

## RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 04/03/2017.

**EDSON ORATI DA SILVA**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA CÂMARA PARA COMBUSTÃO DE  
COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS, OPERANDO SOB REGIME DE COMBUSTÃO SEM  
CHAMA VISÍVEL**

Guaratinguetá  
2016

EDSON ORATI DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE UMA CÂMARA PARA COMBUSTÃO DE COMBUSTÍVEIS  
LÍQUIDOS, OPERANDO SOB REGIME DE COMBUSTÃO SEM CHAMA VISÍVEL

Dissertação apresentada à Faculdade de  
Engenharia do Campus de Guaratinguetá,  
Universidade Estadual Paulista, para a  
obtenção do título de Mestre em Engenharia  
Mecânica na área de Energia.

Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Junior  
Co-Orientador: Prof. Dr. Anton Skyrda Veríssimo

Guaratinguetá  
2016

O63d	<p>Orati, Edson Desenvolvimento de uma câmara para combustão de combustíveis líquidos, operando sob regime de combustão sem chama visível / Edson Orati da Silva–Guaratinguetá, 2016. 162 f. : il. Bibliografia: f. 126-135.</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016. Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Junior Coorientador: Prof. Dr. Anton Skyrda Veríssimo</p> <p>1. Combustão 2. Biodiesel 3. Poluentes – Aspectos ambientais I. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 662.611(043)</p>
------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

*EDSON ORATI DA SILVA*

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA: Energia

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**



Prof. Dr. JOÃO ANDRADE DE CARVALHO JUNIOR  
UNESP/FEG



Prof. Dr. JOSÉ ALEXANDRE MATELLI  
UNESP/FEG



Prof. Dr. CHRISTIAN JEREMI CORONADO RODRIGUEZ  
UNIFEI

## **DADOS CURRICULARES**

### **EDSON ORATI DA SILVA**

NASCIMENTO 07.03.1988 – NEVES PAULISTA/SP

FILIAÇÃO Edson Antunes da Silva  
Leonor Aparecida Orati da Silva

2007/2012 Curso de Graduação  
Engenharia Química – Escola de Engenharia de Lorena/USP

2014/2016 Curso de Pós-Graduação  
Mestrado em Engenharia Mecânica – FEG/UNESP

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, eu agradeço a Deus pela disposição física e psicológica e pela capacidade de discernir a minha realidade e as dos outros com cautela e sempre com a devida compressão dos atos alheios ou da ausência deles seja nos relacionamentos pessoais, seja nos relacionamentos profissionais. Afinal, somos todos seres humanos da mesma espécie.

ao *Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Junior*, meu orientador, que tem sido uma fonte de inspiração e conhecimento acadêmico. A nossa amizade é muito importante para mim,

aos meus queridos pais *Edson e Leonor*, que souberam e sabem me estender a mão, quando eu mais preciso de amor e carinho,

à namorada *Ana Carolina Galvão Rosa*, que soube entender os momentos de minha ausência e a importância do mestrado, não pela conquista de um título acadêmico, mas pela aquisição de conhecimentos técnicos e acadêmicos,

ao *Prof. Dr. Anton Skyrda Veríssimo* pela co-orientação deste projeto de pesquisa e por conduzir pessoalmente as atividades de campo,

à *Prof. Dra. Ana Maura Araujo Rocha*, que colaborou com a execução das tarefas relativas ao presente projeto de pesquisa,

ao *Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri*, que é um grande exemplo de ser humano, em virtude da capacidade de escutar ao invés de ouvir e agir ao invés de se manter inerte às necessidades pessoais e alheias,

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

ao amigo *Ângelo Teixeira Balbi* pela amizade e pela convivência diária,

aos colegas na UNESP/FEG e aos colegas da oficina mecânica no setor Ensaios/INPE pela colaboração direta (ou indireta) durante as etapas do presente projeto de pesquisa,

às agências de fomento pelo apoio financeiro prestado ao mestrado, projeto Universal CNPq 471342/2013-0 e o Processo FAPESP 2012/12374-0.

“The ability to analyze a problem involves a combination of inherent insight and experience. The former, unfortunately, cannot be learned, but depends on the individual. However, the latter is of equal importance, and can be gained with patient study.”

Vedat S. Arpacı



SILVA, E. O. **Desenvolvimento de uma Câmara para Combustão de Combustíveis Líquidos, operando sob Regime de Combustão Sem Chama Visível**. 2016. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

## RESUMO

Uma bancada de testes em escala de laboratório foi desenvolvida para operar em vários regimes de combustão, inclusive no regime de combustão sem chama visível com a queima de combustíveis líquidos, em particular, o biodiesel. As dimensões do queimador e da câmara foram determinadas com base na teoria de jatos confinados, a fim de se obter uma taxa de recirculação suficientemente elevada dos produtos de combustão com o aumento da vazão mássica de ar. A bancada permite variar a temperatura de pré-aquecimento do ar, o excesso de ar e a velocidade de injeção do ar. Um sistema de alimentação equipado com uma bomba de engrenagens foi desenvolvido para pulverizar o combustível no interior da câmara de combustão através de um atomizador do tipo *pressure swirl*. Foi necessário montar uma bancada de testes de atomização equipada com um sistema de injeção do combustível, um sistema de pré-aquecimento do combustível e um sistema de sucção para realizar as medidas do diâmetro médio das gotas com o uso de um equipamento da marca *Spraytech*. Os experimentos de combustão com elevados excessos de ar pré-aquecido a 600°C revelaram que o comportamento da câmara atende às características típicas do regime de combustão sem chama visível. As observações visuais indicaram que os contornos da chama não foram distinguidos. Os níveis de ruídos sonoros foram reduzidos, as emissões de fuligem foram eliminadas e as emissões de  $NO_x$  e  $CO$  foram significativamente reduzidas com o aumento do excesso de ar e da temperatura de pré-aquecimento do ar. Por outro lado, a operação do sistema com baixos excessos de ar resultou no aparecimento e no aumento do comprimento da chama, no escape da chama pela exaustão e no aumento das emissões de fuligem, acompanhado pelo aumento acentuado das emissões de  $CO$ , que são características do regime de combustão convencional. Assim, foi demonstrado que o sistema desenvolvido opera no regime de combustão sem chama visível com a queima de biodiesel, empregando um atomizador de uso comercial.

**PALAVRAS-CHAVE:** Combustão sem chama visível. Biodiesel. Emissões de poluentes. Atomizador *pressure swirl*. Redução de  $CO_2$ .

SILVA, E.O. **Development of a laboratory scale combustion chamber for liquid fuel combustion, operating under flameless combustion regime.** 2016. 162 f. Dissertation (Master's in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

### ABSTRACT

A laboratory scale experimental setup was developed to operate under various combustion regimes, including under the flameless combustion regime by burning liquid fuels, in particular, biodiesel. The burner and combustion chamber dimensions were determined based on the confined turbulent jet theory in order to achieve a sufficiently high combustion products recirculation rate with the increase of the air mass flow rate. The setup allows to manipulate the air preheat temperature, the excess air and the air injection velocity. A feed system equipped with a gear pump was developed to pulverize the fuel into the combustion chamber through a pressure swirl-type atomizer. It was necessary to build up an experimental setup for atomization equipped with a liquid fuel injection system, a fuel preheating system and a suction system in order to make the droplet mean diameter measurements with the aid of a piece of equipment which trademark is known as *Spraytech*. The combustion experiments with high excess air preheated at 600°C revealed that the combustion chamber behavior follows the typical features of flameless combustion regime. Visual observations pointed out that the flame boundaries could not be distinguished. The combustor acoustic emissions were diminished, soot emissions were eliminated as well as  $NO_x$  and  $CO$  emissions were significantly reduced with the increase of the excess air and the air preheat temperature. On the other hand, the system operation with low excess air coefficient resulted in the appearance and the increase of the flame length, the flame escape through the chamber exit and the increase of soot emissions, accompanied by the steep rise of  $CO$  emissions, which are the inherent features of the conventional combustion regime. Therefore, it was demonstrated that the developed system operates under flameless combustion regime by burning biodiesel, employing a commercially used atomizer.

