

5 Análise de resultados e discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos regimes de jato livre e jato central com ar anular. A caracterização experimental do escoamento inerte de ar é realizada usando as técnicas LDV e PIV. De maneira clássica, os resultados são apresentados em diagramas de componentes adimensionais de velocidade no plano de simetria do experimento, os quais são normalizados pela velocidade média de saída do jato central, U_j . As distâncias são normalizadas pelo diâmetro do jato central, D_j . Os resultados experimentais são comparados com as tendências da simulação numérica usando o programa computacional Ansys/CFX10 e dados disponíveis na literatura. Isto é feito com o intuito de apresentar uma visão geral da estrutura do escoamento resultante da interação entre o jato central e o ambiente.

Na **seção 5.1** são apresentadas imagens que mostram os regimes de operação do queimador em presença de combustão. Também é mostrada a montagem experimental operando com escoamento inerte usando as técnicas LDV e PIV. Por fim, a estrutura do escoamento inerte é discutida a partir de imagens obtidas usando a técnica de visualização de difusão Mie, a qual usa partículas traçadoras que acompanham o fluido e são iluminadas por um plano de luz laser.

Nas **seções 5.2 e 5.3** são discutidos os resultados da investigação experimental com jato livre e jato com obstáculo, com foco na análise do escoamento inerte e turbulento para um único regime de operação. São comparados os resultados obtidos para as duas técnicas laser, LDV e PIV. Na **seção 5.4**, é apresentada uma comparação entre resultados experimentais e numéricos. Devido à limitação de tempo disponível não foi possível realizar uma investigação de outros regimes de maior intensidade turbulenta. O estudo do escoamento reativo em presença de combustão foi deixado para uma etapa futura.

Assim, as principais características geométricas e de escoamento comuns aos resultados obtidos que serão apresentados neste capítulo são:

- Diâmetro do jato central, $D_j=2$ mm, diâmetro do obstáculo, $D_B=36$ mm e o diâmetro do ar anular igual a $D_a=200$ mm.
- Número de Reynolds para o jato central de $Re_j=3870$, o que corresponde a uma velocidade média de $U_j=27,5$ m/s, velocidade média do ar anular de 1,5 m/s, sendo este valor obtido na condição máxima de operação do ventilador.
- A temperatura média do ambiente dos testes experimentais foi aproximadamente de 20 °C e a umidade relativa média de 64 %.

Embora o número de casos analisados seja limitado, o volume de resultados gerado é considerável, pois procurou-se varrer a região do jato próxima à saída com um número de pontos de medição suficiente para caracterizar em detalhe o processo de mistura entre o jato e o seu entorno. Esta caracterização é feita tanto em termos de velocidade média quanto da intensidade turbulenta.

5.1

Caracterização e visualização do escoamento

Na **Figura 5.1** é apresentada a montagem experimental para o caso da utilização da técnica LDV. Nesta figura vê-se claramente quando as partículas que atravessam os feixes de luz laser e, em particular, o volume de medição, aumentam a intensidade da luz observada. Também pode ser verificado que os feixes de luz laser têm dois pares de cores, os de cor azul correspondem à medição da componente vertical da velocidade e os de cor verde à medição da componente horizontal.

Na **Figura 5.2** se apresenta a montagem da instalação para a técnica PIV. A fonte de luz laser está localizada sobre a mesa, a uma distância de 500 mm do centro do queimador.

