111							

combustível 3						
С		0				
Н		1				
0		0				
n ^o moles 0						

combustível 4								
С		0						
Н		1						
0		0						
n ^g	0							

combustível 1	=	0,926	%
combustível 2	=	0,074	%
combustível 3	=	0	%
combustível 4	=	0	%

ExAr	1,42	
volume da câmara	0,383	m3
temperatura em C	1175	С
temperatura em K	1448,15	К
pressão	1	atm
massa do combustível	11,39	kg/h
PCS	35197,9	kj/kg

relação ar/combustível estequiométrica*	=	8,290518	:1
* sus sus ão poto su do motivido do ou (combu otívido ou			

* proporção estequiométrica de ar /combustível em base de peso

massa total de ar neces ar	sária com excesso de	=	134.0892	Ka/h	
massa total de ar + com	ıbustível	=	145,4792	Kg/h	
potência específica	w=m.PCS/v	=	290,763	W	
tempo de residência		=	2,2725	m/s	

Perfil de temperatura do etanol. S' = 1,315, temperatura de referência 1175°C												
posição x/D	posição y/D	número de amostras	média	confiança - 95%	confiança 95%	mediana	mínimo	máximo	variância	desvio padrão	erro padrão	
	0	1207	1415,0	1414,6	1415,5	1415,2	1386,2	1440,4	72,0	8,5	0,24	
	0,04	1205	1470,5	1469,9	1471,1	1471,2	1437,2	1504,5	110,7	10,5	0,30	
	0,09	1205	1500,2	1499,6	1500,8	1501,0	1463,1	1526,7	116,4	10,8	0,31	
0,15	0,15	1207	1163,6	1161,9	1165,2	1159,1	1064,1	1282,6	870,2	29,5	0,85	
	0,23	1206	940,5	939,5	941,4	938,8	899,6	1018,9	296,0	17,2	0,50	
	0,34	1210	902,2	901,6	902,8	901,5	875,6	946,2	128,2	11,3	0,33	
	0,50	1128	890,5	889,8	891,2	891,9	852,3	922,3	147,8	12,2	0,36	
	0	1139	1583,7	1583,3	1584,2	1584,6	1551,5	1603,7	65,1	8,1	0,24	
	0,04	985	1594,0	1593,5	1594,4	1594,5	1567,6	1604,4	47,3	6,9	0,22	
0.00	0,09	1202	1547,9	1547,1	1548,7	1548,8	1497,5	1579,8	187,6	13,7	0,40	
0,36	0,15	1362	1335,0	1333,8	1336,2	1335,2	1261,8	1412,5	491,8	22,2	0,60	
	0,23	1212	1160,4	1159,4	1161,5	1159,6	1101,1	1220,6	360,0	19,0	0,55	
	0,34	1291	1048,9	1048,0	1049,9	1048,7	1001,3	1096,5	290,6	17,0	0,47	
	0,50	1210	962,6	962,1	963,2	961,8	932,9	995,8	98,4	9,9	0,29	
	0	/24	1604,5	1604,4	1604,7	1604,9	15/1,6	1604,9	5,5	2,3	0,09	
	0,04	1245	1592,1	1591,5	1592,7	1593,6	1543,3	1604,9	123,3	10,1	0,31	
0.6	0,09	1205	1000.4	1250.2	1511,5	1511,1	1461,8	1556,4	269,1	16,4	0,47	
0,0	0,15	1227	1360,4	1359,3	1301,5	1360,7	1011,0	1421,1	375,9	19,4	0,55	
	0,23	1200	1200,7	11674	1169.6	1169 5	11211,9	1301,7	198,9	14,1	0,41	
	0,34	1200	1040.7	1040.1	1050.2	1050.4	1022.2	1077.0	1017	10,7	0,31	
	0,50	1202	1567.7	1566.7	1568.6	1568.6	15123	1604.9	263.4	16.2	0,29	
	0.04	1203	1522.8	1500,7	1500,0	1500,0	1476 7	1564.7	203,4	16.2	0,47	
	0,04	1100	1/12/ 5	1/121,9	1/185.6	1/95 1	14/0,7	15/12 7	200,0	10,3	0,47	
0.85	0.05	906	1404,5	1405,5	1405,0	1405,1	1366 /	1/85 /	286.0	16.9	0,54	
0,00	0,13	1206	1357 5	1356.7	1358 /	1357.2	1315.0	1405,4	240.6	15.5	0,30	
	0,23	1111	1268.5	1267.7	1260.2	1268.6	1220.8	1210.0	160.6	10,0	0,40	
	0,54	1937	1144 4	1142.6	1146.3	1157.7	1009.5	1216.1	1719.6	41.5	0,30	
	0,50	1200	1450 1	1449.2	1450.9	1449.4	1408.7	1504.4	231.0	15.2	0.44	
	0.04	1199	1431.2	1430.4	1432.0	1431.4	1392.6	1470.0	210.8	14.5	0.42	
	0.09	1190	1441.3	1440.6	1442.0	1441.9	1402.3	1478.5	155.5	12.5	0.36	
1,4	0.15	1200	1416.2	1415.5	1416.8	1415.4	1379.8	1454.1	132.6	11.5	0.33	
, i	0,23	1200	1420,9	1420,3	1421,4	1420.8	1392,2	1451,9	95.9	9,8	0.28	
	0,34	1419	1419,0	1418,5	1419,4	1418,5	1394,5	1448,6	80.5	9,0	0,24	
	0,50	1524	1388,1	1387,5	1388,6	1388,7	1354,4	1413,9	107,7	10,4	0,27	
	0	1270	1383,3	1382,8	1383,8	1382,9	1359,8	1413,2	90,9	9,5	0,27	
	0,04	1198	1388,2	1387,7	1388,7	1388,0	1364,7	1412,9	84,8	9,2	0,27	
	0,09	1217	1385,4	1385,0	1385,9	1385,1	1362,8	1408,7	69,9	8,4	0,24	
2,04	0,15	763	1396,9	1396,3	1397,4	1396,9	1378,9	1418,4	64,0	8,0	0,29	
	0,23	1210	1406,5	1406,1	1406,9	1406,3	1386,6	1433,9	52,1	7,2	0,21	
	0,34	877	1414,7	1414,3	1415,1	1414,7	1399,6	1434,2	35,6	6,0	0,20	
	0,50	1278	1399,7	1399,0	1400,3	1402,1	1358,3	1426,1	136,0	11,7	0,33	
	0	1216	1348,8	1348,5	1349,1	1348,2	1338,4	1365,5	24,2	4,9	0,14	
	0,04	1199	1354,6	1354,3	1354,9	1354,2	1343,0	1378,4	27,3	5,2	0,15	
	0,09	1245	1364,7	1364,4	1365,0	1364,7	1350,9	1381,6	25,1	5,0	0,14	
2,72	0,15	1200	1374,0	1373,7	1374,3	1373,7	1359,2	1390,7	29,1	5,4	0,16	
	0,23	1209	1385,5	1385,3	1385,8	1385,7	1372,4	1398,6	23,4	4,8	0,14	
	0,34	1201	1393,5	1393,2	1393,8	1393,7	1380,4	1407,8	22,2	4,7	0,14	
	0,50	1200	1377,6	1376,9	1378,4	1381,1	1336,5	1401,9	182,3	13,5	0,39	
	0	1212	1330,3	1330,1	1330,6	1329,9	1320,2	1344,3	17,0	4,1	0,12	
	0,04	1211	1336,7	1336,5	1336,9	1336,8	1324,7	1352,8	16,3	4,0	0,12	
0.10	0,09	1200	1342,7	1342,5	1342,9	1342,6	1331,6	1356,5	15,7	4,0	0,11	
3,19	0,15	1200	1347,0	1346,8	1347,3	1346,9	1335,6	1359,2	16,4	4,0	0,12	
	0,23	1200	1352,3	1352,1	1352,5	1352,4	1342,9	1364,5	13,0	3,6	0,10	
	0,34	1264	1360,5	1360,4	1360,7	1360,5	1350,6	1371,6	11,6	3,4	0,10	
	0,50	1213	1358,1	1357,8	1358,3	1358,1	1347,9	1370,6	13,7	3,7	0,11	

				$\frac{1}{2}$				
x/D	y/D			tomadas			média	desvio padrão
	0,5	36	36	34	36	36	35,6	0,894
	0.35	35	33	32	34	34	33.6	1,140
0,15	0.23	31	30	30	30	30	30,2	0,447
	0.15	38	38	38	38	37	37,8	0,447
	0.09	68	67	66	64	63	65,6	2,074
	0.04	89	88	90	88	88	88,6	0,894
	0	85	85	84	83	85	84.4	0,894
	0.5	34	32	33	33	34	33,2	0,837
	0.35	43	43	44	44	43	43,4	0,548
0.00	0.23	48	49	50	51	53	50.2	1,924
0.36	0.15	5/	5/	56	56	56	56.4	0,548
	0.09	64	64	65	62	62	63,4	1,342
	0.04	63	64	60	60	63	64,0	1,000
	0.5	20	40	<u>02</u>	40	00	20.2	0.927
	0.3	59	<u>40</u> 52	59	<u>40</u> 52	50	52.2	0,037
	0.33	55 65	66	66	68	- 04 - 67	<u> </u>	1 1/0
0.60	0.25	78	78	78	78	77	77.8	0.447
0,00	0.19	82	81	81	82	81	81.4	0.548
	0.03	85	85	85	87	85	85.4	0.894
	0.04	86	87	87	86	86	86.4	0.548
	0.5	54	54	54	53	54	53.8	0.447
	0.35	71	69	71	70	71	70.4	0.894
	0.23	82	82	81	80	79	80.8	1.304
0.85	0.15	83	83	85	85	84	84.0	1.000
	0.09	104	104	112	111	110	108.2	3,899
	0,04	117	116	116	120	119	117,6	1,817
	0	124	123	122	122	121	122,4	1,140
	0,5	129	129	127	128	128	128,2	0,837
	0.35	143	140	129	126	125	132,6	8,325
	0,23	135	133	136	138	138	136.0	2,121
1,40	0,15	138	139	139	138	137	138,2	0.837
	0.09	137	138	138	138	138	137,8	0,447
	0.04	125	126	127	137	135	130.0	5,568
	0	132	133	134	134	134	133,4	0,894
	0.5	157	156	157	158	155	156.6	1,140
	0.35	149	154	156	155	153	153,4	2,702
	0.23	142	144	144	144	140	142,8	1,789
2,04	0.15	140	140	141	141	141	140.6	0,548
	0.09	136	136	136	136	137	136.2	0,447
	0.04	152	152	151	151	151	151,4	0.548
	0.5	134	155	172	170	177	133,2	1,037
	0.3	1/5	1/4	1/3	165	165	1/4,4	1,0/3
	0.33	165	164	163	162	161	163.0	1.017
0 70	0.23	162	162	161	161	160	161.2	0.927
2.12	0.15	163	164	163	161	162	162.6	1 1/0
	0.03	165	166	166	165	165	165.4	0 548
	0	166	167	167	167	168	167.0	0 707
	0.5	169	170	170	171	171	170.2	0.837
	0.35	168	169	168	167	167	167.8	0.837
	0.23	161	160	160	161	162	160.8	0.837
3.19	0.15	161	161	160	161	161	160.8	0.447
0,10	0,09	163	163	163	164	164	163.4	0.548
	0.04	164	164	165	165	165	164.6	0.548
	0	165	165	164	163	163	164.0	1.000

Perfil de concentração de O ₂ no etanol. S' = 1,315, temperatura de referência 1175°C, em %									
x/D	y/D			tomadas			média	desvio padrão	
	0.5	14.7	14.8	14.9	15.2	15.2	15.0	0.23	
	0.35	15.3	15,4	15,5	15,5	15,4	15,4	0,08	
0.15	0,23	15,6	15,6	15,4	15,3	15,2	15,4	0,18	
	0,15	10,1	10,1	10,1	10,3	10,5	10,2	0,18	
	0.09	3,1	3,1	3,2	3,4	3,5	3,3	0,18	
	0,04	0.9	1.0	1,1	1.0	0,9	1,0	0.08	
	0	0.5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0.05	
	0.5	15,2	15,2	15,1	15,3	15,2	15,2	0.07	
	0,35	14,6	14,7	14.8	14,7	14,7	14,7	0.07	
	0,23	14,4	14,3	14,0	14,0	14,3	14,2	0,19	
0,36	0,15	12,4	12,2	12,6	12,6	12,5	12,5	0,17	
	0.09	7,8	7,4	7,4	7,4	7,7	7,5	0,19	
	0.04	5,0	5,0	5,3	4,9	5,0	5,0	0,15	
	0	2,6	6,6	2,5	2,6	2,3	3,3	1,84	
	0,5	15.6	15.5	15.6	15,6	15.5	15.6	0,05	
	0.35	13,7	13,7	13,7	13,8	13.8	13,7	0,05	
	0,23	12,3	12,2	12,0	11,9	12,0	12,1	0,16	
0,60	0.15	11.0	10.9	10.9	11.0	11.1	11,0	0.08	
	0.09	9.0	9.0	9,2	9.0	8.9	9,0	0.11	
	0.04	7,2	7.5	7,4	7,4	7.3	7,4	0,11	
	0	5,0	5,0	5,1	5,2	5,3	5,1	0,13	
	0.5	14.2	14,1	14.2	14,2	14.2	14,2	0.04	
	0.35	12.2	12,1	12,1	12,1	12.2	12,1	0.05	
	0.23	10.6	10.7	10,7	10,9	10.9	10.8	0,13	
0,85	0.15	9,9	10.0	10.0	10,0	10.1	10.0	0.07	
	0.09	8,1	8,1	8.0	7.8	8.0	8,0	0,12	
	0.04	7.3	7.2	7,1	6.9	7.0	7,1	0.16	
	0	6,2	6,1	6,1	6,1	6.2	6,1	0.05	
	0,5	7,5	7,3	7,3	7.3	7,5	7,4	0,11	
	0.35	6,5	6,4	6,8	7.5	1.1	7.0	0.59	
1 10	0.23	6,9	7.0	6,9	6,8	6,7	6,9	0,11	
1,40	0.15	6.7	6.7	6,8	6,8	6.8	6,8	0.05	
	0.09	0.8	6,9	6,9	6,9	6.9	<u> </u>	0.04	
	0.04	7,1	7.0	7,4	7.3	7.1	7.2	0,16	
	0.5	7,2	7.3 5.4	5.5	5.4	7,1	55	0.09	
	0.3	5.0	5.4	5.5	5.4	5.0	5,5	0,10	
	0.33	5.0	5.0	63	<u> </u>	5.0	6.2	0.12	
2.04	0.25	6.5	6.6	6.6	6.6	6.7	6.6	0.07	
2.04	0.19	7.1	7.1	7.1	7.0	7.0	7 1	0.07	
	0.03	6.3	6.2	62	6.2	6.2	62	0.05	
	0.01	6.3	6.3	6.3	6.3	63	6.3	0,01	
	0.5	5.0	5.0	51	5.0	4.8	5.0	0.00	
	0.35	5.2	5.3	5.5	5.5	5.5	5.4	0.14	
	0.23	5.5	5.7	5.8	5.9	6.0	5.8	0.19	
2.72	0.15	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	0.00	
	0,09	6.1	6.0	6.0	6.2	6,2	6.1	0,10	
	0,04	6,2	6,1	6,1	6,1	6,2	6,1	0.05	
	0	6.0	6,1	6.1	6.0	5,9	6.0	0,08	
	0.5	6.0	5.9	5.9	5.8	5,8	5.9	0,08	
1	0.35	5,8	5,8	5,8	5,9	5,9	5,8	0,05	
1	0.23	6,0	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	0,09	
3,19	0,15	6,3	6,4	6,4	6,4	6,3	6,4	0,05	
1	0.09	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	0,00	
	0.04	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	0,00	
	0	6.0	6.0	6.1	6.0	6.0	6.0	0.04	

