



Miguel Angel Alvarez Aquino

**Desenvolvimento de um queimador de gás natural para
estudos da combustão em escoamentos turbulentos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre em Engenharia
Mecânica pelo Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo
Co-Orientador: Prof. Luis Fernando Figueira da Silva

Rio de Janeiro, Dezembro de 2006



Miguel Angel Alvarez Aquino

Desenvolvimento de um queimador de gás natural para estudos da combustão em escoamentos turbulentos

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Luis Fernando Figueira da Silva

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Marcos Sebastião de Paula Gomes

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Pedro Teixeira Lacava

Departamento de Propulsão IEAC – ITA

Prof. Ângela Ourivio Nieckele

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de Dezembro de 2006

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Miguel Angel Alvarez Aquino

Graduou-se em Engenharia Mecânica e Elétrica na Universidad Nacional de Ingeniería – UNI, no Peru em 2000. Possui experiência profissional como Engenheiro de Planta Industrial na área de Operações e Manutenção em Usinas Termoeletricas, além de ter desenvolvido e executado projetos de instalação, operação e manutenção de equipamentos eletromecânicos referidos a sistemas termodinâmicos de caldeiros industriais e turbinas de vapor.

Ficha Catalográfica

Alvarez Aquino, Miguel Angel

Desenvolvimento de um queimador de gás natural para estudos da combustão em escoamentos turbulentos / Miguel Angel Alvarez Aquino ; orientador: Luis Fernando Alzuguir Azevedo ; co-orientador: Luis Fernando Figueira da Silva. – 2006.

155 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Queimador de gás natural. 3. Corpo rombudo. 4. Velocimetria. 5. Laser. 6. Doppler. 7. Imagem. 8. Partículas. I. Azevedo, Luis Fernando Alzuguir. II. Silva, Luis Fernando Figueira da. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Para minha mãe Maria e meu irmão Jorge, pelo apoio, estímulo e confiança
depositada à distância.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que fizeram possível a elaboração deste trabalho, em especial:

À minha família, à minha mãe Maria e meu irmão Jorge, pelo apoio e incentivo incondicional para realizar este curso de mestrado.

Aos professores Luis Fernando F. da Silva e Luis Fernando A. Azevedo pela dedicada orientação no desenvolvimento desta dissertação e pelo apoio durante o curso de mestrado.

Aos Professores membros da banca, pelos comentários e sugestões feitas.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, pelos momentos compartilhados e conselhos a nível acadêmico.

Aos meus amigos e colegas do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, e em especial a Julio M. Barros pelo apoio no laboratório de Termociências.

À CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Resumo

Alvarez Aquino, Miguel Angel; Azevedo, Luis Fernando Alzuguir; Silva, Luis Fernando Figueira da. **Desenvolvimento de um queimador de gás natural para estudos da combustão em escoamentos turbulentos**. Rio de Janeiro, 2006. 155p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho apresenta-se um estudo experimental de escoamentos turbulentos quimicamente inertes e reativos em um queimador tipo obstáculo. O objetivo principal é a caracterização do escoamento através da obtenção do campo de velocidade instantâneo utilizando técnicas óticas não intrusivas. As técnicas empregadas foram a Velocimetria Laser Doppler (LDV) e a Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV), as quais possibilitaram a medição das componentes transversal e longitudinal da velocidade do escoamento em estudo. Os resultados experimentais obtidos foram comparados com aqueles oriundos da simulação numérica usando um programa computacional existente. São analisados os acordos e as discrepâncias obtidas, colocando-se em evidência a capacidade e as limitações de cada uma das técnicas utilizadas.

Palavras-chave

Queimador Gás Natural; Corpo Rombudo; Velocimetria; Laser; Doppler; Imagem; Partículas.

Abstract

Alvarez Aquino, Miguel Angel Azevedo, Luis Fernando Alzuguir (Advisor); Silva, Luis Fernando Figueira da (Co-Advisor). **Development of a natural gas burner for the studies of combustion in turbulent flows.** Rio de Janeiro, 2006. 155p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents an experimental study of chemically inert and reactive turbulent flows in a Bluff-Body burner. The main objective is the characterization of the flow through of the measurement of instantaneous velocity fields by using non intrusive optical techniques. The techniques employed were Laser Doppler Velocimetry (LDV) and Particle Image Velocimetry (PIV), which makes possible the measurement of the transversal and longitudinal components of the flow velocity. The experimental results were compared with those obtained from a numerical simulation using a comercial computational program. The agreements and discrepancies obtained between the two experimental techniques and from experiments and computation were demonstrated and analized.