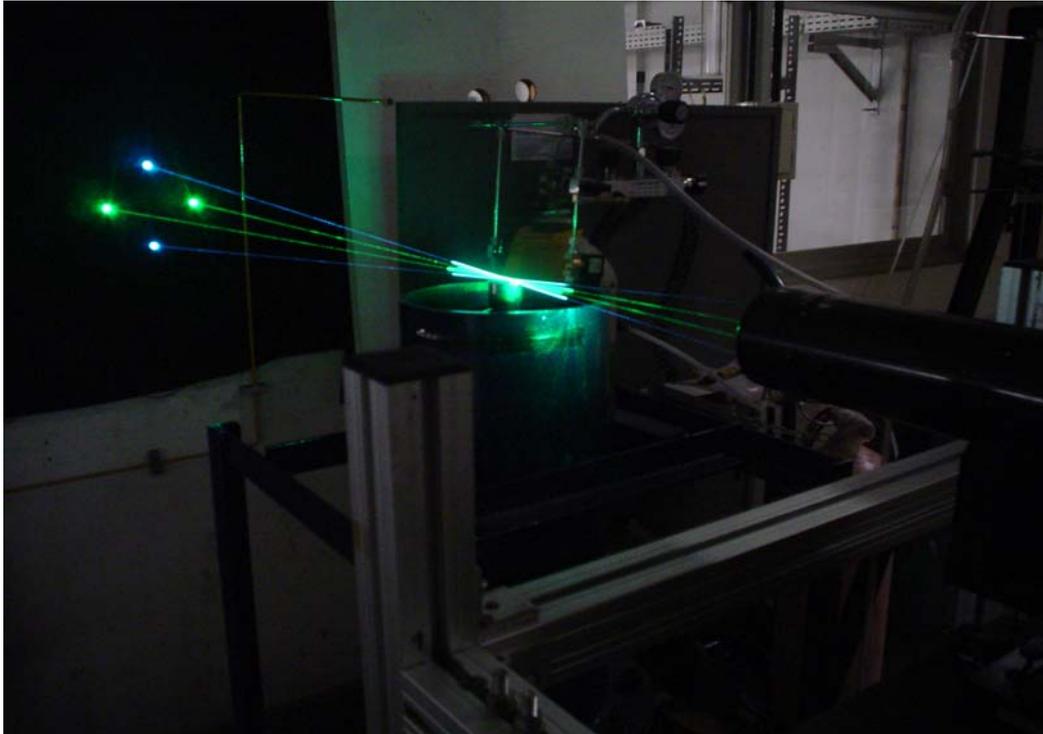


Figura 5.1 – Instalação experimental operando com a técnica LDV.