Pe	erfil de co	oncentração	o do CO no	etanol. S' =	= 1,315, tem	peratura de	e referência 1175	i°C, em ppm
x/D	y/D			Tomadas			média	desvio padrão
	0,5	21	16	19	16	13	17,0	3,08
0,15	0.35	37	32	35	29	27	32,0	4,12
	0,23	107	293	360	515	550	365,0	179,23
	0,15	12110	11770	11090	11000	10990	11.392,0	515,97
	0,09							
	0,04							
	0							
	0,5	0	0	0	0	0	-	0,00
	0.35	0	0	0	0	0	-	0.00
	0.23	145	123	112	109	120	121.8	14.17
0.36	0.15	1663	1338	1466	1242	1327	1.407.2	163.86
	0.09	14420	14650	14220	14320	14580	14,438,0	178.10
	0.04	28720	28720	29870	30650	30990	29.790.0	1057.80
	0						_00010	
	0.5	0	0	0	0	0	-	0.00
	0.35	0 0	Ň	Ň	ň	n N	-	0.00
	0.23	152	91	80	77	77	95.4	32 16
0.60	0.15	559	517	459	426	400	472.2	65.31
0,00	0,10	4221	4333	4453	3552	3315	3 97/ 8	507.86
	0.03	9558	10000	9768	9940	10080	9,887.2	225.65
	0.04	20510	20470	10680	10690	10270	10 022 0	545.04
	0.5	20310	20470	19000	19000	19270	19.922.0	045,04
	0.5	0	0	0	0	0		0
	0,00	0	0	0	0	0		0
0.85	0.25	0	0	0	0	0		0
0,00	0.15	0	0	0	0	0	_	0
	0.03	0	0	0	0	0		0
	0.04	0	0	0	0	0		0
	0.5	0	0	0	0	0	_	0
	0.35	0	0	0	0	0	_	0
	0.00	0	0	0	0	0	_	0
1 40	0.15	0	0	0	0	0	_	0
1,10	0.09	Ő	0	0	0	0	_	0
	0.04	Ő	Ő	Ő	0 0	0	_	0
	0.01	Ő	0	0	0	0	-	0
	0.5	Ő	Ő	Ő	Ő	0	-	0
	0.35	Ő	Ő	Ő	Ő	0	-	0
	0.23	Ő	Ő	Ő	Ő	0	-	0
2 04	0.15	õ	ñ	ñ	ň	ň	-	n n
_,0,	0.09	ñ	ň	ň	ñ	0 0	-	Ň Ň
	0.04	Õ	ñ	ñ	ñ	ñ	-	n n
	0	ñ	ň	ň	ñ	0 0	-	Ň Ň
	0.5	0 0	Ő	Ő	Ő	Ő	-	Ő
	0.35	0 0	0 0	0 0	0 0	Ő	-	0
	0.23	0 0	Ő	Ő	Ő	Ő	-	Ő
2.72	0.15	Ő	Ő	0 0	Ő	Ő	-	0 0
	0.09	Ő	Ō	Ō	Ō	Ő	-	Ő
	0.04	Ő	Ō	Ō	Ō	Ŏ	-	Ŏ
	0	0	Ō	Ō	Ō	Ō	-	0
	0.5	0	Ō	Ō	Ō	Ō	-	0
	0,35	0	0	0	0	0	-	0
	0,23	0	Ō	Ō	Ō	0	-	0
3,19	0,15	0	0	0	0	0	-	0
	0,09	0	0	0	0	0	-	0
	0,04	0	0	0	0	0	-	0
	0	0	0	0	0	0	-	0



Perfil de temperatura do Etanol S' = 1,315 tem. ref. 1175°C



Concentração de NOx do Etanol (ppm) S' = 1,351 temp de ref.1175 °C



Concentração de O2 (%) do Etanol S' = 1,351 temp. de ref. 1000°C



Concentração de CO (ppm) do Etanol S' = 1,315 temp.de ref. 1175°C



Concentração de NO_x e temperatura do Etanol S'=1,315 temp. ref. 1175ºC



Concentração NOx (ppm) e O2 (%) do Etanol S' = 1,315 temp.de ref. 1175 °C



Resultados do GLP à temperatura de referência 1000°C, rotação S' 0.684

Planilha para cálculo de tempo de residência para combustíveis não-nitrogenados e isentos de enxofre.

* considere cada molécula como um combustível diferente (mesmo não tendo carbono) ** mantenha pelo menos um valor diferente de 0 nos combustíveis não utilizados

<u>combustíveis + Ar = gases de queima</u> <u>comb1 + comb2 + comb3 + comb4 + Ar = CO2 + H2O + 3,76N2</u>

	combustível 1						
C	_	<u>4</u>					
H	_	<u>10</u>					
0	_	<u>0</u>					
	<u>nº moles</u>	<u>8,62069</u>					

combustível 2								
<u>C</u>	<u>3</u>							
<u>H</u>	<u>8</u>							
<u>o</u>	<u>0</u>							
<u>nº moles</u>	<u>11,36364</u>							

	combustível 3						
C	_	<u>0</u>					
H	_	<u>1</u>					
0	_	<u>0</u>					
	nº moles	0					

combustível 4							
<u>C</u>	_	<u>0</u>					
<u>H</u>	_	<u>1</u>					
<u>0</u>	_	<u>0</u>					
<u>nº moles</u> <u>0</u>							

combustível 1	_	=	<u>0,5</u>	%
combustível 2	_		<u>0,5</u>	%
combustível 3	_	Ш	<u>0</u>	<u>%</u>
combustível 4		Ш	0	%

ExAr	<u>1,67</u>	_
volume da câmara	<u>0,383</u>	<u>m3</u>
temperatura em C	<u>1000</u>	<u>°C</u>
temperatura em K	<u>1273,15</u>	<u>K</u>
pressão	<u>1</u>	<u>atm</u>
massa do combustível	<u>7,416</u>	<u>kg/h</u>
PCS	45932.9	ki/ka

relação ar/combustível estequiométrica* = <u>15,49241</u> :1

* proporção estequiométrica de ar /combustível em base de peso

massa total de ar necessária com excesso e	<u>de</u>	101 8602	Ka/h	
<u>ai</u>	<u> </u>	<u>191,0092</u>	<u>rtg/11</u>	
massa total de ar + combustível	<u> </u>	<u>199,2852</u>	<u>Kg/h</u>	
potência específica w=m.PCS/v	Ξ	<u>247,0542</u>	<u>W</u>	
tempo de residência	<u> </u>	<u>1,899138</u>	<u>m/s</u>	

Perfil de temperatura do GLP. S' = 0,684, temperatura de referência 1000°C											
<u>posição</u> <u>x/D</u>	<u>posição</u> <u>y/D</u>	número de amostras	<u>média</u>	<u>confiança</u> <u>-95%</u>	<u>confiança</u> <u>95%</u>	<u>mediana</u>	<u>mínimo</u>	<u>máximo</u>	variância	<u>desvio</u> padrão	<u>erro</u> padrão
	<u>0</u>	1204	<u>1201,4</u>	1200,6	1202,3	<u>1199,7</u>	1166,2	1265,2	231,18	15,20	0,44
	0,04	<u>1214</u>	<u>1196,8</u>	<u>1195,9</u>	<u>1197,7</u>	<u>1194,9</u>	<u>1160,7</u>	<u>1250,0</u>	250,99	<u>15,84</u>	0,45
	<u>0,09</u>	<u>1182</u>	<u>1207,5</u>	<u>1206,6</u>	<u>1208,4</u>	<u>1206,3</u>	<u>1168,0</u>	<u>1264,8</u>	237,35	<u>15,41</u>	<u>0,45</u>
<u>0,15</u>	<u>0,15</u>	<u>1175</u>	<u>1245,2</u>	<u>1244,0</u>	<u>1246,4</u>	<u>1245,0</u>	<u>1185,6</u>	<u>1313,8</u>	<u>422,18</u>	<u>20,55</u>	<u>0,60</u>
	0,23	<u>1210</u>	<u>1296,4</u>	<u>1295,5</u>	<u>1297,3</u>	<u>1296,5</u>	<u>1251,3</u>	<u>1354,7</u>	<u>274,48</u>	<u>16,57</u>	<u>0,48</u>
	<u>0,34</u>	<u>1200</u>	<u>1249,6</u>	<u>1248,7</u>	<u>1250,5</u>	<u>1249,7</u>	<u>1206,3</u>	<u>1299,0</u>	<u>245,29</u>	<u>15,66</u>	<u>0,45</u>
	<u>0,50</u>	<u>1204</u>	<u>1201,4</u>	<u>1200,6</u>	<u>1202,3</u>	<u>1199,7</u>	<u>1166,2</u>	<u>1265,2</u>	<u>231,18</u>	<u>15,20</u>	<u>0,44</u>
	<u>0</u>	<u>1242</u>	<u>1131,3</u>	<u>1130,9</u>	<u>1131,7</u>	<u>1131,1</u>	<u>1112,6</u>	<u>1151,2</u>	<u>41,70</u>	<u>6,46</u>	<u>0,18</u>
	<u>0,04</u>	<u>1209</u>	<u>1127,0</u>	<u>1126,6</u>	<u>1127,3</u>	<u>1126,9</u>	<u>1106,8</u>	<u>1149,6</u>	<u>36,08</u>	<u>6,01</u>	<u>0,17</u>
	<u>0,09</u>	<u>1063</u>	<u>1126,7</u>	<u>1126,3</u>	<u>1127,0</u>	<u>1126,7</u>	<u>1108,4</u>	<u>1145,8</u>	<u>38,67</u>	<u>6,22</u>	<u>0,19</u>
<u>0,36</u>	<u>0,15</u>	<u>1210</u>	<u>1124,5</u>	<u>1124,1</u>	<u>1124,9</u>	<u>1123,9</u>	<u>1103,0</u>	<u>1157,4</u>	<u>47,00</u>	<u>6,86</u>	<u>0,20</u>
	<u>0,23</u>	<u>1219</u>	<u>1131,0</u>	<u>1130,5</u>	<u>1131,6</u>	<u>1130,6</u>	<u>1106,1</u>	<u>1168,7</u>	<u>90,06</u>	<u>9,49</u>	0,27
	<u>0,34</u>	<u>1224</u>	<u>1155,7</u>	<u>1154,9</u>	<u>1156,5</u>	<u>1154,7</u>	<u>1114,5</u>	<u>1206,7</u>	200,50	<u>14,16</u>	<u>0,40</u>
	<u>0,50</u>	<u>1216</u>	<u>1135,2</u>	<u>1134,3</u>	<u>1136,1</u>	<u>1134,3</u>	<u>1093,9</u>	<u>1188,7</u>	<u>252,40</u>	<u>15,89</u>	0,46
	0	<u>1220</u>	<u>1124,8</u>	<u>1124,4</u>	<u>1125,2</u>	<u>1124,7</u>	<u>1103,5</u>	<u>1142,9</u>	44,13	<u>6,64</u>	0,19
	0,04	<u>1209</u>	<u>1116,4</u>	<u>1116,1</u>	<u>1116,8</u>	<u>1115,9</u>	<u>1099,0</u>	<u>1136,9</u>	<u>39,97</u>	<u>6,32</u>	0,18
0.0	0.09	<u>1217</u>	<u>1112,3</u>	<u>1112,0</u>	<u>1112,7</u>	<u>1112,4</u>	1094,2	<u>1129,5</u>	37,41	<u>6,12</u>	0,18
0,6	0,15	1206	<u>1106,1</u>	<u>1105,7</u>	<u>1106,4</u>	<u>1105,9</u>	1087,4	<u>1125,8</u>	37,66	<u>6,14</u>	0,18
	0,23	1205	1102,5	<u>1102,2</u>	<u>1102,9</u>	<u>1102,6</u>	1085,3	<u>1126,0</u>	<u>45,13</u>	<u>6,72</u>	0,19
	0,34	1205	<u>1106,7</u>	1106,1	<u>1107,2</u>	1106,6	10/9,1	<u>1146,3</u>	103,58	10,18	0,29
	0,50	<u>979</u>	11096,5	1101.0	1100.5	11095,5	1061,4	1141,6	164,41	12,82	0,41
	0	1208	1132,1	1131,8	1132,5	1110.0	1000.0	1159,3	46,76	<u>6,84</u>	0,20
	0,04	1005	1100.0	1100.0	1100.0	1100.0	1096,3	1134,3	45,36	<u>6,73</u>	0,20
0.95	0,09	1205	1002,9	1002,6	1002.2	1002,9	1075.1	<u>1100,4</u>	28,34	<u>5,32</u>	0,15
0,05	0,15	1202	1093,0	1092,7	1093,3	1093,0	1075,1	1109,5	28,89	<u>5,37</u>	0,10
	0.23	029	1079.7	1083,7	1070.0	1079.9	1065,4	1100,7	<u>35,77</u> 54.00	<u>5,98</u>	0.17
	0,34	<u>928</u>	1078,7	1078,2	1079,2	1078,8	000.6	1000.9	<u>34,02</u>	16.90	0,24
	0,50	1200	1111 /	1111.2	1111 7	<u>1031,9</u>	1006.0	1125.2	203,20	10,09	0,40
	0.04	1087	1108.5	1108.3	1108.8	1108.7	1090,0	1120,0	19.40	4,49	0.13
	0.04	1207	1100,5	1102.0	1103.0	1103.1	1094,0	1118.0	21.40	4,40	0.13
14	0.05	1207	1006.2	102,5	1096.5	1096.1	1090,5	1110.0	17.12	4,00	0.12
<u></u>	0.23	1205	1030,2	1083.7	1084.2	1083.9	1071.2	1097.8	21.58	4.65	0.12
	0.34	1214	1074.2	1073.9	<u>1074.4</u>	1074.2	1058.4	1086.6	22.64	4 76	0.14
	0.50	1209	1035.3	1034.8	<u>1074,4</u> 1035.7	1035.6	1001.8	1058.2	61.66	7.85	0.23
	0	1205	1110.6	1110.4	1110.8	1110.7	1101.4	1119.7	10.26	3.20	0.09
	0.04	1193	11110	1110.8	11112	11111	1098.2	1119.7	10.46	3.23	0.09
	0.09	1180	1112.2	1112.1	1112.4	1112.4	1102.9	1119.9	8.66	2.94	0.09
2,04	0.15	1207	1110.0	1109.9	1110.2	1110.3	1099.1	1117.7	10.13	3.18	0.09
	0.23	1210	1098.6	1098.4	1098.8	1098.5	1089.3	1107.3	10.44	3.23	0.09
	0,34	1209	1093.2	1093,0	1093,4	1093,2	1085,2	1101.8	11,41	3,38	0,10
	0,50	1213	1076,5	1076,2	1076,9	1077,3	1055,6	1091,7	31,95	5,65	0,16
	0	1208	1105,0	1104,9	1105,1	1105,0	1098,9	1109,9	3,21	1,79	0,05
	0,04	1205	1107,6	1107,5	1107,7	1107,6	1101,2	1113,2	3,28	1,81	0,05
	0,09	1205	1111,5	1111,4	<u>1111,6</u>	1111,5	1105,8	1117,8	2,96	1,72	0,05
<u>2,72</u>	0,15	<u>1211</u>	1110,1	<u>1110,0</u>	<u>1110,3</u>	<u>1110,1</u>	1102,5	1115,9	3,83	1,96	0,06
	0,23	<u>1207</u>	<u>1106,2</u>	<u>1106,1</u>	<u>1106,3</u>	<u>1106,3</u>	<u>1100,8</u>	<u>1111,6</u>	2,69	1,64	0,05
	0,34	1222	1110,5	<u>1110,4</u>	<u>1110,6</u>	1110,5	1105,3	1116,6	3,30	1,82	0,05
	0,50	1210	1087,8	1087,0	1088,6	1093,1	1048,7	1104,1	188,22	13,72	0,39
	0	1264	1097,6	1097,5	1097,7	1097,6	1091,6	1101,6	2,23	<u>1,49</u>	0,04
	0,04	1196	1098,1	1098,0	1098,2	1098,2	1093,7	1102,3	2,36	1,54	0,04
	0,09	1211	1099,0	1098,9	1099,1	1099,0	1094,1	1104,2	2,12	1,46	0,04
<u>3,19</u>	<u>0,15</u>	1229	1100,8	1100,7	1100,9	1100,8	1096,5	1104,6	<u>1,81</u>	1,34	0,04
	0,23	1212	1102,4	1102,3	1102,5	1102,3	1098,3	1106,9	<u>1,92</u>	1,39	0,04
	0,34	1205	1104,0	<u>1103,9</u>	<u>1104,0</u>	<u>1104,0</u>	1099,4	1108,3	1,74	1,32	0,04
	0,50	1221	1079,5	1079,1	1079,8	1080,0	1057,7	1091,4	31,28	5,59	0,16