Key Words

Natural Gas Burner; Bluff Body; Velocimetry; Laser; Doppler; Particle; Imaging.

Sumário

1. Introdução	21
2. Considerações teóricas e revisão bibliográfica	26
2.1. Estudo dos escoamentos de jato livre	26
2.2. Revisão bibliográfica	28
3. Metodologia experimental	43
3.1. Projeto da instalação experimental	43
3.1.1. Sistema de alimentação de gás natural (GNV) e Nitrogênio	49
3.1.2. Sistema de alimentação de ar	50
3.1.3. Sistema de controle do processo: equipamentos e medidores	52
3.1.4. Sistema de geração das partículas traçadoras	55
3.1.5. Sistema de exaustão de gases poluentes	58
3.1.6. Sistema do queimador e túnel de vento	60
3.1.7. Sistemas laser de medição não intrusiva	60
3.2. Velocimetria Laser Doppler – LDV	63
3.2.1. Componentes principais do sistema LDV	64
3.2.2. Características ópticas do volume de medição	66
3.2.3. Procedimento experimental para medição LDV	70
3.2.4. Análise de incertezas experimentais	73
3.2.4.1. Definição e classificação das incertezas experimentais	73
3.2.4.2. Incerteza dos resultados e sua propagacao	75
3.2.4.3. Incertezas da instalação experimental usando LDV	76
3.2.4.3.1. Fontes de incerteza sistemática da instalação experimental	76
3.2.4.3.2. Fontes de incerteza aleatória da instalação experimental	77
3.2.4.4. Procedimento de cálculo das incertezas experimentais	78
3.2.4.4.1. Determinação da incerteza do número de Reynolds experimental	79
3.2.4.4.2. Determinação da incerteza da velocidade média e	

intensidade turbulenta	81
3.3. Velocimetria por imagem de partículas (PIV)	82
3.3.1. Definição do princípio de operação	82
3.3.2. Principais componentes do PIV	84
3.3.2.1. Sistema de iluminação	85
3.3.2.2. Sistema de captação de imagens	87
3.3.2.3. Sistema de análise, processamento e visualização de dados	88
3.3.3. Procedimento experimental para medição PIV	88
3.3.4. Pós-processamento do campo de velocidade	92
4. Metodologia numérica	94
4.1. Domínio e malha computacional utilizado	94
4.2. Formulação dos modelos matemáticos utilizados	97
4.2.1. Equações básicas de conservação	97
4.2.2. Equações básicas para modelagem da turbulência	98
4.2.2.1. Modelo de turbulência $k-\varepsilon$	101
4.2.2.2. Modelo de turbulência Transporte de Tensão Cisalhante-SST	101
4.3. Condições de contorno e iniciais	102
4.4. Metodologia numérica de discretização da malha	103
5. Análise de resultados e discussões	105
5.1. Caracterização e visualização do escoamento	106
5.2. Resultados experimentais obtidos com a técnica de medição LDV	112
5.2.1. Escoamento de jato livre	113
5.2.2. Escoamento de jato com obstáculo	118
5.3. Resultados experimentais obtidos com a técnica de medição PIV	122
5.4. Resultados da simulação numérica	130
5.4.1. Simulação numérica do jato livre	131
5.4.2. Simulação numérica do jato com obstáculo	134
5.5. Análise comparativa do escoamento com obstáculo	136
5.5.1. Distribuição longitudinal da velocidade média e intensidade turbulenta ao longo do eixo de simetria	137
5.5.2. Distribuição radial da velocidade média e intensidade turbulenta	

para diversos deslocamentos longitudinais	140
6. Conclusões e perspectivas	150
7. Referências bibliográficas	154