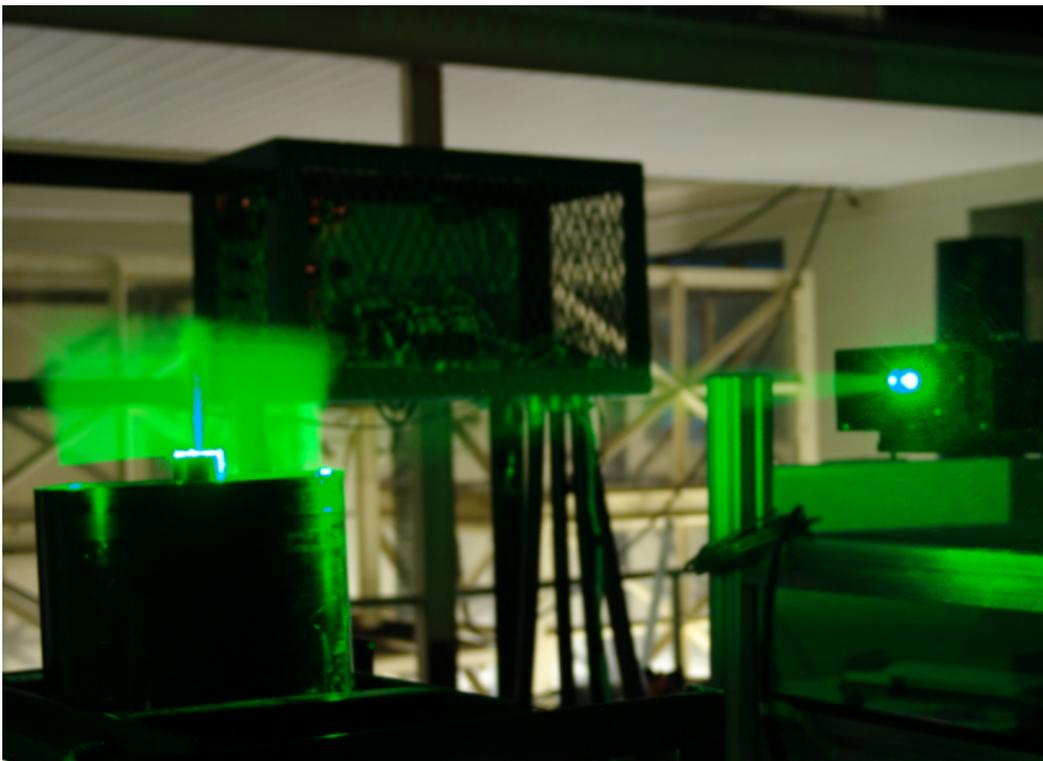


Figura 5.2 – Instalação experimental operando com a técnica PIV.

A visualização do escoamento inerte com obstáculo mostrada nas **Figuras 5.3 e 5.4** foi realizada usando a técnica de dispersão Mie de luz laser e fotografia de imagens instantâneas com um tempo de exposição longo utilizando-se uma câmera digital. O plano de luz laser Nd:YAG, que produz a iluminação das

partículas traçadoras apresentava uma frequência de pulsação de 15 Hz e espessura de 0,2 mm.

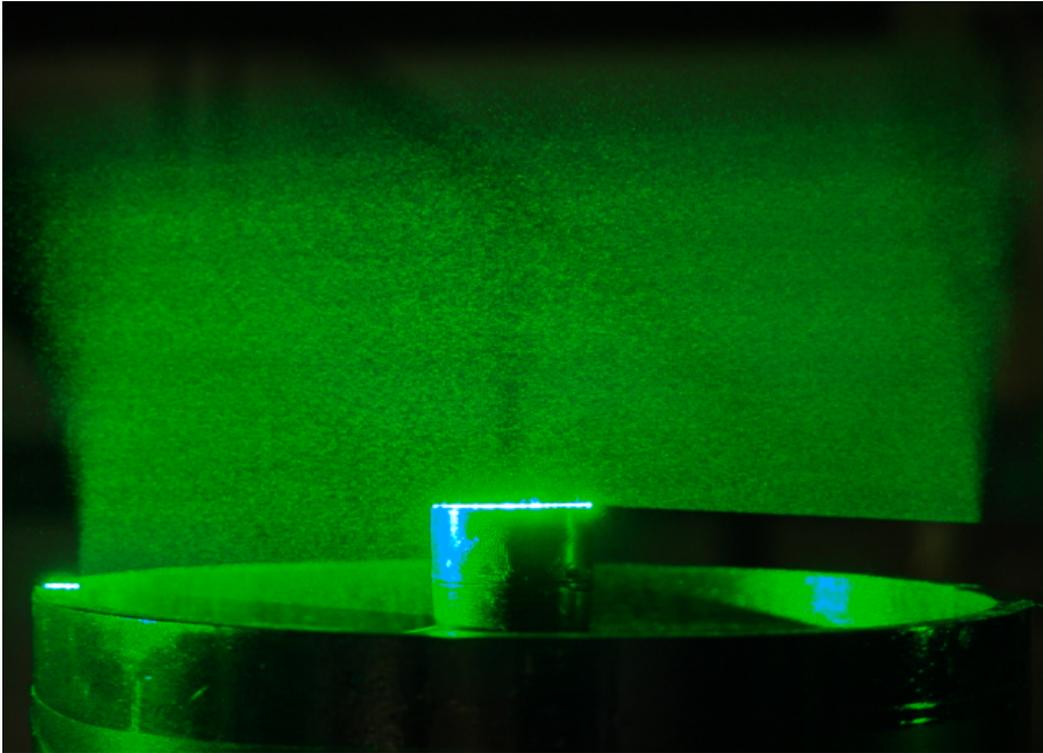


Figura 5.3 – Visualização do plano central do escoamento por dispersão Mie, utilizando como traçador gotas de óleo de 1 μm de diâmetro apenas na região de anular.