Perfil de Concentração do NO _x no GLP. S' = 0,684, temperatura de referência 1000 °C, em ppm										
<u>x/D</u>	y/D		1	tomadas	6		<u>média</u>	desvio padrão		
	0,5	64	69	70	72	72	69,4	3,29		
	0.35	68	68	68	69	69	68,4	0.55		
0.15	0.23	84	88	89	89	90	88.0	2.35		
	0.15	88	89	90	91	91	89.8	1.30		
	0.09	80	82	83	83	82	82.0	1.22		
	0.04	79	79	80	80	80	79.6	0.55		
	0	79	80	81	81	81	80.4	0.89		
	0.5	80	82	81	82	82	81.4	0.89		
	0.35	84	85	88	87	87	86.2	1.64		
	0.23	80	81	81	82	82	81.2	0.84		
0.36	0.15	82	82	81	82	81	81.6	0.55		
-,	0.09	82	82	82	82	82	82.0	0.00		
	0.04	84	83	84	83	83	83.4	0.55		
	0	85	86	85	86	85	85.4	0.55		
	0.5	84	85	84	84	84	84.2	0.45		
	0.35	85	85	85	85	85	85.0	0.00		
	0.23	82	82	82	83	82	82.2	0.45		
0.60	0.15	81	80	80	80	80	80.2	0.45		
0,00	0.09	80	81	81	80	80	80.4	0.55		
	0.04	82	82	81	82	82	81.8	0.00		
	0.01	83	84	84	84	84	83.8	0.45		
	0.5	86	87	87	87	87	86.8	0.45		
	0.35	82	83	82	83	83	82.6	0.55		
	0.23	81	80	80	81	80	80.4	0.55		
0.85	0.15	80	79	79	79	80	79.4	0.55		
0,00	0.09	81	81	80	80	80	80.4	0.55		
	0.04	82	82	82	83	83	82.4	0,55		
	0.01	83	84	83	84	84	83.6	0.55		
	0.5	78	79	79	79	78	78.6	0.55		
	0.35	80	80	80	80	79	79.8	0.00		
	0.23	79	79	79	79	79	79.0	0.00		
1 40	0.15	79	79	79	80	80	79.4	0.55		
1,10	0.09	80	79	80	80	79	79.6	0.55		
	0.04	81	82	82	82	82	81.8	0.45		
	0	83	84	84	83	83	83.4	0.55		
	0.5	72	73	72	72	73	72.4	0.55		
	0.35	74	76	76	76	76	75.6	0.89		
	0.23	77	77	77	77	77	77.0	0.00		
2.04	0.15	78	79	79	78	79	78.6	0.55		
	0.09	80	80	80	80	80	80.0	0.00		
	0.04	81	81	81	82	81	81.2	0.45		
	0	82	83	84	85	85	83.8	1.30		
	0.5	91	91	92	91	92	91.4	0.55		
	0.35	93	94	93	94	94	93.6	0.55		
	0.23	94	93	93	94	94	93.6	0.55		
2.72	0.15	93	93	93	93	93	93.0	0.00		
<i>L</i> , <i>I L</i>	0.09	93	93	93	93	93	93.0	0,00		
	0.04	92	92	93	93	92	92.4	0.55		
	0	91	91	91	91	91	91.0	0.00		
	0.5	96	96	96	96	96	96.0	0.00		
	0.35	96	95	95	95	95	95.2	0.45		
	0.23	93	93	93	94	93	93.2	0.45		
3 19	0.15	92	93	92	92	93	92.4	0.55		
0,10	0.09	97	93	92	94	93	93.2	0.45		
	0.03	93	93	93	93	93	93.0	0,70		
	0	93	93	93	92	92	92.6	0.55		

Perfil de concentração do O ₂ no GLP. S' = 0,684, temperatura de referência 1000°C, em %										
<u>x/D</u>	<u>y/D</u>			tomadas			<u>média</u>	<u>desvio</u> padrão		
	0,5	11,2	10,7	10,4	10,2	10,1	10,5	0,444		
0,15	0.35	7,4	7,4	7,4	7,5	7,4	7,4	0.045		
	0.23	6.0	5,4	5.1	4.9	4.9	5.3	0.462		
	0.15	5.8	5.8	5.8	5.9	5.9	5.8	0.055		
	0.09	/.5	7.6	/./	7.8	7.9	/,/	0.158		
	0,04	8,9	9,0	8,9	8,8	8,9	8,9	0,071		
	0.5	9,7	9,7	9,0	9,5	9.7	9,0	0.069		
	0.3	81	82	8.1	8.2	8.4	8.2	0.233		
	0.00	10.3	10.4	10.3	10.1	10.1	10.2	0 134		
0.36	0.15	11.3	11.3	11.3	11.2	11.2	11.3	0.055		
	0.09	11.7	11.6	11.6	11.6	11.6	11.6	0.045		
	0,04	11.6	11,7	11.5	11.5	11,5	11,6	0.089		
	0	11,3	11,2	11,1	11,1	11,1	11,2	0,089		
	0.5	9,6	9,3	9,4	9,6	9,5	9.5	0.130		
	0,35	10,2	10,2	10,4	10,3	10,3	10,3	0,084		
	0.23	11.5	11.6	11,4	11.5	11.5	11.5	0.071		
0,60	0.15	12.0	12,1	12.0	12,1	11.9	12.0	0.084		
	0.09	12,1	12,1	12.0	12.0	12,1	12,1	0.055		
	0.04	11.9	11.8	11.8	11.7	11.7	11.8	0.084		
	0.5		10.0	11,5	11,3	0.0	0.0	0,164		
	0.5	9.0 10.9	11.1	9,9	9.9	9.9	9,9	0.071		
	0.00	12.0	11.1	11.2	11.2	11.2	11.1	0.130		
0.85	0.15	12.1	12.2	12.3	12.2	12.2	12.2	0.071		
0,00	0.09	12.1	12.0	12.0	12.0	12.1	12.0	0.055		
	0,04	11,8	11.8	11.8	11,8	11,7	11,8	0.045		
	0	11,4	11,4	11,5	11,4	11,5	11,4	0,055		
	0.5	12,5	12,4	12,3	12,4	12,5	12,4	0.084		
	0.35	12,1	12,1	12,1	12,1	12,2	12,1	0.045		
	0,23	12,3	12,3	12,2	12,3	12,4	12,3	0,071		
1,40	0.15	12,4	12,4	12,4	12,3	12,3	12,4	0.055		
	0.09	12,2	12,2	12,1	12,2	12,2	12,2	0.045		
	0.04	11.5	11,9	11,9	11,9	11.9	11.9	0,045		
	05	12.5	12.4	12.3	12.4	12.5	12.4	0.000		
	0.35	11 1	11 1	11 1	11 1	11.2	11 1	0.045		
	0.23	11.3	11.3	11.3	11.3	11.4	11.3	0.045		
2,04	0,15	11,4	11,4	11,4	11,4	11,3	11,4	0.045		
	0.09	11,2	11,2	11,3	11,3	11,2	11,2	0,055		
	0,04	11,0	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	0,045		
	0	10,5	10,5	10.5	10,6	10,6	10.5	0.055		
	0.5	11.3	11.1	11.0	10.8	10.8	11.0	0.212		
	0.35	10.5	10,4	10.5	10.5	10,4	10.5	0.055		
0.70	0.23	10.5	10.5	10,4	10.5	10.5	10.5	0.045		
2,12	0,15	10,5	10,5	10,5	10,0	10,6	10,5	0,055		
	0.09	10.7	10.7	10.7	10.7	10.0	10.7	0.045		
	0	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	0.000		
	0.5	10.3	10.4	10.4	10.4	10.3	10.4	0,055		
	0,35	10,3	10,3	10,3	10,5	10,4	10,4	0,089		
	0.23	10,6	10.6	10,6	10,6	10,6	10.6	0.000		
3,19	0.15	10.8	10,8	10.8	10.9	10,9	10.8	0.055		
	0.09	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	0.000		
	0.04	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7	0.000		
	0	10,7	10,7	10,8	10,8	10,8	10,8	0,055		