**KEYWORDS:** Flameless combustion. Biodiesel. Pollutants emissions. Pressure swirl atomizer.  $CO_2$  emissions reduction.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Emissões globais e cumulativas de CO <sub>2</sub> no período de 1850 a 2011 .....	20
Figura 1.2 - Consumo final de energia por fonte no Brasil em 2014.....	24
Figura 1.3 - Emissões de carbono por fonte no Brasil entre 1950 e 2011 .....	25
Figura 2.1 - Regiões características de um jato .....	28
Figura 2.2 - Jato turbulento e confinado a partir de um ejetor circular.....	31
Figura 2.3 - Estágios do spray com o aumento da pressão de injeção .....	35
Figura 2.4 - Componentes internos de um atomizador mecânico-centrífugo do tipo cone oco .. .....	38
Figura 2.5 - Dimensões dos componentes internos de um atomizador mecânico-centrífugo com vazão nominal de 5-30 kg/h .....	39
Figura 2.6 - Processos de mistura no regime de combustão sem chama visível.....	48
Figura 2.7 - Descrição do regime de combustão sem chama visível em três etapas .....	49
Figura 2.8 - Aspectos visuais entre (a) o regime de combustão convencional e (b) o regime de combustão sem chama visível.....	50
Figura 2.9 - Perfis de temperatura entre o regime de combustão convencional e o regime de combustão sem chama visível.....	51
Figura 2.10 - Regimes de combustão em função da temperatura dos reagentes e da taxa de recirculação dos produtos de combustão .....	52
Figura 2.11 - Queimador do tipo <i>Jet in Hot Coflow</i> .....	54
Figura 3.1 - Componentes do equipamento da marca <i>Spraytech</i> .....	63
Figura 3.2 - Bancada de testes de atomização montada em laboratório (a) Instalação física montada (b) Posição do termopar .....	64
Figura 3.3 - Equipamento da marca <i>Spraytech</i> fornecido pela empresa Malvern .....	65
Figura 3.4 - Linha de amostragem de gases.....	66
Figura 3.5 - Arranjo físico dos analisadores de gases dispostos nos painéis.....	67
Figura 3.6 - Vista isométrica do sistema de combustão.....	68
Figura 3.7 - Desenho esquemático da vista superior do pré-aquecedor de ar.....	69

Figura 3.8 - Vistas ortogonais do terceiro diedro do conjunto, o bloco injetor e a câmara.....	70
Figura 3.9 - Seção de corte A-A da vista lateral esquerda do sistema de combustão .....	71
Figura 3.10 - Seção de corte A-A da vista frontal do sistema de combustão.....	72
Figura 3.11 - Procedimento de montagem do bloco injetor .....	74
Figura 3.12 - Queimador e câmara de combustão: (a) modo de fixação da câmara .....	75
(b)isolamento térmico da câmara com lã de vidro .....	75
Figura 3.13 - Sistema de combustão montado em um suporte na vertical .....	76
Figura 3.14 - Posição do atomizador e a do queimador piloto .....	77
Figura 3.15 - Posição do tubo injetor de combustível líquido.....	78
Figura 3.16 - Extremidade superior do pré-aquecedor de ar .....	78
Figura 3.17 - Posição do termopar na extremidade do tubo injetor de combustível .....	79
Figura 3.18 - Ocorrência da carbonização do biodiesel dentro do atomizador .....	80
Figura 3.19 - Seção de corte A-A da vista lateral esquerda do sistema após a colocação da camisa d'água .....	81
Figura 3.20 - Seção de corte A-A da vista lateral posterior do sistema após a colocação da camisa d'água .....	81
Figura 3.21 - Sistema com tubo injetor encamisado:(a) bloco injetor e câmara; (b) bloco injetor .....	82
Figura 3.22 - Posições dos termopares e da sonda de amostragem dos gases de combustão...	83
Figura 3.23 - Diagrama da instalação utilizada na realização dos experimentos .....	83
Figura 3.24 - Sistema de combustão com a indicação dos componentes .....	84
Figura 3.25 - Exaustão da câmara de combustão e posição da sonda de amostragem de gases .....	85
Figura 3.26 - Exaustão: (a) Posição da sonda; (b) Componentes; (c) Extremidade da sonda..	85
Figura 4.1 - Linha de Grebel teórica para o biodiesel .....	91
Figura 4.2 - Comparação das frações volumétricas totais de CO <sub>2</sub> obtidas nos experimentos com as calculadas na análise estequiométrica .....	91
Figura 4.3 - Poder calorífico inferior dos combustíveis .....	92

Figura 4.4 - Massa (kg) dos gases de combustão por mol de combustível.....	93
Figura 4.5 - Calor liberado por unidade de massa da mistura ar/combustível em função do coeficiente de excesso de ar normalizado .....	94
Figura 4.6 - Temperatura de chama adiabática em função do excesso de ar .....	94
Figura 4.7 - Desenho esquemático relativo à alteração do diâmetro externo do tubo injetor (a) sistema sem camisa d'água e (b) sistema com tubo injetor encamisado .....	96
Figura 4.8 - Quantidade de movimento linear em função do coeficiente de excesso de ar .....	97
Figura 4.9 - Velocidade de injeção do ar em função do coeficiente de excesso de ar ( $\lambda$ ) .....	98
Figura 4.10 - Coeficiente de recirculação em função da quantidade de movimento linear .....	99
Figura 4.11 - Coeficiente de recirculação em função do coeficiente de excesso de ar ( $\lambda$ ) .....	100
Figura 4.12 - Tempo médio de residência dos gases em função de $\lambda$ para diferentes temperaturas de pré-aquecimento do ar .....	101
Figura 4.13 - Diâmetro médio de Sauter em função da temperatura do biodiesel para diferentes pressões de injeção .....	105
Figura 4.14 - Aparência da zona de combustão ao longo da extensão da câmara de quartzo e comparação entre (a) uma chama típica do regime de combustão convencional e (b) dois focos de chama existentes durante a operação nas condições citadas .....	108
Figura 4.15 - Ausência de uma chama visível no interior da câmara em condições típicas do regime de combustão sem chama visível.....	109
Figura 4.16 - Queima de diesel (a) no regime de combustão convencional e (b) no regime de combustão sem chama visível.....	110
Figura 4.17 - Resultados da simulação e de experimentos com a queima de diesel.....	111
Figura 4.18 - Aparência de chamas de querosene para diferentes configurações do sistema.....	112
Figura 4.19 - Emissões de CO em função de $\lambda$ para três temperaturas do ar.....	115
Figura 4.20 - Emissões de NO <sub>x</sub> em função de $\lambda$ para três temperaturas do ar .....	117
Figura 4.21 - Influência da temperatura de pré-aquecimento do ar nas emissões de NO <sub>x</sub> e CO .....	120
Figura 4.22 - Ocorrência de fuligem durante a operação com baixos excessos de ar .....	122
Figura A. 1 - Desenho da vista superior.....	138