Lista de figuras

Figura 1.1 - Fotografia do queimador tipo obstáculo, operando em regime turbulento com velocidade média do jato central de GNV de 51 m/s ($Re=7235$) e do ar anular de 1,5 m/s.	22
Figura 1.2 - Resultados experimental e numérico das zonas encontradas em chamas turbulentas estabilizadas em queimadores tipo obstáculo [7].	23
Figura 1.3 - Representação esquemática do queimador tipo obstáculo com uma chama turbulenta livre [10].	24
Figura 2.1 - Imagens de concentração de um jato turbulento: (a) $Re=5000$ e (b) $Re=2000$, usando a técnica de dispersão de Mie [21].	26
Figura 2.2 - Jato livre axi-simétrico se propagando num meio constituído pelo mesmo fluido produzindo o efeito "entrainment".	27
Figura 2.3 - Campo vetorial de velocidade média para: (a) inerte e (b) reativo, segundo estudo de Schefer et al. [26]	32
Figura 2.4 - Distribuição instantânea de partículas de alumina inseridas no jato central estabilizado, para escoamentos com obstáculo: (a) inerte e (b) reativo [26].	33
Figura 2.5 - Distribuição instantânea de partículas de alumina inseridas no jato central, para chamas de: (a) jato livre e (b) jato com obstáculo [27].	34
Figura 2.6 - Comparação esquemática da interação entre o jato central e o vórtice conduzido de ar em escoamentos de chamas dominadas pelo jato central para queimadores tipo: (a) obstáculo e (b) ciclone [7].	36
Figura 2.7 - Representação comparativa da interação de chamas fortemente recirculantes entre o jato central e o vortice conduzido de ar em queimadores tipo: (a) obstáculo e (b) ciclone [7].	36
Figura 2.8 - Esquema da instalação confinada, condições de ingresso e regiões da chama estudada no trabalho experimental e numérico de	

Correa et al. [7].	37
Figura 2.9 - Regiões da chama turbulenta não pré-misturada observadas no estudo experimental de Dally et al. [10].	41
Figura 3.1 - Diagrama da seção transversal do queimador mostrando as características geométricas de construção.	44
Figura 3.2 - Principais componentes da instalação experimental.	48
Figura 3.3 - Vista frontal da montagem do painel do sistema de suprimento e controle de gás (GNV e Nitrogênio).	50
Figura 3.4 - Sistema de suprimento de ar anular usando ventilador modelo Sirocco.	51
Figura 3.5 - Painel de controle dos equipamentos.	52
Figura 3.6 - Painel de controle do escoamento: medidores analógicos.	53
Figura 3.7 - Diagrama elétrico do painel de controle.	55
Figura 3.8 - Gerador de partículas de óleo tipo "Laskin Nozzle"[22].	56
Figura 3.9 - Fotografia do resultado da granulometria MEV das partículas de TiO_2 feita pelo Laboratório de Ensaios de Materiais da UNPA - CT Gás.	57
Figura 3.10 - Cilindro de Polipropileno tipo ciclone para suprimento das partículas traçadoras ao processo.	58
Figura 3.11 - Montagem do sistema de exaustão de gases poluentes.	59
Figura 3.12 - Vista da seção transversal da montagem do queimador e túnel de vento.	60
Figura 3.13 - Vista geral da instalação experimental para medição LDV.	62
Figura 3.14 - Representação esquemática do princípio básico de funcionamento do sistema LDV.	63
Figura 3.15 - Esquema de identificação dos componentes do sistema LDV [13].	65
Figura 3.16 - Definição das principais características ópticas de feixes laser LDV [14].	67
Figura 3.17 - Esquema de deslocamento de franjas no volume de medição da técnica de frequência de desvio (Frequency shift) no sistema LDV [13].	68