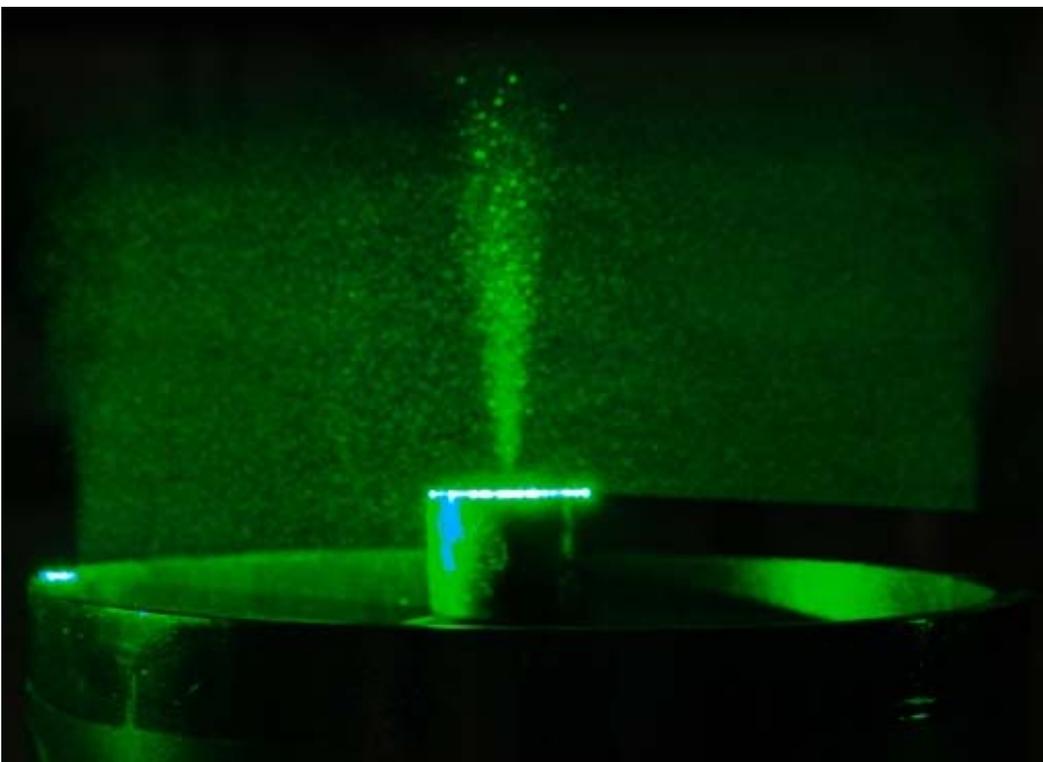


Figura 5.4 – Visualização do plano central do escoamento por dispersão Mie, utilizando partículas traçadoras no jato central e no ar anular.

Na **Figura 5.3** se mostra a imagem com partículas de óleo apenas no ar anular onde pode ser observada a formação das camadas cisalhantes externas com o ar do ambiente. Na **Figura 5.4** pode se verificar através da dispersão radial das partículas do jato central, como o desenvolvimento do escoamento é influenciado pelo movimento turbulento de grande escala de comprimento. Isto é manifestado pela diminuição da concentração de gotículas oriundas do jato central à medida que este se mistura com o escoamento externo.

Embora não seja objeto principal do estudo a caracterização detalhada do escoamento reativo no presente trabalho, alguns regimes de operação de combustão são brevemente discutidos a partir de fotografias das chamas, obtidas para um tempo de exposição da câmera de 0,1 s.

A **Tabela 5.1** resume as condições experimentais de operação. Note-se que são indicados nesta tabela valores médios da vazão de GNV lidas no rotâmetro, Q_d , e a vazão medida realmente, Q_n , sendo este último o valor corrigido sob condições de pressão e temperatura de operação do GNV. O rotâmetro apresenta incerteza aleatória de cerca de 2% do fundo de escala, o que é superior ao nível de turbulência presente no escoamento medido com LDV.