Figura A. 2 - Vista superior .....	138
Figura A. 3 - Desenho da vista superior após a inclusão da camisa d'água .....	139
Figura A. 4 - Vista superior após a inclusão da camisa d'água .....	139
Figura A. 5 - Seção de corte A-A da vista lateral esquerda do sistema após a inclusão da camisa d'água .....	140
Figura A. 6 - Seção de corte A-A da vista lateral posterior do sistema após a inclusão da camisa d'água .....	140
Figura A. 7 - Detalhes do queimador principal e do queimador piloto .....	141
Figura A. 8 - Visualização dos componentes do sistema .....	141
Figura A. 9 - Medidores de vazão mássica (ou rotâmetros convencionais) .....	142
Figura A. 10 - Bomba de engrenagens .....	142
Figura A. 11 - Painel de controle dos periféricos .....	143
Figura A. 12 - Rotâmetro digital para medir a vazão de biodiesel no atomizador .....	143
Figura A. 13 - Posição do termopar do tipo K na parede da câmara .....	144
Figura A. 14 - Linha de exaustão da câmara .....	144
Figura A. 15 - Posição da sonda de amostragem de gases .....	145
Figura C. 1 - Linha de Grebel ajustada aos dados das emissões com o ar a 400°C .....	158
Figura C. 2 - Linha de Grebel ajustada aos dados das emissões com o ar a 600°C .....	159
Figura C. 3 - Linha de Grebel ajustada aos dados das emissões com o ar a 400°C e 600°C .....	159

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados experimentais das emissões gasosas obtidos em laboratório.....	87
Tabela 2 - Frações volumétricas totais de CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> , ambos em base seca.....	89
Tabela 3 - Parâmetros calculados para as condições experimentais .....	103
Tabela A. 1 - Características físicas e químicas do biodiesel .....	136
Tabela A. 2 - Dados experimentais das medidas de temperatura obtidos em laboratório .....	146

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
B.S.	Composição em base seca
CDC	Colorless Distributed Combustion
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
FDI	<i>Fuel Direct Injection</i>
FLOX	<i>Flameless Oxidation</i>
HiTAC	<i>High Temperature Air Combustion</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ISA	<i>The Instrumentation, Systems and Automation Society</i>
JHC	<i>Jet in Hot Coflow</i>
LCP	Laboratório de Combustão e Propulsão
LDA	<i>Laser Doppler Anemometry</i>
MILD	<i>Moderate or Intense Low Oxygen Dilution</i>
NBR	Normas Brasileiras
OH-PLIF	<i>Planar Laser-Induced Fluorescence Measurements of the Hydroxyl Radical</i>
PDA	<i>Phase Doppler Anemometry</i>
Ponto C	Ponto hipotético no qual a taxa de recirculação dos gases é máxima
Ponto O	Ponto hipotético no qual o jato começaria a arrastar a massa nas vizinhanças
Ponto P	Ponto hipotético no qual o jato colidiria com a parede da câmara
SMD	<i>Sauter Mean Diameter</i>
TA	Diâmetro interno do tubo auxiliar
TI	Diâmetro externo do tubo injetor antes da colocação da camisa d'água
TIE	Diâmetro externo do tubo injetor encamisado
UHC	<i>Unburnt Hydrocarbon</i> (hidrocarbonetos não queimados)



## LISTA DE SÍMBOLOS

### Caracteres latinos

$x$	direção axial
$r$	direção radial
$x_1, y_1, z_1, w$	número de carbonos, hidrogênios, oxigênios e nitrogênios, respectivamente, na fórmula química genérica $C_{x_1}H_{y_1}O_{z_1}N_w$
$x_0$	posição a partir da qual o jato começaria a arrastar os gases nas vizinhanças
$x_p$	posição na qual o jato colidiria com a parede da câmara
$x_c$	posição na qual a taxa de recirculação dos gases é máxima
$d_0$	diâmetro físico (ou real) do ejetor; diâmetro do injetor (ou atomizador)
$d_e$	diâmetro equivalente do ejetor
$u_0$	velocidade inicial do ar na linha de centro do ejetor na entrada da câmara
$\dot{m}_0$	vazão mássica inicial do fluido na entrada da câmara
$\dot{m}_r$	vazão mássica dos gases recirculados
$\dot{m}_j$	vazão mássica total do jato
$\dot{m}_f$	vazão mássica do jato de combustível (no inglês, <i>fuel</i> )
$\dot{m}_{ar}$	vazão mássica do jato de ar de combustão
$A_p$	área da seção transversal dos canais de entrada tangencial
$A_0$	área do orifício de saída do atomizador
$C_e$	coeficiente de arrastamento do jato
$C_1, C_2$	constantes, cujos valores são desconhecidos
$C_d$	coeficiente de descarga no atomizador
$D$	diâmetro interno da câmara de combustão
$D_i$	diâmetro médio de uma estreita faixa da distribuição de tamanhos de gotas
$D_{32}$	diâmetro médio de Sauter (SMD)
$D_s$	diâmetro da câmara swirl do atomizador mecânico-centrífugo do tipo cone oco
$d_l$	diâmetro (ou espessura) do fragmento líquido
$i$	indicação do componente (ou espécie química) na mistura gasosa
$y_i$	fração volumétrica (ou molar) do componente $i$ na mistura gasosa
$y_{O_2}$	fração volumétrica (ou molar) do oxigênio molecular na mistura gasosa
$J_0$	quantidade de movimento linear
$K_V$	coeficiente de recirculação interna dos produtos de combustão
$M_{ar}$	quantidade de movimento linear do ar imediatamente antes de entrar na câmara
$Ma$	número de Mach para a avaliação da compressibilidade do escoamento
$R^2$	coeficiente de correlação linear entre o modelo e os dados experimentais
$t_s$	espessura do filme líquido na saída do atomizador
$t_R$	tempo médio de residência dos gases no interior da câmara
$\langle T_g \rangle$	temperatura média dos gases no meio quiescente
$T$	temperatura em °C
$T_{ar}$	temperatura de pré-aquecimento do ar de combustão
$U_0$	velocidade do líquido na extremidade de saída do atomizador
$\dot{V}_{Biodiesel}$	vazão volumétrica do biodiesel no atomizador, calculada com base nas emissões de gases para o fechamento do balanço de massa
$X$	parâmetro adimensional
$Oh_d$	número de Ohnesorge

$We_g$  número de Weber

### Caracteres gregos

$\alpha$	ângulo de abertura do jato
$\alpha_{0,5}$	ângulo medido a partir da linha de centro do jato até a posição radial na qual a velocidade axial é igual à metade da velocidade na linha de centro do jato
$\beta$	coeficiente de deficiência de ar normalizado
$\lambda$	coeficiente de excesso de ar normalizado
$\rho_A$	massa específica do ar (ou gases) no meio gasoso
$\rho_L$	massa específica do líquido
$\rho_0$	massa específica do fluido na entrada da câmara
$\rho_\infty$	massa específica dos gases no meio quiescente
$\rho_g$	massa específica da fase gasosa na qual o jato líquido é desintegrado em gotas
$\sigma$	tensão superficial na interface líquido/gás
$v_l$	velocidade absoluta do fragmento líquido
$v_g$	velocidade absoluta dos gases no meio quiescente
$v_{ar}$	velocidade média do ar imediatamente antes de entrar na câmara
$\mu_L$	viscosidade dinâmica do líquido
$\phi$	razão global de equivalência da mistura entre o ar e o combustível
$\Delta N_i$	fração (ou percentagem) das gotas na distribuição, cujo diâmetro encontra-se em uma estreita faixa relativa ao valor médio $D_i$
$\Delta T$	diferença de temperatura calculada como resultado do balanço de energia
$\Delta P_L$	diferença de pressão na qual o líquido é submetido
$\theta$	metade do ângulo máximo de abertura do spray
$\cos \theta$	cosseno de $\theta$