Perfil de concentração do CO no GLP. S' = 0,684, temperatura de referência 1000°C, em ppm										
<u>x/D</u>	<u>r (mm)</u>			<u>tomadas</u>			<u>media</u>	desvio padrão		
	0.5	2.905	2.899	2.979	3.345	3.291	3083.8	216.95		
	0,35	20.120	20.660	21.070	21.420	21.360	20926,0	541,65		
<u>0,15</u>	0,23	33.450	36.550	37.010	39.460	38.700	37034,0	2.331,36		
	0,15	32.270	32.440	32.480	33.240	33.990	32884,0	722,38		
	<u>0,09</u>	18.300	<u>18.470</u>	<u>18.380</u>	<u>18.220</u>	<u>18.350</u>	<u>18344,0</u>	92,90		
	<u>0,04</u>	<u>10.990</u>	<u>10.350</u>	<u>10.950</u>	<u>10.780</u>	<u>10.660</u>	<u>10746,0</u>	<u>258,13</u>		
	<u>0</u>	<u>5.503</u>	<u>5.501</u>	<u>5.501</u>	<u>5.499</u>	<u>5.820</u>	<u>5564,8</u>	<u>142,67</u>		
	<u>0,5</u>	<u>3.674</u>	<u>3.666</u>	<u>3.697</u>	<u>3.871</u>	<u>3.703</u>	<u>3722,2</u>	<u>84,60</u>		
	<u>0,35</u>	<u>4.916</u>	<u>4.712</u>	<u>4.261</u>	<u>4.658</u>	<u>5.253</u>	<u>4760,0</u>	<u>363,69</u>		
	<u>0,23</u>	<u>1.893</u>	<u>2.103</u>	<u>2.194</u>	<u>2.295</u>	<u>2.092</u>	<u>2115,4</u>	148,83		
<u>0,36</u>	<u>0,15</u>	<u>981</u>	<u>960</u>	<u>1.012</u>	837	962	<u>950,4</u>	<u>66,74</u>		
	<u>0,09</u>	<u>363</u>	<u>379</u>	<u>373</u>	<u>293</u>	272	<u>336,0</u>	49,73		
	<u>0,04</u>	<u>152</u>	<u>163</u>	213	<u>187</u>	<u>157</u>	<u>174,4</u>	<u>25,41</u>		
	0	123	<u>133</u>	<u>120</u>	80	88	<u>108,8</u>	23,32		
	0,5	<u>/68</u>	<u>698</u>	732	<u>768</u>	<u>970</u>	<u>/8/,2</u>	106,25		
	0,35	429	509	<u>501</u>	488	578	<u>501,0</u>	53,26		
0.60	0,23	<u> </u>	<u>224</u> 56	<u>221</u> 50	<u>181</u>	<u>155</u>	<u>195,6</u>	28,79		
0,60	0,15	<u>04</u> 20	<u>00</u>	<u>09</u>	01	09	01,0	<u>4,97</u>		
	0.09	<u>29</u> 13	<u>29</u> 13	16	<u>24</u> 11	<u>24</u> 11	<u>20,0</u> 12.8	2,01		
	0,04	13	<u>15</u> 8	<u>10</u> 8	8	<u> </u>	9.0	2.05		
	0.5	80	<u>0</u> 85	03	<u>0</u> 88	109	<u>9,0</u> 91.0	<u> </u>		
	0.35	40	32	27	43	<u> </u>	40.2	12.28		
	0.23	16	21	11	13	11	14.4	4 22		
0.85	0.15	5	5	3	3	5	42	1 10		
0,00	0.09	3	3	-	-	-	1.2	1.64		
	0.04	0	0	0	3	0	0.6	1.34		
	0	0	0	0	-	0	0.0	-		
	0.5	0	0	0	Ō	0	0	Ō		
	0,35	0	0	0	0	0	0	0		
	0,23	0	0	0	0	0	0	0		
<u>1,40</u>	<u>0,15</u>	<u>0</u>	0	0	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>		
	<u>0,09</u>	<u>0</u>	0	0	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>		
	<u>0,04</u>	<u>0</u>	0	0	<u>0</u>	0	<u>0</u>	<u>0</u>		
	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>		
	<u>0,5</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>		
	<u>0,35</u>	<u>0</u>	0	<u>0</u>	<u>0</u>	0	<u>0</u>	<u>0</u>		
	<u>0,23</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	0	<u>0</u>	<u>0</u>	0	0		
<u>2,04</u>	0,15	0	0	0	0	0	0	0		
	0,09	0	0	0	0	0	0	0		
	0,04	0	0	0	0	0	0	<u> </u>		
		0	0	0	0	0	0	0		
	0.25	0	0	0	0	0	0			
	0.33	0	0	0	0	0	0	0		
2 72	0.15	0	0	0	0	0	0	0		
<u> </u>	0.09	0	0	0	0	0	0	0		
	0.04	0	0	0	0	0	0	0		
	0	0	Ő	0	0	0	0	<u> </u>		
	0.5	<u> </u>	Ō	Ō	Ō	Ŏ	0	Ō		
	0.35	0	0	Ō	<u>0</u>	0	0	Ō		
	<u>0,2</u> 3	0	0	0	0	0	0	0		
3,19	0,15	0	0	0	0	0	0	0		
	0,09	0	0	0	0	0	0	0		
	0,04	0	0	0	0	0	<u>0</u>	0		
	0	<u>0</u>	0	0	0	<u>0</u>	0	0		







Concentração de NOx (ppm) de GLP S' = 0,684 temp.de ref. 1000°C


Concentração de O2 (%) do GLP S' = 0,684 temp. ref. 1000°C



Perfil de CO (ppm) do GLP S' = 0,684 temp. de ref. 1000°C



Temperatura (°C) por concentração de NOx (ppm) do GLP S' =0,684 temp. ref. 1000°C



Concentrações de NOx (ppm) por O2 (%) do GLP S' = 0,684 temp. ref. 1000°C







Resultados do GLP à temperatura de referência 1000°C, rotação S' 1,315

Planilha para cálculo de tempo de residência para combustíveis não-nitrogenados e isentos de enxofre.

* considere cada molécula como um combustível diferente (mesmo não tendo carbono) ** mantenha pelo menos um valor diferente de 0 nos combustíveis não utilizados

combustive is + Ar = gases de queimacomb1 + comb2 + comb3 + comb4 + Ar = CO2 + H2O + 3,76N2

	combustível 1		
<u>C</u>	_	<u>4</u>	<u>C</u>
H	_	<u>10</u>	ŀ
0	_	<u>0</u>	<u>C</u>
	<u>nº moles</u>	<u>8,62069</u>	

combustível 2							
<u>C</u>	_	<u>3</u>					
H	_	8					
<u>0</u>	_	<u>0</u>					
n	<u>11,36364</u>						

combustível 3			combustível 4		
<u>C</u>	_	<u>0</u>	C	_	<u>0</u>
Η	_	<u>1</u>	<u>H</u>	_	<u>1</u>
0	_	<u>0</u>	<u>0</u>	_	<u>0</u>
	<u>nº moles</u>	<u>0</u>	<u>nº</u>	<u>moles</u>	<u>0</u>

combustível 1	_	=	<u>0,5</u>	<u>%</u>
combustível 2	_	Ξ	<u>0,5</u>	<u>%</u>
combustível 3	_	III	<u>0</u>	<u>%</u>
combustível 4	_	Ш	<u>0</u>	%

ExAr	<u>1,72</u>	_
volume da câmara	<u>0,383</u>	<u>m3</u>
temperatura em C	<u>1000</u>	°C
temperatura em K	<u>1273,15</u>	<u>K</u>
pressão	<u>1</u>	<u>atm</u>
massa do combustível	<u>7,21</u>	<u>kg/h</u>
PCS	45932,9	<u>kj/kg</u>

relação ar/combustível estequiométrica*=15,49:1* proporção estequiométrica de ar /combustível em base de peso

massa total de ar necessária com e ar	<u>ccesso de</u> <u>=</u>	<u>192,12</u>	<u>Kg/h</u>
massa total de ar + combustível	_ <u>=</u>	<u>199,33</u>	<u>Kg/h</u>
potência específica w=m.F	<u>CS/v</u> <u>=</u>	<u>240,19</u>	W
tempo de residência	<u>=</u>	<u>1,90</u>	<u>m/s</u>

	P	erfil de ter	nperatu	ra do GLP.	<u>S' = 1,315,</u>	temperat	ura de re	ferência	<u>1000°C</u>		
<u>posição</u> <u>x/D</u>	<u>posição</u> <u>y/D</u>	<u>número</u> <u>de</u> amostras	<u>média</u>	<u>confiança</u> <u>-95%</u>	<u>confiança</u> <u>95%</u>	<u>mediana</u>	<u>mínimo</u>	<u>máximo</u>	<u>variância</u>	<u>desvio</u> padrão	<u>erro</u> padrão
	0	1175	1149,2	1148,9	1149,6	1148,9	1131,8	1173,4	36,15	6,01	0,18
	0.04	1214	1135.9	1135.6	1136,2	1135.8	1120,4	1155.9	27,39	5.23	0.15
0.45	0,09	1077	1137,3	1137,1	1137,6	1137,2	1124,0	1159,8	21,51	4,64	0,14
<u>0,15</u>	0,15	1254	1133,2	1133,0	1133,5	1133,0	1118,6	1149,3	22,53	4,75	0,13
	0.23	1209	1126.6	1126.3	1126.9	1126.5	1112.8	1156.1	28.79	5.37	0.15
	0,34	933	1130,7	1130,2	1131,2	1130,1	1109,7	11/2,2	69,68	8,35	0,27
	0,50	1211	1132,9	1132,1	1133,8	1132,0	1096,6	1182,8	229,49	15,15	0,44
	0	1323	1146.3	1146.0	1146,6	1146,4	1128,2	1156.0	32,21	5.68	0.16
	0,04	1200	1124 7	1124.5	1125.0	112/ 0	1127,1	11/00,2	24,43	4,94	0,10
0.36	0,09	1209	1109.2	1129.0	1129.5	1109/	1111/6	1140,4	19.00	4,33	0,12
<u>0,00</u>	0.15	12/1	1120.3	1120.0	1120.5	1120,4	1110.3	11/10 7	40.71	6.38	0.12
	0.34	1210	11187	1118.1	1119.2	1119.0	1088.8	1148.5	101.89	10.09	0,10
	0.50	1224	1071 2	1070.5	1071.9	1070.5	1042.3	1126.7	149 51	12 23	0.35
	0.00	1209	1155.6	1155.2	1155.9	1155.8	1139.8	1171.6	31.50	5.61	0.16
	0.04	1207	1153.0	1152.7	1153.3	1152.9	1139.8	1170.6	27.69	5.26	0.15
	0.09	1205	1148.6	1148,3	1148,8	1148,4	1137.5	1163.3	18,80	4,34	0.12
0,6	0,15	1208	1140,0	1139,8	1140,3	1140,0	1128,4	1153,9	20,28	4,50	0,13
	0,23	1207	1125,5	1125,3	1125,8	1125,6	1109,6	1139,4	24,84	4,98	0,14
	0,34	1236	1108.6	1108,2	1109,0	1107.6	1088.3	1133.0	53,33	7,30	0.21
	0,50	1217	1051,3	1050,7	1051,8	1051,1	1024,0	1085,9	99,84	9,99	0,29
	0	1204	1154.3	1153.9	1154.6	1155.2	1134.8	1168.9	33.65	5.80	0,17
	0.04	890	1152.3	1152,1	1152.5	1152,2	1140,9	1163.3	13,40	3,66	0,12
	0,09	865	1154,2	1153,9	1154,4	1154,3	1138,5	1167,5	17,76	4,21	0,14
<u>0,85</u>	0.15	1073	1146.6	1146.3	1147.0	1146.2	1131.8	1163.7	34,96	5.91	0,18
	0.23	1208	1133.5	1133.2	1133.8	1133.0	1116.8	1151.1	32.50	5.70	0.16
	0,34	1202	1113,1	1112,8	1113,4	1113,5	1093,6	1127,3	30,24	5,50	0,16
	0.50	855	1066.5	1065.7	1067.3	1068.0	1027.2	1088.6	149,78	12,24	0,42
	0	1204	1140,4	1140.3	1140.6	1140.6	1133.1	1148.1	6.31	2,51	0.07
	0,04	1119	1142,0	1142,4	1142,7	1142,4	1134,9	1150,4	10.22	2,47	0,07
11	0.09	1006	1144,1	1143,9	1144.3	1143,9	11212	1155.2	21 40	3.21	0.10
<u>1, 1</u>	0,15	1220	1136.0	1136.6	1127.2	1135.3	1126.2	1153.0	21,40	5 80	0,13
	0,20	1200	1126.9	1126.3	1127.5	1107.0	1086 /	11/0 0	126 55	11 25	0,17
	0.54	989	1082.6	1081.9	1083.2	1082.4	1052.5	1111 5	113.06	10.63	0.34
	0,00	859	1125.2	1125.1	1125.4	1125.2	1120.2	1129.8	3.58	1 89	0.06
	0.04	1213	1125 1	1125.0	1125.1	1125.0	1119.9	1130.9	2 81	1 68	0.05
	0.09	1203	1126.0	1125.9	1126.1	1125.8	1122.0	1131.5	2.79	1.67	0.05
2,04	0,15	939	1128,2	1128,0	1128,3	1128,1	1123.2	1133.6	4,41	2,10	0.07
	0,23	1298	1130,1	1130,0	1130,2	1130,0	1125,2	1136,1	3,00	1,73	0,05
	0,34	1209	1134,4	1134,1	1134,6	1134,0	1125,8	1148,2	14,79	3,85	0,11
	0,50	1201	1102,3	1101,4	1103,3	1100,4	1048,2	1134,4	281,28	16,77	0,48
	0	936	1116.8	1116.6	1117.0	1118,1	1108,9	1122,7	9.81	3,13	0,10
	0,04	1213	1111,9	1111,7	1112,1	1110,1	1106,3	1121,5	15,78	3,97	0,11
0.70	0,09	859	1111,2	1111,1	1111,3	1111,1	1108,0	1115,7	1,76	1,33	0,05
2,72	0.15	1212	1112,1	1112.0	1112,2	1112.0	1108.7	1116.4	1.54	1,24	0.04
	0,23	830	1109,2	1109,1	1109,2	1109,2	1106,2	1112,3	1,16	1,08	0,04
	0,34	1243	1106,6	1106,5	1106,7	1106,6	1102,8	1110,5	1,52	1,23	0,04
	0,50	1208	11100	1110.0	1110.4	11100	1100 1	11155	19,06	4,3/	0,13
	0.04	1211	1112,3	1112,3	1112,4	1112,3	11109,1	11171	1.12	1,00	0,03
	0,04	702	11120	1110,4	11120	1110,0	1110,3	11170	1 /6	1.03	0.03
3 19	0.09	1208	1112/	1112.0	1112.5	1112.0	11006	1117.3	1 51	1.21	0.04
<u>, , , , , , , , , , , , , , , , , , , </u>	0,10	1200	1111 2	1111 1	1111 2	1111 2	1108.0	1116.0	1 32	1 1 5	0.04
	0.34	1207	1101 4	1101 2	1101 6	1101 8	1093.2	1106.9	8 90	2 98	0,00
	0,50	1220	1058.0	1057,6	1058,3	1058,4	1033,2	1071,4	37,27	6,11	0,17