Figura 3.18 - Definição esquemática da incerteza total de medição δ_i , associada a uma grandeza X e composta por uma parcela aleatória ε_i e outra sistemática β .	74
Figura 3.19 - Princípio de medição do campo de velocidade usando a técnica laser PIV.	83
Figura 3.20 - Esquema de funcionamento do sistema de medição PIV.	84
Figura 3.21 - Principais componentes do sistema PIV montado na instalação experimental.	85
Figura 3.22 - Geometria do plano de luz formado pelas lentes [2].	86
Figura 3.23 - Diagrama de sincronização da câmera PIVCAM 10-30 e Power View Plus 4 MP com atirador de dobro exposição.	87
Figura 3.24 - Imagem das partículas traçadoras seguindo ao escoamento de jato com obstáculo obtida na medida PIV.	90
Figura 4.1 - Dominio computacional e condições de contorno.	96
Figura 4.2 - Malha computacional refinada na região próxima á fase do queimador.	96
Figura 5.1 - Instalação experimental usando a técnica LDV.	107
Figura 5.2 - Instalação experimental usando a técnica PIV.	107
Figura 5.3 - Visualização do plano central do escoamento por dispersão Mie, utilizando como traçador gotas de óleo apenas na região anular de 1 μm de diâmetro.	108
Figura 5.4 - Visualização do plano central do escoamento por dispersão Mie, utilizando partículas traçadoras no jato central e no ar anular.	108
Figura 5.5 - Imagens do queimador em regime laminar de combustão, jato livre operando com número de Reynolds do GNV de (a) 1116, (b) 2260 e (c) 3425.	110
Figura 5.6 - Imagens do queimador em regime turbulento de combustão, jato livre operando com número de Reynolds do GNV de (a) 4667, (b) 5900 e (c) 7212.	111
Figura 5.7 - Imagens do queimador em regime laminar de combustão, jato central e ar anular operando com número de Reynolds do GNV de (a) 1105, (b) 2233 e (c) 3420.	111

Figura 5.8 - Imagens do queimador em regime turbulento de combustão, jato central e ar anular operando com número de Reynolds do GNV de (a) 4660, (b) 5917 e (c) 7235.	112
Figura 5.9 - Posicionamento do volume de medição no plano axi-simétrico em $X/D_j=1$, usando a evolução da velocidade média longitudinal (U) nos eixos radiais r e r' .	113
Figura 5.10 - Evolução da velocidade média longitudinal (U) ao longo da direção longitudinal.	114
Figura 5.11 - Distribuição radial de velocidade média na direção longitudinal (U) para diferentes valores da coordenada longitudinal.	115
Figura 5.12 - Distribuição radial de velocidade média na direção transversal (V) para diferentes valores da coordenada longitudinal.	116
Figura 5.13 - Distribuição radial da intensidade turbulenta na direção longitudinal (u'/U_j) para diferentes valores da coordenada longitudinal.	117
Figura 5.14 - Distribuição radial da intensidade turbulenta na direção transversal (v'/U_j) para diferentes valores da coordenada longitudinal.	117
Figura 5.15 - Posicionamento do volume de medição no plano axi-simétrico em $X/D_j=1$, usando a evolução da velocidade média longitudinal (U) nos eixos radiais r e r' .	118
Figura 5.16 - Comparação da evolução da velocidade média longitudinal (U) ao longo da direção longitudinal do escoamento do jato com obstáculo e do jato livre.	119
Figura 5.17 - Distribuição radial de velocidade média na direção longitudinal (U) para diferentes valores da coordenada longitudinal.	120
Figura 5.18 - Distribuição radial de velocidade média na direção transversal (V) para diferentes valores da coordenada longitudinal.	120
Figura 5.19 - Distribuição radial da intensidade turbulenta na direção longitudinal (u'/U_j) para diferentes valores da coordenada longitudinal.	121
Figura 5.20 - Distribuição radial da intensidade turbulenta na direção transversal (v') para diferentes valores da coordenada longitudinal.	122
Figura 5.21 - Campo instantâneo de vetores velocidade para um intervalo de tempo entre pulsos (ΔT): (a) $5 \mu s$ e (b) $80 \mu s$.	123
Figura 5.22 - Contornos do módulo da velocidade média (m/s) com	