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	19
1.1	Relevância, motivação e justificativa .....	22
1.2	Objetivos .....	25
1.3	Estrutura da dissertação .....	26
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	28
2.1	Aerodinâmica: teoria de jatos .....	28
2.1.1	Jatos livres.....	28
2.1.2	Jatos confinados e o fenômeno da recirculação interna.....	31
2.2	Atomização: teoria de gotas.....	34
2.2.1	Fundamentos .....	34
2.2.2	Atomizadores mecânicos-centrífugos .....	37
2.2.3	Biodiesel .....	40
2.3	Mecanismos de formação de óxidos de nitrogênio.....	42
2.4	Combustão sem chama visível.....	44
2.4.1	Histórico.....	44
2.4.2	Fundamentos da combustão sem chama visível .....	46
2.4.3	Pesquisas antecedentes com combustíveis líquidos.....	55
2.4.4	Efeitos dos parâmetros na combustão sem chama visível .....	57
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	61
3.1	Introdução .....	61
3.2	Metodologia.....	61
3.3	Técnicas de medida.....	62
3.4	Montagem do sistema de combustão .....	67
3.5	Procedimentos experimentais .....	79
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	86
4.1	Apresentação dos resultados experimentais .....	86
4.2	Determinação da composição média do combustível.....	88
4.3	Balancos de massa e energia.....	92
4.4	Determinação dos parâmetros de recirculação .....	95
4.5	Análise e discussão das emissões gasosas .....	102
4.5.1	Atomização do biodiesel.....	104

4.5.2	Efeitos do excesso de ar .....	113
4.5.3	Efeito da temperatura de pré-aquecimento do ar.....	120
4.5.4	Operação no regime de combustão convencional .....	122
5	CONCLUSÕES.....	123
	REFERÊNCIAS .....	126
	ANEXO – Certificação de qualidade Bio Brás Diesel Ltda .....	136
	APÊNDICE A – Imagens adicionais do sistema e dos periféricos .....	138
	APÊNDICE B – Equações para a análise de gases de combustão .....	147
	APÊNDICE C – Determinação da composição média do biodiesel .....	156
	APÊNDICE D – Balanços de massa e energia do processo de combustão .....	161



## 1 INTRODUÇÃO

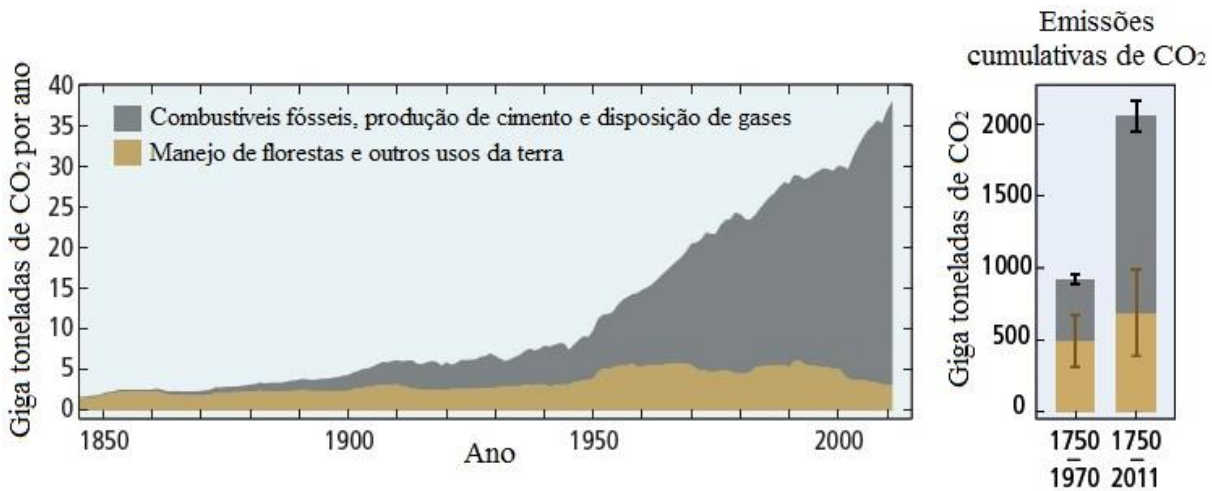
A energia, como uma grandeza física, pode ser definida como a capacidade que um sistema possui de realizar trabalho. Todas as atividades antrópicas envolvem o uso de energia, especialmente os processos de combustão, que convertem a energia química do combustível em energia térmica ou calor. A combustão é requerida para a obtenção de energia útil ao homem e para a manutenção do elevado padrão de consumo da sociedade moderna, em detrimento dos cuidados com a natureza, uma vez que muitos poluentes gasosos são emitidos no ambiente. Dentre eles, merecem destaque os gases causadores do efeito estufa e os óxidos de nitrogênio, referidos como  $NO_x$ .

Os raios solares de pequenos comprimentos de onda penetram na atmosfera e atingem a superfície da Terra, onde são refletidos e absorvidos. A superfície terrestre emite energia na forma de radiação infravermelha de maior comprimento de onda, em relação ao dos raios solares. Neste intervalo de comprimento de onda, os gases do efeito estufa absorvem a radiação térmica, impedindo o escape do calor para o espaço. Assim, os gases do efeito estufa reemitem o calor em todas as direções, mantendo aquecidas a superfície terrestre e as camadas inferiores da atmosfera. A queima de combustíveis fósseis, como: o gás natural, os derivados do petróleo e o carvão mineral, é responsável pela maior parte das emissões de gases do efeito estufa, que estão sendo acumulados na atmosfera desde a primeira revolução industrial até hoje, intensificando a retenção do calor. Como resultado, o agravamento do efeito estufa aumenta a temperatura média global, altera a distribuição de temperatura dos continentes e dos oceanos e provoca as mudanças climáticas (CLIMATE CHANGE: BASIC INFORMATION, 2015).

Os gases do efeito estufa são o dióxido de carbono ( $CO_2$ ), o metano ( $CH_4$ ), o óxido nitroso ( $N_2O$ ), os gases à base de flúor ( $F$  – gases), entre outros. Cada espécie química apresenta uma capacidade de absorver a energia térmica e um período de permanência na atmosfera, conforme informações coletadas da Agência Americana de Proteção ao Ambiente (UNDERSTANDING GLOBAL WARMING POTENTIALS, 2015). Na queima de combustíveis fósseis, resíduos sólidos e biomassa, o dióxido de carbono permanece na atmosfera por cerca de um século. Apesar de absorver mais energia do que o  $CO_2$ , o  $CH_4$  tem um período médio de permanência de cerca de uma década, enquanto que o  $N_2O$  permanece na atmosfera por mais de 100 anos. A Figura 1.1 indica o aumento das emissões globais e cumulativas de  $CO_2$  (em giga toneladas por ano) no período de 1850 a 2011. Nesta Figura, as maiores emissões de carbono ocorreram de 2000 a 2010, apesar das regras e acordos

estabelecidos para reduzir as mudanças climáticas. Além disso, quase metade das emissões cumulativas de  $CO_2$  entre 1750 e 2011 ocorreu nos últimos 40 anos, em virtude especialmente da queima de combustíveis fósseis, que contribuíram para triplicar as emissões de carbono entre 1970 e 2011, em comparação com o período de 1750 a 1970.