Tabela 5.1 – Regimes de operação do queimador em presença de combustão.

	Vazão Rotâmetro: Q_d (Nm ³ /h)	Pressão (bar)	Temp. (°C)	Vazão medida: Q_n (Nm ³ /h)	U_j (m/s)	Re_j	Regime	Nº Figura
Escoamento de jato livre	0,08	1,45	27	0,090	7,92	1116	Laminar	Figura 5.5-a
	0,16	1,4	28	0,181	16,03	2260	Laminar	Figura 5.5-b
	0,24	1,35	28	0,275	24,30	3425,2	Laminar	Figura 5.5-c
	0,32	1,25	28	0,375	33,11	4667,3	Turbulento	Figura 5.6-a
	0,4	1,2	28	0,473	41,86	5900	Turbulento	Figura 5.6-b
	0,48	1,12	28	0,579	51,17	7212,4	Turbulento	Figura 5.6-c
Escoamento Bluff-Body	0,08	1,5	27	0,089	7,84	1105,1	Laminar	Figura 5.7-a
	0,16	1,45	27	0,179	15,84	2232,7	Laminar	Figura 5.7-b
	0,24	1,35	27	0,274	24,26	3419,5	Laminar	Figura 5.7-c
	0,32	1,25	27	0,374	33,06	4659,5	Turbulento	Figura 5.8-a
	0,4	1,18	27	0,475	41,98	5917,2	Turbulento	Figura 5.8-b
	0,48	1,1	27	0,581	51,33	7234,6	Turbulento	Figura 5.8-c

Na **Figura 5.5** são apresentadas três imagens correspondendo ao regime laminar de combustão do jato livre. No caso da **Figura 5.5-(a)** a superfície da chama apresenta uma forma anular definida pela difusão radial do combustível e do ar. Esta situação é similar àquela descrita nos experimentos da chama de Burke e Schumann [28]. Nesta chama é controlada pela difusão de combustível e do

oxidante. No caso de regimes transitórios mostrados na **Figura 5.5-(b)** e **(c)** pode-se observar a evolução da chama com o aumento da vazão. O comprimento da chama aumenta tornando-a instável no extremo superior, pelas perturbações naturais observadas na forma de superfície de chama e que podem estar ligadas à variação da vazão do GNV ou ao movimento de convecção natural do ar do laboratório.