Perfil de concentração do NO _x no GLP. S' = 1,315, temperatura de referência 1000 °C, em ppm								
<u>x/D</u>	<u>y/D</u>		-	Tomadas	S		<u>média</u>	desvio padrão
	0,5	44	44	45	45	45	44,6	0,548
	0.35	47	47	47	48	48	47,4	0,548
	0,23	47	47	48	47	47	47,2	0,447
0,15	0,15	48	48	48	48	47	47.8	0,447
	0.09	49	49	49	48	49	48.8	0,447
	0,04	48	49	49	49	49	48,8	0,447
	0	50	51	51	51	52	51.0	0,707
	0.5	35	35	36	37	36	35,8	0,837
	0.35	47	48	47	46	48	47,2	0.837
	0.23	48	48	49	48	48	48.2	0,447
0.36	0.15	49	50	50	50	50	49.8	0,447
	0.09	50	50	51	50	50	50.2	0,447
	0,04	51	51	51	51	51	51,0	0,000
	0	53	52	53	53	53	52.8	0,447
	0.5	3/	37	38	37	38	37,4	0.548
	0.35	40	47	40	47	47	40,0	0,040
0.60	0.23	<u>49</u> 51	<u>49</u> 51	49 51	<u>49</u> 51	49 52	49,0	0,000
0,00	0,15	52	52	52	52	52	52.0	0,447
	0.03	54	54	54	54	54	54.0	0,000
	0.04	54	54	54	54	54	54.0	0,000
	0.5	45	44	45	46	47	45.4	1 140
	0.35	50	52	52	51	51	51.2	0.837
	0.23	49	48	49	48	48	48.4	0.548
0.85	0.15	62	61	62	62	61	61.6	0.548
	0.09	62	62	62	62	62	62.0	0.000
	0,04	60	60	61	61	61	60.6	0,548
	0	60	60	61	61	60	60,4	0,548
	0,5	53	53	54	54	53	53,4	0,548
	0.35	54	54	54	54	55	54,2	0,447
	0.23	59	60	60	60	60	59,8	0,447
1,40	0,15	54	54	54	54	53	53.8	0,447
	0,09	54	54	55	55	55	54,6	0,548
	0.04	57	57	57	57	57	57.0	0,000
	0	57	58	58	57	57	57,4	0,548
	0.5	53	52	53	53	53	52.8	0.447
	0.35	59	59	59	59	58	58.8	0,447
0.04	0.23	59	60	60	61	58	59.6	1,140
2,04	0,15	57	58	58	5/	5/	57,4	0.548
	0.09	50	57	57	50	- <u>- 20</u>	57,0	0,540
	0.04	59	59	50	50	50	59.0	0,040
	0.5	18	18	18	10	10	19.0	0.000
	0.35	54	40 5/	40 5/	49 54	49 54	<u>40,4</u> 54.0	0,040
	0.33	55	55	55	56	56	55.4	0.548
2,72	0.15	60	60	61	60	61	60.4	0,548
	0.09	61	62	62	62	62	61.8	0,340
	0.04	63	63	63	63	62	62.8	0.447
	0	61	60	61	61	61	60.8	0.447
	0.5	54	54	54	54	55	54.2	0,447
	0.35	59	59	60	60	60	59.6	0,548
	0.23	62	62	63	62	63	62,4	0,548
3,19	0.15	65	64	64	63	63	63.8	0,837
	0.09	62	61	61	61	59	60,8	1,095
	0,04	59	59	59	58	58	58,6	0,548
	0	57	56	56	56	57	56.4	0.548

Peri		entração (,315, tem	peratura (
X/D	V/D	10.7	107	tomadas	107	10.0		desvio padrao
	0.5	10.7	10,7	10.6	10.7	10.6	10,7	0,055
	0.35	11.1	11.2	11.1	11.1	11.1	11,1	0.045
o / -	0.23	11.4	11,4	11.5	11.5	11,4	11,4	0.055
0.15	0.15	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	0.000
	0.09	11.2	11.2	11.2	11.2	11.2	11.2	0.000
	0.04	11.1	11.0	11.0	11.0	11.0	11,0	0,045
	0	10.8	10.7	10,7	10,6	10.6	10,7	0.084
	0.5	13.5	13.6	13.3	13.0	13,4	13,4	0.230
	0.35	11.3	11,4	11.6	11.6	11.3	11,4	0.152
	0,23	11.6	11.5	11.5	11.5	11,4	11.5	0.071
0,36	0.15	11.5	11.5	11.5	11,4	11,4	11,5	0,055
	0.09	11.4	11,4	11.4	11,3	11.3	11,4	0.055
	0.04	11.3	11.3	11.3	11.3	11.2	11.3	0.045
	0	11,1	10.9	11.0	11,0	10.9	11.0	0.084
	0.5	13,7	13.6	13.6	13,7	13.7	13,7	0.055
	0,35	12,3	12,3	12,3	12,3	12,4	12,3	0,045
	0,23	11,9	11,9	11.8	11,8	11,8	11,8	0,055
0,60	0,15	11,5	11,4	11.3	11,4	11,4	11,4	0,071
	0,09	11,3	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	0,045
	0,04	11,3	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	0,045
	0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	0,000
	0.5	12,6	12,8	12,7	12,7	12,6	12,7	0.084
	0.35	12,0	12,0	11,9	12,1	12,0	12,0	0,071
	0.23	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	0.000
0.85	0,15	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	0.000
-	0.09	10.6	10.7	10.7	10.6	10.7	10.7	0.055
	0.04	10.3	10.5	10.3	10.3	10.4	10.4	0.089
	0	10.0	10.0	10.1	10.1	10.0	10.0	0.055
	0.5	11.0	11.0	11.0	11.0	11.2	11.0	0.089
	0.35	11.2	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	0.089
	0.23	11.2	11.2	11.2	11.3	11.3	11.2	0.055
1.40	0.15	11.4	11.3	11.2	11.2	11.2	11.3	0.089
.,	0.09	11.1	11.0	11.1	11.0	11.0	11.0	0.055
	0.04	10.7	10.7	10.7	10.8	10.7	10.7	0.045
	0	10.6	10.7	10.6	10.7	10.6	10.6	0.055
	0.5	11 7	11.5	11.5	11.5	11.6	11.6	0.089
	0.35	10.6	10.6	10.6	10.7	10.6	10.6	0.045
	0.23	10.6	10.6	10.6	10,7	10.6	10.6	0.045
2 04	0.15	10.6	10.6	10.7	10,7	10.6	10,0	0.055
2,01	0.09	10.0	10.0	10.7	10.7	10.0	10.0	0.055
	0.04	10.0	10.0	10.7	10.6	10.6	10.7	0.055
	0,04	10.0	10.7	10.7	10.0	10.0	10.6	0.000
	0.5	11.0	11.8	11.0	11.8	11.7	11.8	0.000
	0.35	11,0	10.9	10.8	10.8	10.8	10.9	0,004
	0.33	10.7	10.5	10.0	10.0	10.8	10.5	0.003
0.70	0.25	10.7	10.7	10.7	10.5	10.6	10.7	0.055
2,12	0,15	10.5	10.0	10.0	10.5	10.0	10.0	0,000
	0.09	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.0	0,000
	0,04	10,5	10,0	10,5	10,5	10,4	10,5	0,071
	05	11.5	10,5	11.0	11.0	10.0	11.0	0,000
	0.5	11.5	11,4	11.3	10.0	11.3	107	0,089
	0.35	10.8	10.7	10./	10.6	10.6	10.7	0.084
0.40	0,23	10.5	10,4	10.5	10.5	10.5	10.5	0.045
3.19	0,15	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	0.000
	0.09	10.5	10.5	10.5	10.5	10.6	10.5	0.045
	0,04	10.5	10.5	10.5	10.6	10.6	10,5	0,055
	1 0	107	107	107	107	107	10.7	0.000

Perfil de concentração do CO no GLP. S' = 1,315, temperatura de referência 1000°C, em ppm								
<u>x/D</u>	<u>y/D</u>			tomadas			<u>média</u>	desvio padrão
	0.5	320	285	280	264	234	276,6	31,4
	0.35	177	140	172	132	226	169,4	37,2
	0,23	40	35	30	32	24	32,2	5,9
0,15	0,15	13	11	11	11	8	10,8	1,8
	0.09	5	3	0	0	0	1,6	2.3
	0.04	0	0	0	0	0	0,0	0,0
	0	0	0	0	0	0	0,0	0.0
	0.5	0	0	0	0	0	0.0	0.0
	0.35	13	8	5	0	11	7,4	5.1
0.00	0.23	0	0	0	0	0	0.0	0.0
0,36	0.15	0	0	0	0	0	0,0	0,0
	0.09	0	0	0	0	0	0,0	0.0
	0.04	0	0	0	0	0	0.0	0.0
		0	0	0	0	0	0.0	0.0
	0.3	0	0	0	0	0	0,0	0.0
	0.33	0	0	0	0	0	0,0	0,0
0.60	0.23	0	0	0	0	0	0.0	0.0
0,00	0,15	0	0	0	0	0	0.0	0.0
	0.03	0	0	0	0	0	0.0	0.0
	0.04	Ő	0	0	0	0	0.0	0.0
	0.5	Ő	0	0	0	Ő	0,0	0,0
	0.35	Ő	Ő	0	Ő	Ő	0.0	0.0
	0.23	Ő	Ő	Ő	Ő	0	0.0	0.0
0.85	0.15	Ő	Ő	Ő	Ő	0	0.0	0.0
	0.09	0	0	0	0	0	0.0	0.0
	0,04	0	0	0	0	0	0.0	0.0
	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0
	0,5	0	0	0	0	0	0,0	0,0
	0,35	0	0	0	0	0	0,0	0,0
	0,23	0	0	0	0	0	0,0	0,0
1,40	0.15	0	0	0	0	0	0.0	0.0
	0.09	0	0	0	0	0	0,0	0,0
	0.04	0	0	0	0	0	0,0	0.0
	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0
	0.5	0	0	0	0	0	0.0	0.0
	0.35	0	0	0	0	0	0.0	0.0
0.04	0.23	0	0	0	0	0	0,0	0,0
2,04	0.15	0	0	0	0	0	0,0	0.0
	0.09	0	0	0	0	0	0.0	0.0
	0.04	0	0	0	0	0	0.0	0.0
	0.5	0	0	0	0	0	0,0	0.0
	0.5	0	0	0	0	0	0,0	0,0
	0.33	0	0	0	0	0	0.0	0.0
2 72	0.25	0	0	0	0	0	0.0	0.0
2,72	0.19	0	0	0	0	0	0.0	0.0
	0.04	ñ	ñ	0 0	ñ	0 0	0.0	0.0
	0	ñ	ñ	Ň	ñ	Ő	0,0	0,0
	0.5	Ő	ŏ	Ő	ŏ	Ő	0.0	0.0
	0.35	Ő	Ő	Ő	Ő	0 0	0.0	0.0
	0,23	Ŏ	Ŏ	Ő	Ŏ	Ő	0.0	0.0
3,19	0,15	Ő	0	0	0	0	0.0	0.0
	0.09	0	0	0	0	0	0.0	0.0
	0,04	Ő	0	0	0	Ő	0.0	0.0
	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0



Perfis de Temperatura do GLP S' = 1,315 temp. de ref. 1000°C



Concentração de NOx (ppm) de GLP S' = 1,315 temp. ref. 1000 °C



Concentração do O2 (%) do GLP S' = 1,315 temp. ref. 1000°C



Concentração de CO (ppm) do GLP S' = 1,351 temp. ref. 1000°C



Temperatura (°C) e Concentração de NOx do GLP (ppm) S' = 1,315 temp. ref. 1000°C



Concentrações de NOx (ppm) e O2 (%) do GLP S' = 1,315 temp. ref. 1000°C



Perfil de NOx (ppm) do GLP S' = 1,315 temp. ref. 1000°C interv. 2 (ppm) 0.50 56 56 46 56 56 \diamond 50 60 ŝ 56 0.00 $\left[\right]$ ģ 56 50 60 56 \diamond 56 ୕ୖୄ୕ୖ୕ୖ 56 46 56 -0.50 0.50 1.00 1.50 2.00 2.50 3.00 x/D



177

Resultados do GLP à temperatura de referência 1175C, rotação S' 0,684

Planilha para cálculo de tempo de residência para combustíveis não-nitrogenados e isentos de enxofre.

<u>* considere cada molécula como um combustível diferente (mesmo não tendo carbono)</u> <u>** mantenha pelo menos um valor diferente de 0 nos combustíveis não utilizados</u>

<u>combustíveis + Ar = gases de queima</u> comb1 + comb2 + comb3 + comb4 + Ar = CO2 + H2O

 $\underline{comb1 + comb2 + comb3 + comb4 + Ar = CO2 + H2O + 3,76N2}$

	combustível 1						
<u>C</u>	_	<u>4</u>					
H	_	<u>10</u>					
0	_	0					
	<u>nº moles</u> <u>8,62069</u>						

combustível 2								
<u>C</u>	_	<u>3</u>						
<u>H</u>	_	<u>8</u>						
<u>0</u>	_	<u>0</u>						
<u>n</u> º	<u>11,36364</u>							

combustível 3							
C	_	<u>0</u>					
Ξ	_	<u>1</u>					
0	_	<u>0</u>					
	<u>nº moles</u> <u>0</u>						

combustível 4								
<u>C</u>	_	<u>0</u>						
<u>H</u>	_	<u>1</u>						
<u>0</u>	_	<u>0</u>						
<u>n</u>	<u>0</u>							

combustível 1	_		<u>0,5</u>	%
combustível 2	_	III	<u>0,5</u>	<u>%</u>
combustível 3	_	III	<u>0</u>	<u>%</u>
combustível 4	_		<u>0</u>	<u>%</u>

ExAr	<u>1,186</u>	_
volume da câmara	<u>0,383</u>	<u>m3</u>
temperatura em C	<u>1175</u>	<u>°C</u>
temperatura em K	<u>1448,15</u>	<u>K</u>
pressão	<u>1</u>	<u>atm</u>
massa do combustível	<u>8,24</u>	<u>kg/h</u>
PCS	45932,9	kj/kg

relação ar/combustível estequiométrica*	Ξ	<u>15,49</u>	<u>:1</u>	
* proporção esteguiométrica de ar /combustível er	n hase de neso			

massa total de ar neces ar	sária com excesso de	<u>=</u>	<u>151,40</u>	<u>Kg/h</u>	
massa total de ar + com	bustível	=	159.64	Ka/h	
			<u>100,01</u>	<u></u>	
potência específica	w=m.PCS/v	=	<u>274,50</u>	<u>W</u>	
tempo de residência		<u>=</u>	<u>2,10</u>	<u>m/s</u>	