Figura 1.1 - Emissões globais e cumulativas de  $CO_2$  no período de 1850 a 2011



Fonte: (CLIMATE CHANGE 2014: SYNTHESIS REPORT, 2015)

A camada de ozônio é uma camada de gás ozônio ( $O_3$ ) localizada na estratosfera, que funciona como um escudo de proteção dos seres vivos, uma vez que absorve uma parcela da radiação ultravioleta existente nos raios solares. O aumento da incidência de raios ultravioletas causa prejuízos no cultivo de grãos e frutas, maior número de casos de câncer de pele e maior ocorrência de catarata nos humanos. Os  $F$ -gases, como os clorofluorcarbonetos, os hidroclorofluorcarbonetos, tetracloreto de carbono e metil clorofórmio, são as principais espécies responsáveis pela destruição da camada de ozônio, devido à liberação de átomos de cloro ou bromo, que consomem rapidamente o ozônio (BASIC OZONE LAYER SCIENCE, 2016). Segundo Glassman e Yetter (2008), os  $NO_x$  são gases que não apenas respondem pela destruição da camada de ozônio, mas também pela formação de *smog* fotoquímico e pela ocorrência de chuvas ácidas em grandes centros urbanos.

As mudanças climáticas são diversas: o aquecimento dos continentes e dos oceanos, a redução do tamanho das geleiras no Ártico e da quantidade de neve em países do hemisfério norte, o aumento do nível dos mares, a acidificação das águas oceânicas, alteração do regime de chuvas em macrorregiões, entre outras. A causa mais provável das mudanças climáticas é

as emissões crescentes de gases do efeito estufa, provenientes do uso indiscriminado das reservas naturais de carvão, petróleo e gás natural, para atender a demanda de energia alavancada pelos crescimentos econômico e populacional de muitos países nas últimas décadas. O quinto relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre mudanças climáticas (CLIMATE CHANGE 2014: SYNTHESIS REPORT, 2015) revelou que as emissões de dióxido de carbono oriundas da queima de combustíveis fósseis e das atividades industriais entre os anos de 1970 e 2010 contribuíram com cerca de 78% do aumento total das emissões de gases do efeito estufa.

As principais fontes emissoras de gases do efeito estufa são o setor industrial (o fornecimento de matéria-prima, a manufatura e a logística), o setor agrícola (as queimadas, o desmatamento e o manejo inadequado da terra), o setor de transporte (os veículos automotores), o setor residencial (o aquecimento térmico de residências no inverno), as atividades de geração de potência elétrica e calor e outras formas de produção de energia. Todos os setores econômicos de um país nos quais a energia é produzida ou consumida são referidos, como o setor energético. De acordo com a Agência Internacional de Energia (WORLD ENERGY OUTLOOK SPECIAL REPORT, 2015), o setor energético em escala mundial contribui com dois terços das emissões globais de gases do efeito estufa, considerando a geração e o consumo de energia, dando ênfase às maiores economias com base no potencial de crescimento econômico e na estimativa de crescimento demográfico.

A China é a maior produtora e consumidora de carvão, possui um mercado de gás natural maior do que o da União Européia e pode superar os Estados Unidos como a maior consumidora de petróleo até a década de 2030. No entanto, segundo estimativas da Agência Internacional de Energia, a economia chinesa poderá desacelerar o ritmo de expansão, limitando o consumo de carvão, mas as emissões de carbono estão previstas atingir um pico próximo de 2030. Por outro lado, a Índia está entrando em um período de modernização e rápido crescimento do consumo de energia e, assim, ocupará uma posição de destaque no mercado internacional como a economia de maior crescimento tanto do consumo de carvão e quanto da demanda de petróleo, em virtude dos investimentos em infraestrutura, da falta de acesso à eletricidade por 240 milhões de pessoas e da migração de 315 milhões para as zonas urbanas até 2040.

As fontes renováveis contribuem para reduzir as emissões de carbono e a dependência mundial pelas fontes fósseis. Apesar da desvalorização do petróleo evidenciada pelos baixos preços de mercado nos últimos anos, as fontes renováveis de energia representaram quase a metade dos novos sistemas de geração de potência no mundo em 2014. Com mais



investimentos em renováveis, a Agência Internacional de Energia prevê uma eventual desconexão na relação entre as emissões de carbono e as atividades econômicas, medidas pelo aumento da demanda de energia elétrica. Apesar disso, o cumprimento dos planos de ações de combate ao aquecimento global pelos países comprometidos, a substituição de equipamentos obsoletos e novos investimentos em tecnologias mais eficientes e menos poluidoras são necessários para descarbonizar o setor energético e minimizar o aumento da temperatura média do planeta nas próximas décadas. Portanto, o setor energético deverá investir em eficiência energética e em tecnologias de baixo carbono.

Neste cenário de grande preocupação com as emissões de carbono, a combustão sem chama visível é uma tecnologia promissora, que permite reduzir consideravelmente não apenas o consumo de combustíveis nos processos de combustão, em virtude do ganho de eficiência térmica, mas também as emissões de poluentes, como: os hidrocarbonetos não queimados (no inglês, *Unburned Hydrocarbon*) e os óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ).

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve por objetivo desenvolver uma bancada experimental em escala de laboratório para a queima de combustíveis líquidos, que seja capaz de operar em vários regimes, inclusive no regime de combustão sem chama visível, e visou também coletar e analisar os resultados das emissões de poluentes, como  $NO_x$  e  $CO$ , em condições típicas do regime de combustão sem chama visível com a queima de biodiesel.

O sistema desenvolvido permitiu estabelecer uma faixa de valores do coeficiente de recirculação interna dos gases com o aumento da vazão mássica de ar na entrada da câmara, podendo operar em vários regimes de combustão. As dimensões do queimador e da câmara foram avaliadas adequadas para atingir elevadas taxas de recirculação dos produtos de combustão e o sistema atendeu os requisitos necessários para operar em condições típicas do regime de combustão sem chama visível com a queima de biodiesel. Portanto, foi comprovada experimentalmente a possibilidade de estabilizar o regime de combustão sem chama visível com combustíveis líquidos, utilizando um atomizador de uso comercial, no interior de uma câmara de combustão fechada de paredes rígidas (um tubo de quartzo), em função dos efeitos aerodinâmicos do escoamento de ar na intensidade da recirculação dos gases de combustão.

Os experimentos com elevados excessos de ar ( $\lambda \geq 2,5$ ) e o pré-aquecimento do ar a  $600^\circ\text{C}$  revelaram que o comportamento do sistema é similar às características típicas do regime de combustão sem chama visível. As observações visuais indicaram que os contornos da chama não puderam ser distinguidos à vista desarmada e as paredes da câmara adquiriram a cor levemente amarelada. Os níveis de ruídos sonoros foram atenuados, as emissões de fuligem foram eliminadas e as emissões de  $NO_x$  e  $CO$  foram intensamente reduzidas.

Na operação com elevados excessos de ar e o ar pré-aquecido a  $500^\circ\text{C}$ , porém, foram observados focos de chama em duas posições no interior da câmara: nas proximidades do atomizador e na exaustão. Na região próxima do atomizador, a ocorrência dos focos de chama pode ser justificada pelas características do spray. As gotas de maior diâmetro no spray são pouco desviadas da trajetória inicial e se deslocam para regiões mais externas do spray, onde prevalece uma mistura pobre, devido ao movimento de recirculação dos gases de combustão em direção ao centro do spray. Na exaustão, os focos de chama ocorrem, em virtude da maior temperatura e da menor concentração de  $O_2$  no local, em relação à região de entrada de ar na câmara.

A taxa de oxidação do  $CO$  a  $CO_2$  foi favorecida pelo aumento da temperatura de pré-aquecimento do ar e intensificada pelo aumento da taxa de recirculação dos gases, em virtude

do aumento do excesso de ar ( $\lambda$ ). As emissões de  $NO_x$  tiveram uma tendência de aumento, à medida que o excesso de ar e a temperatura de pré-aquecimento de ar aumentaram.