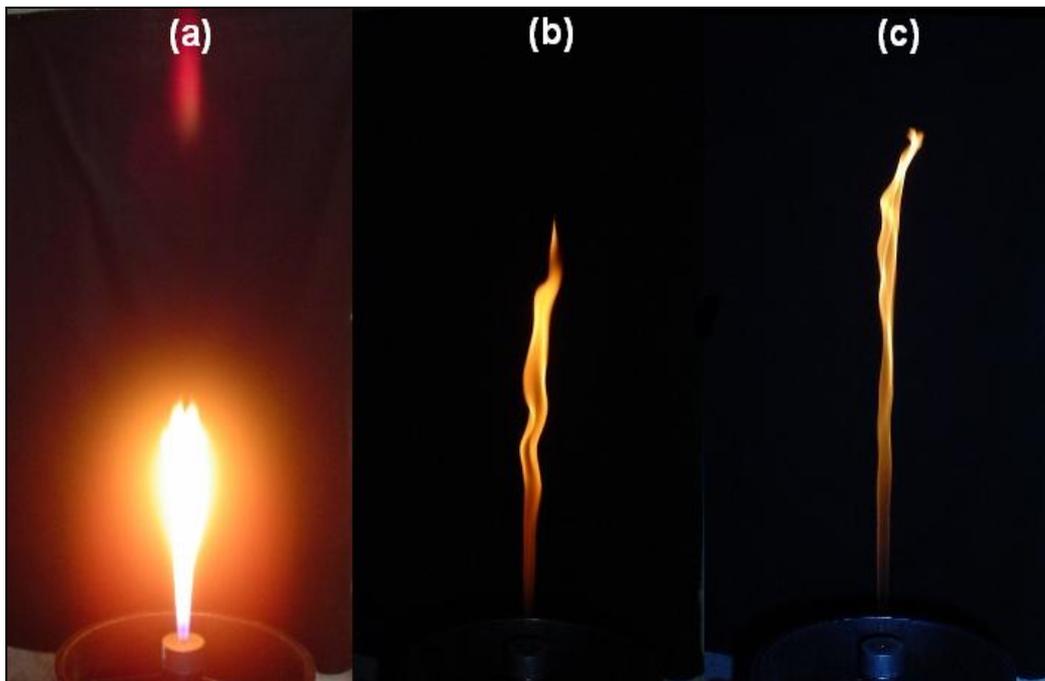


Figura 5.5 – Imagens do queimador em regime laminar de combustão, jato livre operando com número de Reynolds do GNV de (a)1116, (b)2260 e (c)3425.

Na **Figura 5.6** são mostrados três regimes de operação da chama de jato livre turbulento. Nesta figura pode-se observar que o acréscimo da vazão de GNV produz uma diminuição do comprimento visível da chama. Em todos os casos observa-se chama de coloração azul a jusante da face do queimador, o que indica que nesta região não há formação de fuligem por oposição às regiões mais a jusante, onde a quantidade de fuligem formada é apreciável. Para um número de Reynolds de 4667, a chama atinge o maior comprimento visível. Em seguida, a medida que a vazão é aumentada, pode-se observar uma mudança da estrutura da chama devido à interação com a turbulência, o que se manifesta pela forma irregular da superfície da chama e pela diminuição do comprimento da chama.

Por fim, no caso da **Figura 5.6-(c)**, obtém-se uma chama deslocada (lift) e estabilizada a uma distância de cerca de 40 mm da face do queimador. Neste caso a chama queima uma pré-mistura parcial de combustível e de oxidante. Esta situação é clássica no caso de chamas tipo jato [5].