	Perfil de	e tempe	ratura do	<u>GLP. S' =</u>	0,684 tem	nperatui	ra de ref	erência 1	175°C	
nosioão	número		confiance	confignes					desvic	orro
	de	<u>média</u>	_95%	95%	<u>mediana</u>	<u>mínimo</u>	<u>máximo</u>	<u>variância</u>	nadrão	nadrão
<u>y/D</u>	<u>amostras</u>		-90%	35 /0					paurau	paurao
0	1280	1328.3	1328.2	1328.4	1328.4	1323.7	1332.2	3.4	1.84	0.05
0,04	1240	1337,1	1337,0	1337,1	1337,2	1334,1	1339,8	1,0	1,02	0,03
0,09	1214	1326,8	1325,6	1327,9	1335,1	1248,5	1347,8	420,8	20,51	0,59
0,15	1242	1391,5	1390,7	1392,2	1391,8	1344,8	1432,3	185,5	13,62	0,39
0,23	1206	1204,8	1203,5	1206,1	1204,2	1129,2	1281,1	550,2	23,46	0,68
0,34	1205	1106 5	1105.2	1107.9	120,7	1120 5	1250.0	212,5	14,58	0,42
0,50	1207	1440.0	1195,2	1197,0	1440.4	129,5	1476 1	<u> </u>	10.04	0,00
0.04	1204	1442.0	1441.4	1442.7	1442.4	1/1097.0	14/0.1	171.5	13.10	0.35
0.09	893	1445.4	1444.5	1446.4	1446.4	1402.1	1482.9	202.1	14 22	0.48
0.15	1244	1453.9	1452.9	1454.9	1453.9	1403.1	1500.7	301.2	17.35	0.49
0.23	1233	1440,4	1439.6	1441.3	1440,7	1397.8	1478.3	218,9	14,79	0,42
0,34	1292	1373,2	1372,3	1374,2	1372,5	1329,0	1418,1	278,4	16,68	0,46
0,50	809	1264,4	1263,2	1265,7	1263,2	1215,8	1313,5	309,7	17,60	0,62
0	1225	1365.5	1364.8	1366.2	1365.8	1322.0	1400.5	146.9	12.12	0.35
0,04	1204	1373,1	1372,6	1373,6	1372,5	1352,3	1413,5	89,1	9,44	0,27
0,09	1205	1369,3	1368,8	1369,8	1368,6	1336,4	1416,7	81,5	9,03	0,26
0,15	789	1360,3	1359,8	1360,9	1360,3	1335,1	1402,3	62,1	7,88	0,28
0,23	1204	1353,4	1352,9	1353,9	1352,6	1328,5	1393,8	82,8	9,10	0,26
0,34	1242	1351,7	1351,1	1352,4	1351,0	1317,9	1391,6	144,3	12,01	0,34
0,50	1366	1005.0	1309,1	1310,8	1310,1	1203,2	1410.4	239,0	15,40	0,42
0.04	11204	1279.1	1385.5	1380.4	1385.6	12576	1412.4	45.5	6.75	0.23
0,04	123	1370,1	1331.8	1370,5	1331.8	1328.5	1335 3	45,5	1 14	0.20
0.05	1201	1357.7	1357.3	1358.0	1357.5	1340.1	1378.0	39.4	6.28	0.18
0.23	1220	1334.8	1334.7	1334.8	1334.8	1331.9	1338.9	1.0	0.99	0.03
0,34	1208	1324.3	1323.8	1324,9	1324,2	1295.9	1355.9	89,1	9,44	0.27
0,50	1209	1286,7	1286,1	1287,3	1286,5	1256,1	1327,1	116,0	10,77	0,31
0	1224	1356.3	1356.0	1356.6	1356.2	1340.3	1373.9	24.2	4.92	0.14
0,04	1200	1353,6	1353,4	1353,8	1353,7	1339,6	1369,4	16,2	4,02	0,12
0,09	1210	1350,8	1350,5	1351,1	1350,8	1334,7	1365,7	23,7	4,87	0,14
0,15	1222	1342,3	1342,0	1342,6	1342,0	1326,8	1362,1	24,7	4,97	0,14
0,23	1205	1328,8	1328,5	1329,1	1329,0	1314,2	1343,2	25,2	5,02	0,14
0,34	1209	10077	1000 0	1000 0	1011.0	1169.0	10724	31,1	2,28	0,16
0,50	1247	1257,7	1255.6	1256.0	1241,0	1246.9	12/3,4	300,7	2.05	0,04
0.04	1205	1352.0	1351.9	1352.4	1352.2	1340.0	1365.5	9.5	3.82	0.09
0.09	1205	1340.5	1340.2	1340.7	1340.9	1328.6	1351.3	19.7	4.44	0.13
0,15	1218	1333,4	1333.2	1333.6	1333,4	1323.0	1343.6	10,4	3.23	0.09
0,23	1200	1336,3	1336,1	1336,5	1336,5	1319,3	1349,1	15,8	3,98	0,11
0,34	1433	1331,6	1331,5	1331,8	1331,7	1322,6	1340,2	8,0	2,82	0,07
0,50	1039	1301,4	1300,4	1302,4	1306,6	1246,9	1326,6	281,6	16,78	0,52
0	1201	1334.8	1334.7	1334.9	1334.8	1328.8	1339.9	2.7	1.66	0.05
0,04	1088	1333,1	1333,0	1333,2	1333,2	1326,5	1339,2	5,0	2,24	0,07
0,09	1200	1328,4	1328,2	1328,6	1329,3	1318,3	1336,0	14,0	3,74	0,11
0,15	1206	1331,4	1331,2	1331,6	1332,1	1323,8	1337,8	10,3	3,21	0,09
0,23	1215	1341,3	1341,2	1341,5	1340,8	1334,2	1351,2	12,0	3,4/	0,10
0,34	1204	1225 2	1224 4	1226 1	1349,/	1342,2	1335,0	5,3 242.0	15.60	0.07
0,50	1217	1227.0	1227.0	1220,1	1207 0	1203,0	1221 1	<u>243,9</u>	10,02	0,40
0.04	1202	1329.6	1329.5	1329.0	1329.6	1325.0	1332.3	1.4	1.10	0.03
0.09	1211	1331.9	1331.8	1331.9	1331.8	1328.5	1335.3	1.3	1.14	0.03
0.15	1057	1333.1	1333.0	1333.1	1333.0	1330.0	1336.1	1.1	1.05	0.03
0,23	1220	1334.8	1334.7	1334.8	1334.8	1331.9	1338.9	1.0	0,99	0,03
0,34	1202	1335.4	1335.3	1335,4	1335,4	1332,1	1339.2	1.0	1,00	0,03
0,50	1201	1326,1	1326.0	1326,3	1326,2	1320.0	1331,4	5.0	2,25	0.06

Perfil de concentração do NO _x no GLP. S' = 0,684, temperatura de referência 1175°C, em ppm.								
x/D	y/D		1	tomadas	6		média	desvio padrão
	0.5	38	38	38	38	38	38.0	0.000
	0.35	31	31	31	31	31	31,0	0,000
0.15	0,23	51	51	53	53	53	52,2	1,095
	0.15	87	82	85	85	85	84.8	1.789
	0.09	75	78	77	78	75	76.6	1.517
	0,04	68	64	57	53	53	59.0	6,745
	0	47	50	46	46	46	47,0	1,732
	0,5	41	40	40	40	40	40,2	0,447
	0,35	46	46	47	49	50	47,6	1,817
	0,23	48	49	50	50	51	49,6	1,140
0,36	0,15	53	53	53	54	54	53,4	0,548
	0.09	57	58	58	58	58	57,8	0,447
	0.04	60	61	60	60	60	60,2	0,447
	0	62	63	64	64	64	63,4	0,894
	0,5	41	40	41	40	41	40,6	0,548
	0.35	49	50	50	50	50	49,8	0,447
	0,23	54	54	54	54	54	54,0	0,000
0,60	0.15	56	56	57	57	57	56,6	0,548
	0.09	59	59	60	60	60	59,6	0,548
	0.04	62	62	62	62	62	62,0	0,000
	0	66	66	66	66	65	65,8	0,447
	0,5	48	48	48	47	48	47,8	0,447
	0.35	49	50	49	50	50	49.6	0,548
	0.23	52	53	52	53	53	52.6	0,548
0,85	0,15	55	55	55	55	55	55.0	0,000
	0.09	60	59	60	59	59	59,4	0,548
	0.04	62	62	62	62	62	62,0	0.000
	0	67	67	67	66	67	66.8	0,447
	0.5	46	47	47	47	47	46.8	0,447
	0.35	49	49	49	49	48	48.8	0,447
4.40	0.23	52	52	52	53	54	52,6	0,894
1,40	0.15	58	5/	59	59	59	58,4	0.894
	0.09	62	63	62	62	62	62,2	0,447
	0.04	66	66	66	66	65	65.8	0.447
	0	68	68	67	66	66	67,0	1,000
	0.5	65	64	65	65	66	65,0	0,707
	0.35	65	64	65	00	64	64.8	0.837
2.04	0.23	60	00	00	60	60	00.0	0,540
2,04	0.15	68 70	<u>68</u> 70	<u>68</u> 70	<u>69</u> 70	69	60.9	0,548
	0.09	70	70	70	70	70	70.2	0,447
	0.04	70	70	70	71	70	70,2	0,447
	0.5	80	81	81	<u>/1</u> 81	<u>72</u> 81	80.8	0.037
	0.5	82	81 81	82	82	82	81.8	0,447
	0.33	82	82	83	<u>02</u> 81	83	82.2	0,447
2 72	0.15	82	82	82	81	81	81.6	0.548
2,72	0.15	80	80	80	81	81	80.4	0,540
	0.03	78	79	79	79	78	78.6	0.548
	0	74	73	73	73	74	73.4	0.548
	0.5	84	85	85	85	85	84.8	0.447
	0.35	80	79	79	79	80	79.4	0.548
	0.23	76	76	76	75	75	75.6	0.548
3.19	0.15	78	78	78	78	77	77.8	0.447
5,10	0.09	77	77	76	77	77	76.8	0.447
	0.04	77	77	77	77	77	77.0	0.000
	0	75	75	74	74	75	74.6	0.548

Perfil de concentração do O2 no GLP. S' = 0,681, temperatura de referência 1175°C, em %								
x/D	y/D			tomadas			<u>média</u>	desvio padrão
	0.5	13.0	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	0,089
	0,35	10,9	10,8	10.8	10,7	10,7	10,8	0.084
0.15	0,23	6,7	6,3	6,1	6,1	6,1	6,3	0,261
	0,15	2,8	2,7	3,0	2,8	2,9	2,8	0,114
	0.09	2,9	3,2	3,4	2,9	2,9	3,1	0,230
	0.04	2.8	2,9	2,9	2,9	3.3	3,0	0,195
	0	5.6	6,7	6,0	6,2	7,0	6,3	0.557
	0.5	12.2	12.5	12,7	12,5	12.5	12,5	0,179
	0.35	9,8	10.0	10,0	9,9	9.8	9,9	0,100
	0.23	9,6	9,8	10,0	10,1	9,8	9,9	0,195
0,36	0.15	9.7	9.7	9.8	10.0	9.9	9,8	0,130
	0.09	9.5	9.5	9.7	9.5	9.5	9,5	0.089
	0.04	9.3	9.3	9.3	9.0	9.0	9,2	0.164
	0	8,8	8,7	8,5	8,6	8.6	8,6	0,114
	0.5	13.4	13.4	13.3	13.4	13.3	13,4	0.055
	0.35	11.7	11.7	11.6	11.6	11.8	11,7	0,084
	0.23	11.4	11.5	11.5	11.6	11.5	11.5	0.071
0,60	0,15	11.2	11.1	11.1	10.9	10.9	11.0	0.134
	0.09	10.5	10.6	10.5	10.5	10.6	10.5	0.055
	0.04	10.0	10.1	10,1	10.1	10,1	10,1	0.045
	0	9,2	9,2	9,3	9,2	9,1	9,2	0,0/1
	0.5	12.7	12.7	12,8	12.7	12.7	12,7	0,045
	0.35	12,5	12,5	12,5	12,4	12.5	12,5	0,045
0.05	0.23	12.0	12.0	12.0	12,1	12,2	12,1	0.089
0,85	0.15	11.5	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	0.045
	0.09	10.7	10.6	10.7	10.7	10.6	10,7	0,055
	0.04	10.1	10.1	10.3	10.3	10.1	10,2	0,110
	0	9,2	9,1	9.3	9.3	9.3	9,2	0.089
	0.5	12.0	12.0	12,7	12,7	12.0	12,0	0.055
	0.35	11.4	12,4	11.9	12,3	117	11 7	0,045
1 40	0.25	10.0	10.0	10.9	10.0	10.0	10.0	0,035
1,40	0,15	10.3	10.3	10.0	10.3	10.3	10.3	0.045
	0.03	9.6	9.6	9.7	9.7	9.7	9.7	0.045
	0.04	9.4	9.2	93	9.4	9.4	9.7	0.000
	0.5	9.8	9.8	9.7	97	9.6	9.7	0.084
	0.35	9.8	9.7	97	9.7	9.7	9.7	0.045
	0.23	9.6	9.7	9.6	9.5	94	9.6	0.010
2 04	0.15	9.0	91	91	9.0	9.0	9.0	0.055
2.0 .	0.09	8.9	8.8	8.7	8.7	8.8	8.8	0.084
	0.04	8.6	8.6	8.6	8.7	8.7	8.6	0.055
	0	8.7	8.8	8.9	8.6	8.5	8.7	0.158
	0.5	7,1	7,1	7,1	7,2	7,2	7,1	0.055
	0.35	6,8	6,8	6,7	6,6	6,7	6,7	0,084
	0,23	6.8	6,7	6,7	6,8	6.8	6,8	0.055
2,72	0,15	7,0	7,0	7,0	7,1	7,1	7,0	0,055
-	0,09	7,3	7,3	7,4	7,4	7,3	7,3	0,055
	0,04	7,6	7,6	7,6	7,7	7,8	7,7	0,089
L	0	7,7	7,8	7,9	7,9	7,9	7,8	0,089
	0.5	6.2	6.2	6,1	6,2	6,2	6,2	0,045
1	0.35	6.8	6.9	6,9	6,9	6.8	6,9	0,055
1	0,23	7.3	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	0.045
3,19	0,15	7,1	7,0	7,1	7,1	7,1	7,1	0,045
	0.09	7,2	7,2	7,2	7,2	7,1	7,2	0.045
1	0.04	7,2	7,3	7.3	7,3	7.3	7,3	0,045
	0	7.5	7.5	7.5	7.6	7.6	7.5	0.055