A formação de  $NO_x$  pode ser explicada pelas características do spray e pelo movimento dos gases recirculados, que arrastam as gotas de menor diâmetro em direção ao centro do spray. Desse modo, o mecanismo de Fenimore pode ser ativado pela formação de uma pré-mistura entre os vapores de biodiesel e o  $O_2$  diluído no centro do spray, apesar de o sistema operar com elevados excessos de ar, conforme comprovada experimentalmente com chamas de etanol por Rodrigues et al (2015b). No entanto, o aumento das emissões de  $NO_x$  com o aumento da temperatura de pré-aquecimento do ar permitiu entender a ocorrência de picos de temperatura que, embora tenham sido atenuados pela elevada taxa de recirculação interna dos gases quentes na câmara, foram responsáveis pela formação de  $NO$  via mecanismo térmico.

Na operação com baixos excessos de ar, houve o aumento da luminosidade e do comprimento da chama, o escape da chama pela exaustão da câmara e a formação de fuligem. Essas observações são características típicas do regime de combustão convencional e foram utilizadas para estabelecer uma referência, a fim de distinguir comparativamente as características e as condições típicas do regime de combustão sem chama visível.

Com base no aprendizado adquirido e na interpretação dos resultados obtidos nos experimentos, algumas sugestões para trabalhos futuros foram elaboradas, a fim de colaborar com as investigações científicas sobre o regime de combustão sem chama visível e elucidar o comportamento do spray em condições típicas do regime de combustão sem chama visível.

- 1) Neste presente projeto, foi utilizado um tubo de quartzo de 5 mm de espessura de parede. Para evitar o dano físico causado ao quartzo, é recomendado o uso de um tubo de quartzo com 10 mm de espessura de parede;
- 2) Realização de experimentos, utilizando tubos auxiliares de diferentes diâmetros internos, a fim de alterar a velocidade de entrada de ar na câmara sem que haja a variação do coeficiente de excesso de ar normalizado;
- 3) Uso da técnica LDA (no inglês, *Laser Doppler Anemometry*) para medir o campo de velocidades do ar de combustão na entrada da câmara e o campo de velocidades dos gases de combustão em movimento de recirculação no interior da câmara, considerando a ausência e a presença do spray;
- 4) Uso da técnica PDA (no inglês, *Phase Doppler Anemometry*) para medir a distribuição de tamanhos (diâmetros) e o campo de velocidades das gotas no spray, considerando o spray frio (sem reações químicas de oxidação), o spray submetido ao regime de combustão convencional e o spray em condições típicas do regime de combustão sem

chama visível, utilizando o atomizador mecânico-centrífugo do tipo cone oco. Na literatura, foi publicado um artigo no qual os pesquisadores analisaram o comportamento do spray de biodiesel, em condições frias e em regime de combustão convencional, mas com o uso de um ancorador de chama do tipo swirl axial (CHONG e HOCHGREB, 2012; CHONG e HOCHGREB, 2015);

- 5) Uso da técnica de mapeamento do radical quimiluminescente hidroxila ( $OH^*$  *chemiluminescence*) com fluorescência induzida a laser ( $OH - PLIF$ , *Planar Laser-Induced Fluorescence*) para determinar o tamanho, a forma geométrica e a posição da zona de reação e identificar as zonas de altas temperaturas no interior da câmara de quartzo, respectivamente. O radical  $OH^*$  tem um período de vida muito curto em regiões, onde ocorre a liberação de calor pela oxidação;
- 6) Comparar o comportamento do spray de biodiesel com o comportamento do spray de diesel nas mesmas condições de operação, seja no regime convencional, seja no regime de combustão sem chama visível;
- 7) Fazer a modelagem com simulação numérica do sistema, utilizando dos métodos voltados para estudar o comportamento do spray no regime de combustão convencional e em condições típicas do regime de combustão sem chama visível.

**REFERÊNCIAS**

ARGHODE, V. K.; GUPTA, A. K. Development of high intensity CDC combustor for gas turbine engines. **Applied Energy**, London, v. 88, p. 963-973, jul. 2010.

ARGHODE, V. K.; GUPTA, A. K. Effect of flow field for colorless distributed combustion (CDC) for gas turbine combustion. **Applied Energy**, London, v. 87, p. 1631-1640, 2010.

ARGHODE, V. K.; GUPTA, A. K. Role of thermal intensity on operational characteristics of ultra-low emission colorless distributed combustion. **Applied Energy**, London, v. 111, p. 930-956, 2013.

ARGHODE, V. K.; GUPTA, A. K.; YU, K. H. Colorless Distributed Combustion (CDC): Effect of Flowfield Configuration. In: AEROSPACE SCIENCES MEETING INCLUDING THE NEW HORIZONS FORUM AND AEROSPACE EXPOSITION, **47th AIAA**. Orlando: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009. p. 01-16.

ARGHODE, V. K.; KHALIL, A. E. E.; GUPTA, A. K. Fuel dilution and liquid fuel operational effects on ultra-high thermal intensity distributed combustor. **Applied Energy**, London, v. 95, p. 132-138, 2012.

AYOUB, M.; ROTTIER, C.; CARPENTIER, S.; VILLERMAUX, C.; BOUKHALFA, A. M.; HONORÉ, D. An experimental study of mild flameless combustion of methane/hydrogen mixtures. **International Journal of Hydrogen Energy**, Oxford, v. 37, p. 6912-6921, 2012.

BASIC OZONE LAYER SCIENCE. **EPA United States Environmental Protection Agency**, 2016. Disponível em: <<https://www.epa.gov/ozone-layer-protection/basic-ozone-layer-science>>. Acesso em: 10 Fevereiro 2016.

BEÉR, J. M.; CHIGIER, N. A. **Combustion Aerodynamics**. [S.l.]: Halsted Press Division John Wiley & Sons, Inc., 1972. Chapter 2, 08-48 p.

BODEN, T. A.; G., MARLAND; R.J., ANDRES. Global, Regional and National Fossil-Fuel CO<sub>2</sub> Emissions. **CDIAC - Carbon Dioxide Information Analysis Center**, 2013. ISSN 10.3334/CDIAC/00001\_V2013. Disponível em:

<[http://cdiac.ornl.gov/CO2\\_Emission/timeseries/national](http://cdiac.ornl.gov/CO2_Emission/timeseries/national)>. Acesso em: 10 Fevereiro 2016.

CARVALHO JR., J. A.; MCQUAY, M. Q. **Princípios de Combustão Aplicada**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2007.

CAVALIERE, A.; JOANNON, M. D. Mild Combustion. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 30, p. 329-366, 2004.

CEREA, M.; DERUDI, M.; ROTA, R. **Preliminary Study on MILD Combustion Characteristics of a Liquid Biofuel**. XXXV Meeting of the Italian Section of the Combustion Institute. CIIRCO, Milano: [s.n.]. 2012. p. 1-6.

CHONG, C. T.; HOCHGREB, S. Spray Combustion Characteristics of Palm Biodiesel. **Combustion Science and Technology**, New York, v. 184, p. 1093-1107, 2012.

CHONG, C. T.; HOCHGREB, S. Spray and combustion characteristics of biodiesel: Non-reacting and reacting. **International Biodeterioration & Biodegradation**, Barking, v. 102, p. 353-360, aug. 2015.

CLIMATE CHANGE 2014: SYNTHESIS REPORT. **Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p., 2014. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/report/ar5/>>. Acesso em: 10 Fevereiro 2016.