linhas de corrente para o escoamento do jato com obstáculo, Re=3970.	124
Figura 5.23 - Contornos de velocidade média transversal – V (m/s), Re=3970.	126
Figura 5.24 - Contornos de velocidade turbulenta r.m.s. na direção longitudinal – u' (m/s), com $\Delta T=5 \mu s$ e Re=3970.	126
Figura 5.25 - Contornos de velocidade turbulenta r.m.s. na direção transversal – v' (m/s), com $\Delta T=5 \mu s$ e Re=3970.	127
Figura 5.26 - Distribuição radial de velocidade média na direção longitudinal (U) para diferentes valores da coordenada longitudinal e $\Delta T=5 \mu s$.	128
Figura 5.27 - Distribuição radial de velocidade média na direção transversal (V) para diferentes valores da coordenada longitudinal e $\Delta T=80 \mu s$.	128
Figura 5.28 - Distribuição radial da intensidade turbulenta na direção longitudinal (u'/U_j) para diferentes valores da coordenada longitudinal e $\Delta T=5 \mu s$.	129
Figura 5.29 - Distribuição radial da intensidade turbulenta na direção transversal (v'/U_j) para diferentes valores da coordenada longitudinal e $\Delta T=5 \mu s$.	130
Figura 5.30 - Histórico de convergência de valores RMS do resíduo das equações de transporte de massa e de quantidade de momento para jato livre inerte.	131
Figura 5.31 - Histórico de convergência de valores RMS do resíduo das equações do modelo de turbulência SST para jato livre inerte.	132
Figura 5.32 - Linhas de corrente baseadas na velocidade média no caso do escoamento para jato livre inerte.	133
Figura 5.33 - Vetores velocidade média para jato livre inerte.	133
Figura 5.34 - Histórico de convergência de valores RMS do resíduo das equações de transporte de massa e de quantidade de momento para jato inerte com obstáculo.	134
Figura 5.35 - Histórico de convergência de valores RMS do resíduo das equações do modelo de turbulência SST para jato inerte com	

obstáculo.	135
Figura 5.36 - Linhas de corrente baseadas na velocidade média no caso do escoamento para jato inerte com obstáculo.	135
Figura 5.37 - Vetores velocidade média para jato inerte c/obstáculo.	136
Figura 5.38 - Comparação da evolução da velocidade média longitudinal (U) ao longo da direção longitudinal.	137
Figura 5.39 - Comparação da evolução da intensidade turbulenta na direção longitudinal (u'/U_j) ao longo da direção longitudinal.	138
Figura 5.40 - Comparação da evolução da intensidade turbulenta na direção transversal (v'/U_j) ao longo da direção longitudinal.	139
Figura 5.41 - Comparação de resultados PIV, LDV e CFD das distribuições radiais da velocidade média longitudinal (U/U_j) para diferentes deslocamentos longitudinais (x/D_j).	141
Figura 5.42 - Comparação de resultados PIV, LDV e CFD das distribuições radiais da velocidade média transversal (V/U_j) para diferentes deslocamentos longitudinais (x/D_j).	143
Figura 5.43 - Comparação de resultados PIV, LDV e CFD das distribuições radiais da intensidade turbulenta longitudinal (u'/U_j) para diferentes deslocamentos longitudinais (x/D_j).	145
Figura 5.44 - Comparação de resultados PIV, LDV e CFD das distribuições radiais da intensidade turbulenta transversal (v'/U_j) para: (a) $x/D_j=1$, (b) $x/D_j=5$, (c) $x/D_j=10$, (d) $x/D_j=15$ e (e) $x/D_j=20$.	147

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Tabela cronológica de referências bibliográficas dos principais estudos desenvolvidos sobre escoamentos turbulentos em queimadores tipo obstáculo.	30
Tabela 3.1 - Estimação dos regimes de operação do jato central de GNV.	45
Tabela 3.2 - Regimes de operação de o ar anular fornecido pelo ventilador.	46
Tabela 3.3 - Diferenças entre as duas técnicas de medição laser.	62
Tabela 3.4 - Características óticas das lentes e do volume de medição do laser LDV.	72
Tabela 3.5 - Valores de configuração das frequências de desvio radial (F_{s-r}) dos feixes laser de cor verde no caso de jato livre.	73
Tabela 3.6 - Tamanhos das janelas de correlação cruzada usadas para o processamento das imagens, com deslocamento máximo de 8 pixels.	91
Tabela 4.1 - Resumo das configurações realizadas nas condições de contorno com o software CFX10.	103
Tabela 5.1 - Regimes de operação do queimador em presença de combustão.	109