	Perfil de concentração do CO no GLP. S' = 0,681, temperatura de referência 1175°C, em ppm								
<u>x/D</u>	<u>y/D</u>			tomadas			<u>média</u>	<u>desvio</u> padrão	
	0,5	642	617	572	566	571	593,6	34,019	
	0.35	8.601	8.993	9.630	9.371	9.400	9199.0	404,903	
	0,23	31.950	32.420	32.810	33.830	33.640	32930,0	798,279	
<u>0,15</u>	0,15			super	<u>ior ao fundo de</u>	<u>escala</u>			
-	0,09	40.000	44.000	super	ior ao fundo de	escala	10010.0		
	0.04	40.000	41.000	43.460	44.000	45.770	42846.0	2332,698	
	0	37.470	36.510	35.160	34.200	34.200	35508.0	16 020	
	0.35	1.202	1.207	1.303	1.322	1.313	1501,4	278.051	
	0.33	6.008	5 833	5 653	6.827	6.612	6186.6	508 118	
0.36	0.25	5 693	5 405	5 404	5 109	4 935	5309.2	293 927	
0,00	0.09	5 213	4 995	5 493	5 671	5 147	5303.8	273 323	
	0.04	4.687	4.895	5.035	5.435	5.147	5039.8	279,791	
	0	4.687	4.478	4.125	4.298	4.407	4399.0	208.882	
	0,5	255	247	242	266	231	248,2	13,217	
	0,35	782	755	677	822	832	773,6	62,252	
	0,23	610	559	457	559	551	547,2	55,617	
0,60	0,15	411	493	513	481	447	469,0	40,324	
	0.09	451	478	561	430	451	474,2	51,427	
	0.04	419	569	695	720	736	627,8	133,958	
	0	899	1.004	999	1.146	1.079	1025,4	92,937	
	0.5	46	48	56	51	48	49.8	3.899	
	0,35	67	62	75	86	97	77,4	14,223	
0.05	0.23	80	70	54	51	48	60,6	13,777	
0,85	0.15	48	38	38	35	30	37.8	6,5/3	
	0.09	105	99	54	59	62	/6,8	25,743	
	0.04	242	276	270	242	04 117	97.2	24,025	
	05	242	210	19	16	16	18.6	2 510	
	0.35	11	8	11	8	8	9.2	1 643	
	0.00	8	5	8	3	3	5.4	2 510	
1.40	0.15	13	8	11	19	21	14.4	5,459	
.,	0.09	11	5	8	8	11	8.6	2.510	
	0,04	32	29	24	56	21	32,4	13,867	
	0	29	46	40	35	35	37,0	6,364	
	0,5	11	11	11	8	8	9,8	1,643	
	0.35	8	8	11	8	5	8,0	2,121	
	0,23	8	8	8	8	11	8,6	1,342	
2,04	0.15	8	5	5	8	8	6,8	1,643	
	0.09	8	13	13	8	8	10,0	2,739	
	0.04	16	11	8	5	8	9.6	4,159	
	0	21	21	19	13	11	17.0	4,690	
	0,5	5	5	5	8	5	5,6	1,342	
	0.35	8	8			E E	9.8	1.643	
0.70	0.23	<u> </u>	0	0	I F	5	0,0	2,121	
2,12	0.15	<u> </u>	<u> </u>	0	5	5	0.0	2 881	
	0.03	5	8	5	 	-	4.0	2 950	
	0,04	5	8	5	 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	5	5.2	1 789	
<u> </u>	0.5	5	5	8	5	5	5.6	1.342	
	0.35	5	3	5	3	5	4,2	1.095	
	0,23	3	3	3	3	3	3.0	0,000	
3,19	0,15	3	-	3	-	3	1,8	1,643	
	0,09	3	3	5	3	-	2,8	1,789	
	0.04	-	3		3	3	1,8	1,643	
1	0	3	-	-	-	3	1,2	1,643	



Perfil de temperatura(°C) GLP S' = 0,684 temp. de ref.1175°C



Concentração de NOx do GLP S" = 0,684 temp. ref. 1175°C



Concentração de O2 (%) do GLP S' = 0,684 temp. ref. 1175°C



Concenteração de CO (ppm) do GLP S' = 0,684 temp. refer. 1175°C



Temperatura (°C) e Concentração de NOx (ppm) GLP S' = 0,684 temp. ref. 1175°C



Concentrações de NOx (ppm) e O₂ (%) do GLP S' = 0,684 temp. ref. 1175°C



Perfil de NOx (ppm) do GLP S'= 0,684 temp. ref.1175°C interv. 2 (ppm) 0.50 50 80 50 8 60 10 60 Ŋ) 0.00-60 [60] ଚ୍ଚ 5 80 50 50 S -0.50 0.50 1.00 2.00 2.50 3.00 1.50 x/D



Perfil de Temperatura (°C) do GLP S' = 0,684 temp. ref.1175°C interv. 10°C

Resultados do GLP à temperatura de referência 1175C, rotação S' 0.684

Planilha para cálculo de tempo de residência para combustíveis não-nitrogenados e isentos de enxofre.

* considere cada molécula como um combustível diferente (mesmo não tendo carbono) ** mantenha pelo menos um valor diferente de 0 nos combustíveis não utilizados

combustíveis + Ar = gases de queima $\underline{comb1 + comb2 + comb3 + comb4 + Ar} = CO2 + H2O + 3,76N2$

	combustível 1							
<u>C</u>	_	4						
Η	_	<u>10</u>						
0	_	<u>0</u>						
	<u>nº moles</u>	<u>8,62069</u>						

<u>combustível 2</u>							
<u>C</u>	_	<u>3</u>					
<u>H</u>	_	<u>8</u>					
<u>0</u>	_	<u>0</u>					
<u>nº m</u>	<u>11,36364</u>						

	combustível 3						
C	-	<u>0</u>					
Н	_	<u>1</u>					
0	_	<u>0</u>					
	<u>nº moles</u>	<u>0</u>					

combustível 4								
<u>C</u>	_	<u>0</u>						
H	_	<u>1</u>						
<u>0</u>	_	<u>0</u>						
<u>nº</u> ı	<u>0</u>							

combustível 1	_	=	<u>0,5</u>	%	
combustível 2	_	=	<u>0,5</u>	%	
combustível 3		=	<u>0</u>	%	
combustível 4		=	0	%	

FxAr	1 25	
volume da câmara	0.383	m3
temperatura em C	1175	°C
temperatura em K	1448,15	K
pressão	<u><u>1</u></u>	atm
massa do combustível	<u>8,24</u>	<u>kg/h</u>
PCS	45932,9	kj/kg

relação ar/combustível estequiométrica*	Ξ	<u>15,49</u>	<u>:1</u>	
* proporção esteguiométrica de ar /combustível em	hase de neso			

estequiometrica de ar/compustivel em pase de peso

<u>massa total de ar necess ar</u>	sária com excesso de	Ξ	<u>159,57</u>	<u>Kg/h</u>	
massa total de ar + com	oustível	=	<u>167,81</u>	Kg/h	
potência específica	w=m.PCS/v	<u>=</u>	<u>274,50</u>	W	
tempo de residência		=	<u>1,99</u>	<u>m/s</u>	

	Perfil de temperatura do GLP. S' = 1,315, temperatura de referência 1175°C									5°C	
<u>posição</u> <u>x/D</u>	<u>posição</u> <u>y/D</u>	número de amostras	<u>média</u>	<u>confiança</u> <u>-95%</u>	<u>confiança</u> <u>95%</u>	<u>mediana</u>	<u>mínimo</u>	<u>máximo</u>	variância	<u>desvio</u> padrão	<u>erro</u> padrão
	0	1205	1405.8	1405.2	1406.3	1405.2	1370.6	1438.6	102 80	10 14	0.29
	0.04	1206	1389.8	1389.4	1390.2	1389.2	1368.0	1422.1	55.97	7.48	0.22
	0.09	1210	1379.9	1379.3	1380.5	1379.5	1344.8	1414.2	110.47	10.51	0.30
<u>0,15</u>	0,15	1212	1366,3	1366.0	1366,7	1365,4	1351,7	1396,5	43,03	6,56	0,19
	0.23	1210	1357.8	1357.6	1358.1	1357.8	1346.2	1373.3	18.27	4.27	0.12
	0.34	1207	1309,0	1308.3	1309.7	1305.8	1287,9	1354.4	149.34	12,22	0.35
	0.50	1205	1225.1	1224.5	1225.7	1224.0	1201.8	1264.8	101.21	10.06	0.29
	0	1102	1364.6	1364.1	1365.1	1365.4	1330.7	1385.9	70.81	8.41	0.25
	0.04	887	1355.2	1354.7	1355.7	1355.1	1334.1	1382.4	50.69	7.12	0.24
0.36	0.09	1198	13/4.2	13/3./	13/4./	13/4.6	1349.7	1400.2	/6.83	8.77	0.25
0,30	0.15	1204	1342.2	1341.9	1342.5	1342.2	1215 5	1362.1	33.98	5.83	0.17
	0.23	1204	12276	1226.0	1229 /	1225 1	1200 6	1260 /	170.04	12.04	0.10
	0.54	1206	1286.3	1285.8	1286.9	1286.1	1252.0	1316.6	97.71	9.88	0.37
	0.50	1200	1366.2	1365.6	1366.8	1367.3	1345.5	1393.1	102.80	10 14	0.20
	0.04	1191	1364.1	1363.7	1364.5	1364.6	1347.2	1389.5	53 47	7.31	0.20
	0.09	1216	1366.3	1365.9	1366.6	1365.6	1345.6	1389.0	43.54	6.60	0.19
0,6	0.15	1202	1357.7	1357.5	1358.0	1358.1	1342.6	1370.3	17.90	4.23	0.12
	0,23	1222	1342,5	1342,1	1342,8	1342,6	1322,6	1362,0	40,62	6,37	0,18
	0.34	1209	1324.3	1323.7	1324.9	1323.7	1293.7	1356.4	102.78	10.14	0.29
	0,50	1294	1249,1	1247,8	1250,4	1252,1	1173,7	1296,0	566,74	23,81	0,66
	0	1208	1363.9	1363.7	1364.1	1363.8	1350.3	1375.5	17.50	4.18	0.12
	0.04	1054	1365.7	1365.4	1365.9	1365.6	1349.0	1381.1	17.01	4.12	0.13
0.05	0.09	1214	1369.9	1369.7	1370.1	1370.3	1355.8	1381.1	16.77	4.10	0.12
0,85	0.15	1211	1369.3	1369.0	1369.7	1368.9	1353.8	1389.3	32.24	5.68	0.16
	0.23	1197	1355.5	1354.9	1356.0	1354.9	1329.8	1380.5	79.50	8.92	0.26
	0.34	1240	1328.2	1327.4	1329.1	1326.5	1295.2	1364.7	238.05	15.43	0.44
	0.50	1210	12/8.1	12/7.4	12/8./	12/5.5	1254.4	1318.8	134.83		0.33
	0.04	1209	1254 2	1348.0	1348.3	1348.0	1246.2	1350.8	8.20	2.80	0.08
	0.04	1105	1360.6	1360 /	1360.7	1360.5	1340.2	1371.6	8 / 9	2.02	0.00
1.4	0.05	885	1362.2	1362.0	1362 4	1362.2	1352.9	1371.0	8.64	2.91	0.00
<u></u>	0.13	1212	1357.0	1356.8	1357.2	1356.9	1345.8	1369.0	13.94	3 73	0.10
	0.34	1203	1347.0	1346.8	1347.2	1347.1	1336.8	1358.0	12.30	3.51	0.10
	0.50	1207	1288.4	1287.7	1289.0	1290.2	1244.6	1313.0	129.57	11.38	0.33
	0	1209	1329,4	1329,3	1329,5	1329,4	1323,6	1334,9	2,97	1,72	0,05
	0.04	1256	1330.8	1330.7	1330.9	1330.8	1324.1	1335.9	2.94	1.72	0.05
	0.09	757	1333.2	1333.1	1333.4	1333.1	1328.0	1340.7	3.40	1.84	0.07
<u>2,04</u>	0.15	1205	1334.2	1334.1	1334.3	1334.1	1329.2	1341.1	3.84	1.96	0.06
	0.23	1211	1335.2	1335.0	1335.3	1335.1	1329.1	1342.4	5.75	2.40	0.07
	0.34	1205	1326.8	1326.7	1327.0	1326.7	1318.7	1335.4	6.99	2.64	0.08
	0.50	1213	1305.2	1304.4	1306.0	1309.0	1267.7	1327.8	181.29	13.46	0.39
	0	1205	1318.2	1318.1	1318.3	1318.2	1314.4	1323.4	2.07	1.44	0.04
	0.04	1202	1221.0	1220.4	1221.0	1220.3	12172	1226.2	2.10	1.45	0.04
2 72	0.09	1203	1320.8	1320.9	1320.9	1320.0	1316.7	1325.7	2.70	1.07	0.05
<u>_,, _</u>	0.13	1041	1318 1	1318.0	1318.2	1317.9	1313.3	1323.5	3.52	1.00	0.05
	0.34	1206	1311.3	1311.2	1311.4	1311.5	1303 7	1317.0	4 97	2 23	0.00
	0.50	1204	1286.3	1285.5	1287.1	1289.5	1254.2	1304.3	187.84	13.71	0.39
	0	1204	1308.6	1308.5	1308.6	1308.5	1305.7	1311.7	1.04	1.02	0.03
	0.04	1204	1306.5	1306.4	1306.6	1306.6	1302.1	1310.2	2.53	1.59	0.05
	0.09	1205	1302.5	1302.4	1302.5	1302.5	1300.2	1305.9	0.82	0.90	0.03
<u>3,19</u>	0.15	1203	1302.9	1302.8	1302.9	1302.8	1300.7	1306.1	0.92	0.96	0.03
	0.23	1203	1303.3	1303.3	1303.4	1303.3	1299.5	1306.5	1.51	1.23	0.04
	0.34	1207	1299.7	1299.6	1299.8	1300.0	1294.9	1303.4	3.27	1.81	0.05
1	0.50	1096	1276.1	1275.4	1276.7	1280.2	1249.1	1289.2	123.36	111.11	0.34