CLIMATE CHANGE: BASIC INFORMATION. **EPA United States Environmental Protection Agency**, 04 November 2015. Disponível em: <<http://www3.epa.gov/climatechange/basics>>. Acesso em: 10 Fevereiro 2016.

CORREA, S. M. A Review of NO<sub>x</sub> Formation Under Gas-Turbine Combustion Conditions. **Combustion Science and Technology**, New York, v. 87, p. 329-362, 1992.

CORREIA RODRIGUES, H. R. **Spray Combustion in Moderate and Intense Low-Oxygen Conditions - An Experimental Study**. 2015. 182 p. Thesis - Technische Universiteit Delft, Delft, 2015.

COUTO, H. S.; LACAVALA, P. T.; BASTOS, D. N.; PIMENTA, A. P. Experimental Evaluation of Low Pressure-Swirl Atomizer Applied Engineering Design Procedure. **Journal of Propulsion and Power**, New York, v. 25, p. 358-364, apr. 2009.

CRESCI, E.; MILANI, A.; WUENNING, J. G. Recent developments and applications of flameless oxidation. **International Flame Research Foundation**, Livorno, p. 01-07, 2012.

CUI, Y. J.; LIN, Q. Z. Realization of Flameless Combustion of Liquid Fuel. **Advanced Materials Research**, Switzerland, v. 512-515, p. 2088-2092, 2012.

DALLY, B. B.; KARPETIS, A. N.; BARLOW, R. S. Structure of Turbulent Non-Premixed Jet Flames in a Diluted Hot Coflow. **Proceedings of the Combustion Institute**, New York, v. 29, p. 1147-1154, 2002.

DEMIRBAS, A. **Biodiesel. A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines**. Trabzon, Turkey: Springer-Verlag, 2008. 208 p.

DERUDI, M.; ROTA, R. Experimental study of the mild combustion of liquid hydrocarbons. **Proceedings of the Combustion Institute**, New York, v. 33, 2011. pp. 3325-3332.

EL\_HOSSAINI, M. K. Review of the New Combustion Technologies in Modern Gas Turbines. **Progress in Gas Turbine Performance**. [S.l.]: InTech, Cap. 6, p. 145-164, 2014.

FU, J.; TURN, S. Q.; TAKUSHI, B. M.; KAWAMATA, C. L. Storage and oxidation stabilities of biodiesel derived from waste cooking oil. **Fuel**, London, v. 267, p. 89-97, nov. 2015.

GÄRTNER, S. O.; REINHARDT, G. A. Environmental Implications of Biodiesel (Life-Cycle Assessment). In: KNOTHE, G.; GERPEN, J. V.; KRAHL, J. **The Biodiesel Handbook**. [S.l.]: AOCS Press, 2005. Cap. 08, p. 303.

GERRISH, H. C.; TESSMANN, A. M. **Relation of hydrogen and methane to carbon monoxide in exhaust gases from internal-combustion engines**. Report N° 476. Navy Building, Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office. p. 01-16, 1934.

GLASSMAN, I.; YETTER, R. A. Environmental Combustion Considerations. In: GLASSMAN, I.; YETTER, R. A. **Combustion**. Fourth Edition. ed. [S.l.]: Elsevier Inc., 2008. Cap. 08, p. 409-494.

GUETHE, F.; GARCÍA, M. D. L. C.; BURDET, A. Flue Gas Recirculation in Gas Turbine: Investigation of Combustion Reactivity and NO<sub>x</sub> Emission. **Proceedings of ASME Turbo Expo; Power for Land, Sea and Air**, Orlando, Florida, USA, p. 1-14, jun. 2009.

GUPTA, A. K.; BOLZ, S.; HASEGAWA, T. Effect of Air Preheat Temperature and Oxygen Concentration on Flame Structure and Emission. **Journal of Energy Resources Technology - Transactions of the ASME**, New York, v. 121, p. 209-216, sep. 1999.

HAN, D.; MUNGAL, M. G. Direct Measurement of Entrainment in Reacting/Nonreacting Turbulent Jets. **Combustion and Flame**, New York, v. 124, p. 370-386, 2001.

HASHIMOTO, N.; OZAWA, Y.; MORI, N.; YURI, I.; HISAMATSU, T. Fundamental combustion characteristics of palm methyl ester (PME) as alternative fuel for gas turbines. **Fuel**, London, v. 87, p. 3373-3378, jun. 2008.



HUANG, M.; ZHANG, Z.; SHAO, W.; XIONG, Y.; LIU, Y.; LEI, F.; XIAO, Y. Effect of air preheat temperature on the MILD combustion of syngas. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 86, p. 356-364, 2014.

JENNY, P.; ROEKAERTS, D.; BEISHUIZEN, N. Modeling of turbulent dilute spray combustion - Review. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 38, p. 846-887, jun. 2012.

KANDAKURE, M. T.; PATKAR, V. C.; PATWARDHAN, A. W. Characteristics of turbulent confined jets. **Chemical Engineering and Processing**, Lausanne, Suica, v. 47, p.1234-1245, 2008.

KHAVKIN, Y. I. **Theory and Practice of Swirl Atomizers**. [S.l.]: Taylor & Francis Books, 2004. 462 p.

KRUSE, S.; KERSCHGENS, B.; BERGER, L.; VAREA, E.; PITSCH, H. Experimental and numerical study of MILD combustion for gas turbine applications. **Applied Energy**, London, v. 148, p. 456-465, mar. 2015.

KULKARNI, M. G.; DALAI, A. K. Waste Cooking Oil - An Economical Source for Biodiesel: A Review. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Washington, v. 45, p. 2901-2913, 2006.

LACAVA, P. T.; ARGACHOY, C. Difração de luz para determinação da distribuição de tamanho de gotas. In: LACAVA, P. T.; MARTINS, C. A. **Métodos Experimentais de Análise Aplicados à Combustão**. Primeira Edição. ed. [S.l.]: Papel Brasil, 2010. Cap. V, 314 p.

LEFEBVRE, A. H. **Atomization and Sprays**. International Series. ed. [S.l.]: Hemisphere Publishing Corporation, 1989. 421 p.

LEFEBVRE, A. H.; BALLAL, D. R. **Gas Turbine Combustion. Alternative Fuels and Emissions**. Third Edition. ed. [S.l.]: CRC Press; Taylor & Francis Group, 2010. Chapter 6, 221-285 p.

LI, P.; MI, J.; DALLY, B. B.; WANG, F.; WANG, L.; LIU, Z.; CHEN, S.; ZHENG, C. Progress and recent trend in MILD combustion. **Science China Technological Sciences**, v. 54, p. 255-269, feb. 2011.

MALVERN INSTRUMENTS LIMITED. Malvern - Material relationships. **Spraytech - Accurate particle sizing for aerosols and sprays**, 2016. ISSN MRK0690-03. Disponível em: <[www.malvern.com/patents](http://www.malvern.com/patents)>. Acesso em: 10 Fevereiro 2016.

MEDWELL, P. R.; KALT, P. A. M.; DALLY, B. B. Simultaneous imaging of OH, formaldehyde, and temperature of turbulent nonpremixed jet flames in a heated and diluted coflow. **Combustion and Flame**, New York, v. 148, p. 48-61, 2007.

MEDWELL, P. R.; KALT, P. A. M.; DALLY, B. B. Reaction Zone Weakening Effects under Hot and Diluted Oxidant Stream Conditions. **Combustion Science and Technology**, New York, v. 181, n. 7, p. 937-953, 2009.

MEHTA, P. S.; ANAND, K. Estimation of a Lower Heating Value of Vegetable Oil and Biodiesel Fuel. **Energy and Fuels**, Washington, v. 23, p. 3893-3898, 2009.