Nomenclatura

a	Excesso de ar
b	Largura transversal do jato livre [m]
C_μ	Constante do modelo de turbulência κ - ε
C_V	Calor específico a volume constante [m^2/s^2 -K]
d	Distância de espaçamento entre feixes [m]
d_f	Espaçamento das franjas [m]
dx	Deslocamento da partícula na direção x no sistema PIV [m]
dy	Deslocamento da partícula na direção y no sistema PIV [m]
D	Diâmetro de saída [m]
D'_{e-2}	Diâmetro do feixe laser [m]
D_B	Diâmetro do queimador tipo obstáculo [m]
D_C	Diâmetro do duto circular [m]
D_m	Diâmetro médio do volume de medição [m]
e_i	Energia interna específica [kJ/kg]
f	Comprimento focal da lente [m]
F_s	Frequência de desvio do laser [Hz]
F_o	Frequência Doppler da partícula [Hz]
H	Entalpia total específica [kJ/kg]
k	Energia cinética turbulenta [m^2/s^2]
L	Comprimento de mistura turbulenta [m]
L_C	Comprimento característico do movimento turbulento [m]
L_m	Comprimento médio do volume de medição [m]
\dot{m}	Vazão mássica [kg/s]
N	Número total de ciclos da partícula
N_i	Número efetivo de franjas atravessando a partícula
N_F	Número de franjas no volume de medição
N_{FR}	Número máximo de franjas
N_T	Tamanho da amostra
P, p	Pressão manométrica [Pa]
p'	Pressão modificada [Pa]

P_c	Potência máxima do queimador [kW]
Pr_t	Número de Prandtl turbulento
PC_s	Poder calorífico superior do combustível GNV [kJ/kg]
\vec{q}	Vetor fluxo de calor [kW/m ²]
r	Coordenada radial ou transversal [m]
r'	Coordenada radial ortogonal a r [m]
R	Relação empírica resultante de medição
R_g	Constante universal dos gases [kJ/kmol-K]
Re	Número de Reynolds
t	Tempo [s]
t_s	Parâmetro para distribuição Student
T	Temperatura [K]
T_t	Tempo de trânsito da partícula no volume de medição [s]
x	Coordenada longitudinal [m]
u	Flutuação da velocidade na direção longitudinal [m/s]
u', u_{rms}	Velocidade longitudinal turbulenta r.m.s. [m/s]
u_o'	Velocidade longitudinal turbulenta r.m.s. na linha de centro
U	Velocidade média de saída [m/s]
\vec{u}	Vetor velocidade [m/s]
U_a	Velocidade média do ar anular [m/s]
\overline{U}	Velocidade média longitudinal [m/s]
$\overline{U_o}$	Velocidade média longitudinal na linha de centro [m/s]
v	Flutuação da velocidade na direção transversal [m/s]
v', v_{rms}	Velocidade transversal turbulenta r.m.s. [m/s]
\dot{V}	Vazão volumétrica [m ³ /s]
\overline{V}	Velocidade média transversal [m/s]
V_C	Velocidade característica do movimento turbulento [m/s]
V_o	Velocidade genérica da partícula no volume de medição
w	Flutuação da velocidade na direção circunferencial [m/s]
\overline{W}	Velocidade média circunferencial [m/s]
X	Variável ou grandeza medida

Letras gregas

β	Erro sistemático ou fixo
δ_i	Incerteza total de medição
δ_{ij}	Delta de Kronecker
Δx_i	Posição do volume de medição [m]
$\Delta t, \Delta T$	Tempo entre dois pulsos laser [s]
ε	Taxa de dissipação de energia cinética turbulenta [m^2/s^3]
ε_i	Erro aleatório ou de precisão
ϕ	Componente média de um propriedade do escoamento
ϕ'	Componente flutuante de uma propriedade genérica
γ	Razão de calores específicos
κ	Ângulo metade do cruzamento de feixes laser [°]
λ	Comprimento da onda de luz laser [nm]
λ_t	Condutividade térmica [$kg - m/s^3 - K$]
μ	Viscosidade dinâmica [$kg/m-s$]
μ_l	Viscosidade molecular [$kg/m-s$]
μ_t	Viscosidade turbulenta [$kg/m-s$]
ν	Viscosidade cinemática [m^2/s]
θ	Coordenada circunferencial
θ_p	Ângulo de desvio da partícula [°]
ρ	Densidade do fluido [kg/m^3]
τ	Tensor de tensões viscosas [$kg/m-s^2$]
σ	Desvio padrão de uma distribuição estatística
ω	Frequência turbulenta [s^{-1}]

Subscritos

ar	Ar ambiental ou anular
GNV	Gás natural veicular
i, j	Índices direcionais do tensor de tensões