Perfil de concentração NO _x no GLP. S' = 1,315, temperatura de referência 1175°C, em ppm										
x/D	y/D		tor	nadas			média	desvio padrão		
	0.5	41	42	41	42	42	41.6	0.548		
	0,35	54	54	55	55	57	55.0	1,225		
0.15	0,23	67	69	68	68	68	68,0	0,707		
	0,15	80	80	80	81	81	80,4	0,548		
	0,09	85	85	85	85	85	85,0	0,000		
	0,04	86	86	85	86	86	85,8	0,447		
	0	89	86	88	90	88	88,2	1,483		
	0,5	48	47	48	47	47	47,4	0,548		
	0,35	69	70	70	69	70	69,6	0,548		
	0,23	76	77	77	77	78	77,0	0,707		
0,36	0.15	79	78	79	81	81	79,6	1,342		
	0,09	81	81	81	82	83	81,6	0,894		
	0,04	81	82	81	82	78	80,8	1,643		
	0	84	83	83	84	84	83,6	0,548		
	0,5	55	56	57	56	55	55,8	0,837		
	0.35	69	70	70	70	71	70,0	0,707		
	0,23	78	78	76	76	75	76,6	1,342		
0,60	0,15	72	73	73	72	72	72,4	0.548		
	0,09	80	81	81	82	83	81,4	1,140		
	0,04	80	79	78	78	78	78,6	0,894		
	0	79	80	79	79	80	79,4	0,548		
	0,5	50	48	47	47	47	47,8	1,304		
	0.35	58	57	57	59	60	58.2	1,304		
	0,23	75	76	75	76	78	76,0	1,225		
0,85	0,15	75	74	73	72	73	73,4	1,140		
	0,09	82	81	81	79	81	80,8	1,095		
	0,04	76	76	77	77	76	76,4	0,548		
	0	72	71	70	73	72	71.6	1,140		
	0,5	69	68	68	67	67	67,8	0,837		
	0.35	67	68	68	67	66	67,2	0,837		
	0,23	66	68	68	67	66	67,0	1,000		
1,40	0.15	69	71	71	70	70	70,2	0,837		
	0,09	63	63	62	62	62	62,4	0.548		
	0,04	60	61	61	60	61	60.6	0,548		
	0	65	65	66	66	66	65.6	0.548		
	0.5	56	57	57	58	57	57,0	0,707		
	0.35	60	63	64	64	64	63.0	1,732		
	0.23	60	60	61	61	61	60.6	0.548		
2.04	0.15	64	65	64	63	64	64.0	0,707		
	0.09	68	67	66	68	67	67.2	0.837		
	0,04	70	71	70	71	71	70,6	0,548		
	0	72		72	72	73	72.0	0,707		
	0.5	57	57	59	58	59	58.0	1,000		
	0.35	56	56	58	56	56	56,4	0.894		
0 -0	0.23	58	59	58	58	57	58.0	0.707		
2,72	0.15	58	58	58	58	58	58,0	0,000		
	0.09	58	58	58	58	58	58.0	0.000		
	0.04	58	58	58	58	58	58.0	0.000		
	0	65	65	66	66	66	65.6	0.548		
	0.5	69	/0	/1	/2	/1	/0.6	1,140		
	0.35	80	/9	80	/9	/8	/9,2	0,837		
0.10	0.23	83	84	82	81	/8	81.6	2,302		
3,19	0.15	84	85	86	87	87	85.8	1.304		
	0.09	84	85	85	84	84	84,4	0.548		
	0.04	80	81	81	81	80	80.6	0.548		
1	0	/9	80	89	/9	/9	81,2	4,382		

Perfil de concentração O2 no GLP. S' = 1,315, temperatura de referência 1175°C, em %										
x/D	y/D			tomadas			média	desvio padrão		
	0.5	8,4	8,5	8.5	8,7	8.8	8,6	0,164		
	0,35	8,1	8,1	7,9	7,9	7,9	8,0	0,110		
0.15	0,23	7,8	7,6	7,7	7,8	7,8	7,7	0.089		
	0,15	7,8	7,6	7,7	7,8	7,8	7,7	0,089		
	0.09	7,1	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	0.045		
	0.04	7,1	7,1	7,1	7,2	7,2	7,1	0,055		
	0	7,4	7,2	7,2	7,1	7,2	7,2	0,110		
	0,5	13.2	13.3	13.2	13.2	13,1	13,2	0.071		
0.00	0.35	10.0	10.0	9,9	9,9	9,8	9,9	0.084		
	0.23	8.3	8.5	8.2	8.2	8.2	8.3	0.130		
0,36	0.15	8.3	8.5	8,2	8,2	8,2	8,3	0,130		
	0.09	8.0	8.0	8.0	7.9	7.9	8.0	0.055		
	0.04	7,9	7.9	8.0	1,1	7,4	7.8	0.239		
	0	6,9	/,1	7,2	/,1	7.0	/,1	0,114		
	0.5	10.9	10.8	10.0	10.2	11.3	10.0	0.207		
	0.35	10.3	10.2	10.3	10.3	10.3	10,3	0,045		
0.60	0.23	8,8	8,9	8.8	8,6	8.0	<u> </u>	0,134		
0,60	0.15	0,0	7,9	7,9	7.0	7.7	7.9	0,114		
	0.09	7.3	7.3	7.3	7.2	6.0	7.3	0.055		
	0.04	6.7	6.7	6.6	7.0	6.6	<u>7.0</u>	0.071		
	0.5	10.3	10.7	10.3	10.3	10.0	10.2	0,000		
	0.35	89	89	89	89	89	89	0,134		
	0.00	8.2	8.1	8.2	8.2	83	8.2	0.071		
0.85	0.15	7.6	7.5	7.4	7.4	7.4	7.5	0.089		
0,00	0.09	7.3	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	0.045		
	0.04	6.8	6.8	6.9	6.8	6.9	6.8	0.055		
	0	6.6	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	0.089		
	0.5	6.0	5.9	5.9	5.9	6.0	5.9	0.055		
	0,35	5,9	5.8	5,7	5.8	5,8	5,8	0.071		
	0,23	5,8	5,7	5,7	5,7	5,8	5,7	0,055		
1,40	0,15	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	0,000		
	0.09	6,4	6,4	6,4	6,5	6,4	6,4	0.045		
	0.04	6.6	6.6	6.5	6.5	6.5	6,5	0.055		
	0	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	0.000		
	0,5	7,3	7,1	7.0	6,9	6,9	7,0	0,167		
	0.35	6,0	5,9	5,8	5,8	5.8	5,9	0.089		
	0.23	6,0	6,1	6,0	6,0	6.0	6.0	0.027		
2.04	0.15	6.2	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	0.045		
	0.09	6.3	6,4	6.3	6.3	6,4	6.3	0.055		
	0.04	6,2	6,2	6,3	6,3	6,2	6,2	0,055		
	0	6.3	6,2	6.3	6.3	6.3	6.3	0.045		
	0.5	7.3	7.3	7.3	7.2	7,2	7,3	0.055		
	0.35	6,9	0.8	0.8	6.7	0.8	<u> </u>	0.071		
0.70	0.23	0,0	0,0 6 7	0,0	0,7	0,0	<u> </u>	0.045		
2,72	0.15	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	<u> </u>	0,045		
	0.09	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6 0 0.9	0,000		
	0.04	6.9	70	6.9	6.9	6.9	6.0	0.000		
	0.5	75	7.6	7.6	75	74	75	0.043		
	0.35	7.2	7.0	7.0	7.2	72	7.0	0,000		
	0.23	7.0	7.0	68	67	6.7	6.8	0,152		
3,19	0.15	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	0,000		
5,10	0.09	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	0,000		
	0.04	7.1	6.9	6.9	7.1	7.1	7.0	0,110		
	0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	0.000		

Perfil de concentração do CO no GLP. S' = 1,315, temperatura de referência 1175°C, em ppm									
<u>x/D</u>	<u>y/D</u>			<u>tomadas</u>	<u>média</u>	desvio padrão			
	0.5	328	326	282	266	245	289,4	36,753	
	0.35	156	161	183	171	161	166,4	10,761	
0,15	0.23	212	151	113	102	102	136,0	47,016	
	0.15	48	43	56	73	59	55,8	11,520	
	0.09	105	97	89	86	78	91.0	10,368	
	0.04	86	70	75	89	81	80,2	7,791	
	0	234	209	199	215	223	216,0	13,342	
	0.5	43	40	38	48	32	40.2	5,933	
	0.35	<u>24</u>	<u>24</u>	21	19	21	<u>21,8</u> 17.0	2,108	
0.36	0.25	19	21	10	10	10	18.8	1 780	
0,50	0.15	21	10	10	10	10	10,0	0.80/	
	0.03	21	24	40	38	40	32.6	9,317	
	0.04	137	153	126	107	134	131.4	16 802	
	0.5	5	8	5	5	8	62	1 643	
	0.35	3	5	3	5	5	4.2	1.095	
	0.23	11	8	5	5	8	7.4	2.510	
0.60	0,15	11	13	13	11	11	11,8	1,095	
	0,09	19	16	21	21	21	19,6	2,191	
	0,04	38	29	24	21	24	27,2	6,686	
	0	38	32	43	43	32	37,6	5,505	
	0.5	8	11	8	5	8	8.0	2,121	
	0.35	8	11	8	8	8	8,6	1,342	
	0.23	11	11	11	8	11	10,4	1,342	
0,85	0.15	13	11	11	13	13	12,2	1,095	
	0.09	16	13	8	16	16	13,8	3,493	
	0.04	13	13	13	13	13	13.0	0.000	
	0	16	24	21	19	16	19,2	3,421	
	0.5	3	5	5	5	5	4,6	0.894	
	0.35	10	12	0 16	13	16	15.4	2,049	
1.40	0.23	10	11	12	10	10	10,4	1,042	
1,40	0.15	8	8	8	11	8	86	1 342	
	0.03	5	5	5	5	5	5.0	0.000	
1,40	0.04	3	3	3	5	5	3.8	1 095	
	0.5	3	8	5	5	5	5.2	1.789	
	0.35	11	8	11	8	8	9.2	1.643	
	0,23	11	8	11	8	8	9,2	1,643	
2,04	0,15	5	5	8	5	5	5,6	1,342	
	0.09	3	5	5	3	3	3,8	1,095	
	0,04	5	3	5	3	3	3,8	1,095	
	0	5	5	3	3	3	3,8	1,095	
	0.5	3	0	3	0	0	1,2	1,643	
	0.35	3	5	3	0	0	2,2	2,168	
0.70	0.23	3	3	3	3	3	3.0	0,000	
2,72	0.15	5	0	0	0	3	1,6	2,302	
	0.09	3	0		0	0	0,6	1,342	
	0.04	0	0	0	0	0	0.0	0,000	
	0.5	0	0	0	0	0	0,0	0,000	
	0.35	0	0	0	0	0	0.0	0,000	
	0.00	0	0	0	0	0	0,0	0,000	
3,19	0.15	0 0	0	0	0	0	0.0	0,000	
0,10	0.09	Õ	Ő	Ő	ñ	Ő	0.0	0.000	
	0.04	ŏ	Õ	õ	Õ	Õ	0.0	0.000	
	0	Ő	Ő	Ő	Ő	Ő	0.0	0,000	



Perfil de Temperatura (°C) do GLP S' = 1,315 temp. ref. 1175 °C



Concentração de NOx (ppm) do GLP S' = 1,315 temp. ref. 1175°C


Concentração de O2 (%) do GLP S' = 1,315 temp. de ref. 1175°C



Concentração de CO (ppm) do GLP S' = 1,315 temp. ref. 1175°C



Temperatura (°C) e Concentração de NOx (ppm) GLP S' = 1,315 temp. ref. 1175°C



Concentrações de NOx (ppm) e O2 (%) do GLP S' = 1,315 temp. ref. 1175°C



Perfil de NOx (ppm) do GLP S' = 1315 Temp. ref. 1175°C interv. 2 (ppm) **0.50**_T 60 ିତ 10 70 ଌୄ 2 76 80 \diamond 0.00 .76 ୄୖଡ଼ 10 -76 0 70 -ଞ 60 -0.50 0.50 1.00 1.50 2.00 2.50 3.00

x/D









Perfil de concentração O2 do etanol S'= 0,684 temp. ref. 1175°C intervalo 0,5%

Perfil de conc. O2 S'=1,315 temp. ref. 1000°C intervalo 0,5 % do etanol











Perfis de concentração e temperatura no etanol, em 3 dimensões



1905 1800 1800

Standard Standard

بالشترسيرج

Perfil de temperatura °C do etanol



Perfil de concentração do Q etanol





Perfis de concentração do CO do etanol

Perfil de temperatura °C do GLP





Perfil de concentração do O2 no GLP sw= 0,684/ T=1000°C 3 3 Þ Æ Sara and a star ST SP ST ST ST ST sw= 1,315 / T=1175°C sw= 0,684 / T=1175°C 42 42 ø 3 40 3 de la all a and the second s Real Real Property and the second sec



Apêndice II

Formação e cristalização de fuligem no GLP

Nas medições realizadas com a utilização do GLP com rotação S' = 1,351 à temperatura de referência 1175°C verificou-se que após, seis horas de trabalho, o dispositivo de segurança que identificava a extinção da chama foi acionado em vários momentos, causando o fechamento da válvula solenóide na linha de alimentação do combustível e correspondentes tentativas de reignição.

Após a verificação das possibilidades de falha notou-se que na ponta do tubo central do queimador havia uma formação cilíndrica de fuligem acumulada, obrigando a limpeza constante a fim de prosseguir com o experimento.

Repetindo o experimento na mesma condição, após algumas horas de funcionamento, foi observado o mesmo fenômeno.

O experimento foi repetido nas mesmas condições, a fim de ser fotografado e registrado o acontecido. Neste momento foi desligada a câmara de combustão e esperou-se o resfriamento para poder ser retirada esta fuligem.

A figura AII.1 mostra a câmara sem a formação de fuligem enquanto a figura AII.2 mostra a câmara com a formação desta fuligem.



Figura AII.1. Queimador da câmara de combustão.



Figura AII.2. Queimador da câmara de combustão onde se pede identificar a cristalização.

Após a retirada desta fuligem foi possível observar que a mesma tinha consistência rígida e que em suas extremidades havia formação de cristais semelhantes à de cristais de gelo (pequenas ramificações), era oca e com um formato cônico, com aproximadamente 80 x 60 mm. As figuras AII.3, AII4 e AII5 mostram esta formação.



Figura AII.3. Foto da fuligem



Figura AII.4. Foto da fuligem



Figura AII.5. Foto da fuligem

Estas mesmas condições de operação foram anteriormente utilizadas sem que houvesse a formação de fuligem, mas haviam sido realizadas com outra bateria de garrafas de GLP, que tiveram que ser trocadas devido ao seu esgotamento. Como a composição do GLP no Brasil, é muito variável, é possível que a nova carga de combustíveis contivesse frações que proporcionaram a formação de fuligem.

Esta formação de fuligem geralmente é observada em combustores que utilizam óleos pesados na combustão, e que em determinados queimadores são usadas placas difusoras para a diminuição de zonas de baixa pressão na ponta de queimadores, mas não se tem informação de que isso ocorreria na queima de GLP.