MILANI, A.; SAPONARO, A. Diluted Combustion Technologies. **IFRF Combustion Journal**, n. 200101, p. 2-32, feb. 2001.

MULLINGER, P.; JENKINS, B. **Industrial and Process Furnaces - Principles, Design and Operation**. First Edition. ed. [S.l.]: Institute of Chemical Engineers - Elsevier Ltd, 2008.

NIESSEN, W. R. **Combustion and Incineration Processes. Applications in Environmental Engineering.** Fourth Edition. ed. Andover: CRC Press Taylor & Francis Group, 2010. Chapter 6, 199-246 p.

OMER, K.; ASHGRIZ, N. Part III Atomizers and Spray Generators. In: ASHGRIZ, N. **Handbook of Atomization and Sprays; Theory and Applications.** [S.l.]: Springer, 2011. Cap. 24, p. 547-556.

ÖZDEMİR, İ. B.; PETERS, N. Characteristics of the reaction zone in a combustor operating at mild combustion. **Experiments in Fluids**, Berlin, v. 30, oct. 2001. pp. 683-695.

PAZ, P. E. **Substituição do diesel usado nos queimadores industriais por álcool combustível.** 2007. 234 f. Tese - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

PLESSING, T.; PETERS, N.; WÜNNING, J. G. Laseroptical Investigation of Highly Preheated Combustion with Strong Exhaust Gas Recirculation. **Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion**, p. 3197-3204, 1998.

RAO, A. G.; LEVY, Y. A New Combustion Methodology for Low Emission Gas Turbine Engines. **HiTACG Conference, 8th**, Poznan, 5-8 jul. 2010.

REDDY, V. M.; KUMAR, S. Development of high intensity low emission combustor for achieving flameless combustion of liquid fuels. **Propulsion and Power Research**, New York, v. 2, n. 2, p. 139-147, 2013.

REDDY, V. M.; BISWAS, P.; GARG, P.; KUMAR, S. Combustion characteristics of biodiesel in high recirculation conditions. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 118, p. 310-317, 2014.

REDDY, V. M.; SAWANT, D.; TRIVEDI, D.; KUMAR, S. Studies on a liquid fuel based two stage flameless combustor. **Proceedings of the Combustion Institute**, New York, v. 34, p. 3319-3326, 2013.

RESOLUÇÃO CONAMA Nº 382/2006. **CONAMA Conselho Nacional do Meio Ambiente**, p. 131-137, Seção 1, 26 Dezembro 2006. ISSN 02000.000921/2002-78. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em: 10 Fevereiro 2016. Complementada pela Resolução nº 436 de 2011.

RODRIGUES, H. C.; TUMMERS, M. J.; VAN VEEN, E. H.; ROEKAERTS, D. J.E.M. Effects of coflow temperature and composition on ethanol spray flames in hot-diluted coflow. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, Guildford, v. 51, p. 309-323, 2015a.

RODRIGUES, H. C.; TUMMERS, M. J.; VAN VEEN, E. H.; ROEKAERTS, D. J.E.M. Spray flame structure in conventional and hot-diluted combustion regime. **Combustion and Flame**, New York, v. 162, p. 759-773, 2015b.

ROTTIER, C.; LACOUR, C.; GODARD, G.; TAUPIN, B.; PORCHERON, L.; HAUGUEL, R.; CARPENTIER, S.; BOUKHALFA, A. M.; HONORÉ, D. On the Effect of Air Temperature on Mild Flameless Combustion Regime of High Temperature Furnace. **Proceedings of the European Combustion Meeting**, p. 01-06, 2009.

SADANANDAN, R.; LÜCKERATH, R.; MEIER, W.; WAHL, C. Flame Characteristics and Emissions in Flameless Combustion Under Gas Turbine Relevant Conditions. **Journal of Propulsion and Power**, New York, v. 27, n. 5, p. 970-980, oct. 2011.

SUNAVALA, P. D.; HULSE, C.; THRING, M. W. Mixing and Combustion in Free and Enclosed Turbulent Jet Diffusion Flames. **Combustion and Flame**, New York, v.1, n. 2, p. 179-193, jun. 1957.

LACAVA, P. T. **Investigação experimental do enriquecimento do ar na incineração de resíduos aquosos**. 2000. 325 f. Tese - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2000.

THRING, M. W.; NEWBY, M. P. Combustion length of enclosed turbulent jet flames. **Fourth Symposium (International) on Combustion**, v. 4, n. 1, p. 789-796, 1953.

TORRESI, M.; CAMPOREALE, S. M.; FORTUNATO, B.; RANALDO, S.; MINCUZZI, M.; SAPONARO, A. Diluted combustion in a aerodynamically staged swirled burner fueled by diesel oil. **Processes and Technologies for a Sustainable Energy**, Ischia, p. 01-08, jun. 2010.

TSUJI, H.; GUPTA, A. K.; HASEGAWA, T.; KATSUKI, M.; KISHIMOTO, K.; MORITA, M. **High Temperature Air Combustion; From Energy Conservation to Pollution Reduction**. [S.l.]: CRC Press LLC, 2003.

URNS, S. R. **An Introduction to Combustion: Concepts and Applications**. Second Edition. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Higher Education, 2000. 676 p.

UNDERSTANDING GLOBAL WARMING POTENTIALS. **EPA United States Environmental Protection Agency**, 11 December 2015. Disponível em: <<http://www3.epa.gov/climatechange/ghgemissions/sources.html>>. Acesso em: 10 Fevereiro 2016.

VERÍSSIMO, A. S.; ROCHA, A. M. A.; COSTA, M. Operational, Combustion, and Emission Characteristics of a Small-Scale Combustor. **Energy and Fuels**, Washington, v. 25, p. 2469-2480, may 2011.

VERÍSSIMO, A. S.; ROCHA, A. M. A.; COSTA, M. Importance of the inlet air velocity on the establishment of flameless combustion in a laboratory combustor. **Experimental Thermal and Fluid Science**, New York, v. 44, p. 75-81, 2013.

WANG, X. F.; LEFEBVRE, A. H. Mean Drop Sizes from Pressure-Swirl Nozzles. **Journal of Propulsion and Power**, New York, v. 3, n. 1, p. 11-18, feb. 1987.

WARNATZ, J.; MAAS, U.; DIBBLE, R. W. **Combustion. Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation**. Fourth Edition. ed. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. 378 p.

WEBER, R.; SMART, J. P.; KAMP, W. V. On the (MILD) combustion of gaseous, liquid, and solid fuels in high temperature preheated air. **Proceedings of the Combustion Institute**, New York, v. 30, p. 2623-2629, 2005.

WU, S.-R.; CHANG, W.-C.; CHIAO, J. Low NO<sub>x</sub> heavy fuel oil combustion with high temperature air. **Fuel**, London, v. 86, p. 820-828, 2007.

WÜNNING, J. A.; WÜNNING, J. G. Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 23, p. 81-94, 1997.

WÜNNING, J. G.; MILANI, A. (Eds.). **Handbook of Burner Technology for Industrial Furnaces; Fundamentals, Burner and Applications**. Heat Processing. ed. Huysenallee: Vulkan-Verlag GmbH, 2009.

YAAKOB, Z.; MOHAMMAD, M.; ALHERBAWI, M.; ALAM, Z.; SOPIAN, K. Overview of the production of biodiesel from Waste cooking oil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 18, p. 184-193, 2013.

YE, J.; MEDWELL, P. R.; VAREA, E.; KRUSE, S.; DALLY, B. B.; PITSCH, H. G. An experimental study on MILD combustion of prevaporised liquid fuels. **Applied Energy**, London, v. 151, p. 93-101, 2015.