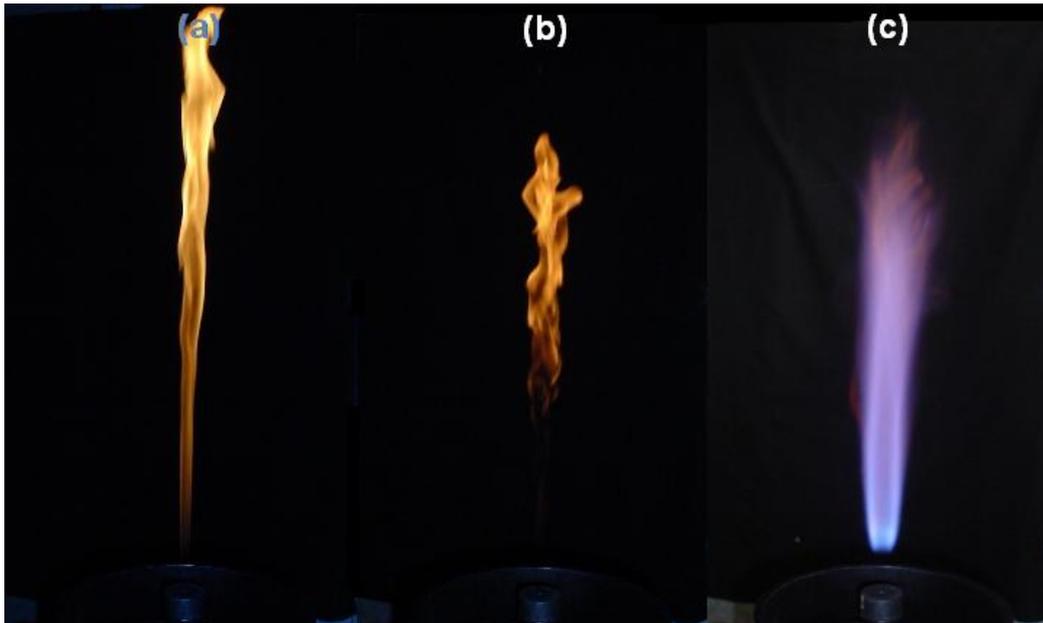


Figura 5.6 – Imagens do queimador em regime turbulento de combustão, jato livre operando com número de Reynolds do GNV de (a)4667, (b)5900 e (c)7212.

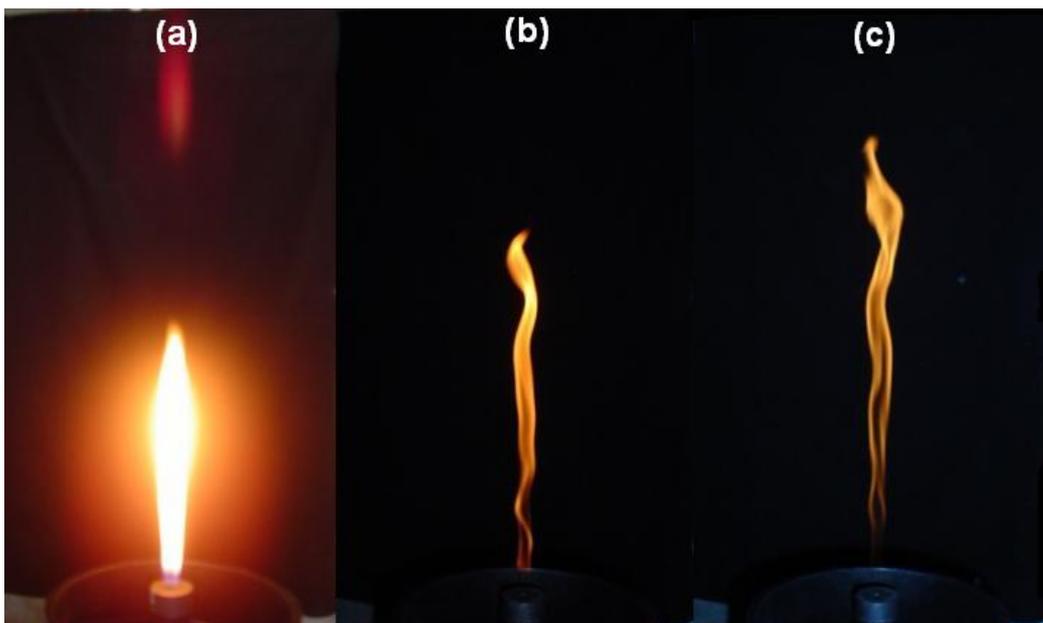


Figura 5.7 – Imagens do queimador em regime laminar de combustão, jato central e ar anular operando com número de Reynolds do GNV de (a)1105, (b)2233 e (c)3420.

Na **Figura 5.7** é apresentada a evolução da chama em presença de escoamento anular caracterizado para um único regime de velocidade média de 1,5 m/s e número de Reynolds de 8972. As condições de operação são similares à da **Figura 5.5**. Observa-se chamas quase idênticas com e sem presença de ar anular. Porém, no caso dos resultados mostrados na **Figura 5.5**, percebe-se que a região de desenvolvimento inicial da chama é mais bem definida. A presença do escoamento de ar anular tem por efeito desestabilizar o desenvolvimento da

chama, talvez sob a influência da região de recirculação que será caracterizada adiante.

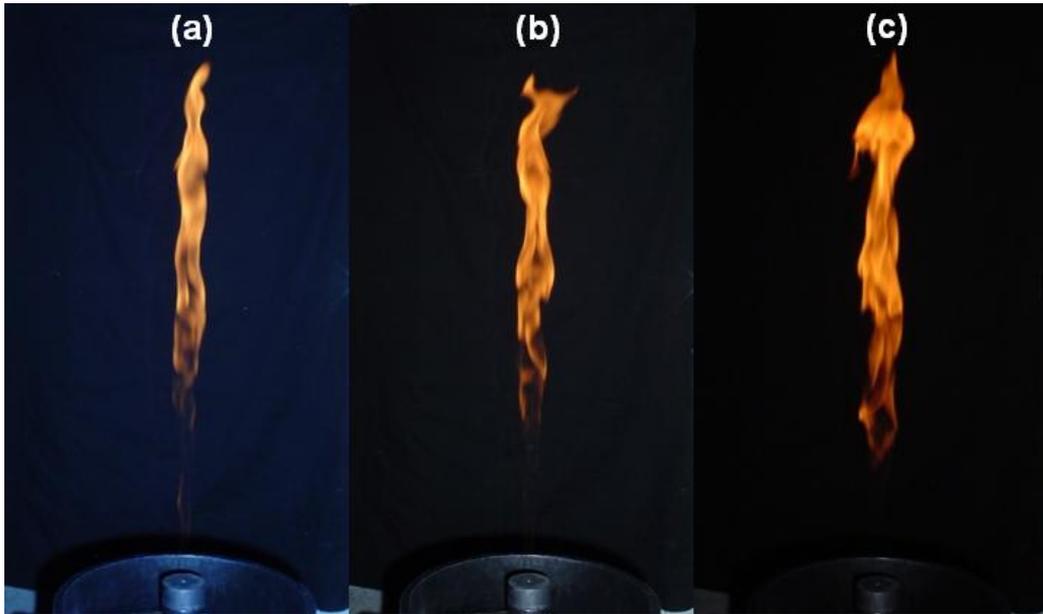


Figura 5.8 – Imagens do queimador em regime turbulento de combustão, jato central e ar anular operando com número de Reynolds do GNV de (a)4660, (b)5917 e (c)7235.

Na **Figura 5.8** se apresentam os regimes turbulentos da combustão em presença de ar anular. Nos três casos apresentados, que correspondem a valores do número de Reynolds similares ao da **Figura 5.6**, a chama levantada encontra-se em regime turbulento. Porém, contrariamente aos casos de jato livre, o comprimento visível da chama não parece variar de maneira apreciável com o número de Reynolds do jato. Uma explicação para este fato pode ser atribuída à menor velocidade relativa entre os jatos, parâmetro importante para a caracterização aerodinâmica do escoamento reativo, a qual não foi realizada neste trabalho.

5.2

Resultados experimentais obtidos com a técnica de medição LDV

Nesta seção, apresentam-se os resultados obtidos para configuração de jato livre e de jato central com a presença de ar anular através da utilização da técnica LDV. São apresentadas as evoluções ao longo do escoamento e em direções radiais das componentes da velocidade.

Como será visto, existem três regiões que podem ser observadas no escoamento: (1) a do núcleo potencial, onde o jato de saída ainda não é afetado pelo processo de mistura; (2) a região de desenvolvimento, que é afetada pelo

processo de “entrainment” onde o jato se mistura com o ar externo; e (3) a zona de recirculação ou estagnação, onde se observam as maiores taxas de mistura. Esta última região é observada apenas no caso de escoamento de jato com obstáculo.

5.2.1 Escoamento de jato livre

Inicialmente foi realizado um processo de alinhamento do volume de medição na vizinhança da saída do jato central. Este processo consiste na realização de medições no intuito de definir o centro dos eixos longitudinal e transversal (radial). A definição do centro dos eixos adotada neste trabalho é, portanto, baseada no escoamento do fluido, e não nas características geométricas do experimento. Isto foi realizado, pois o sistema utilizado para centragem do obstáculo permitia variações na posição radial do obstáculo de um ensaio para o seguinte. Uma modificação deste sistema encontra-se em fase de implementação e será utilizada num próximo trabalho.

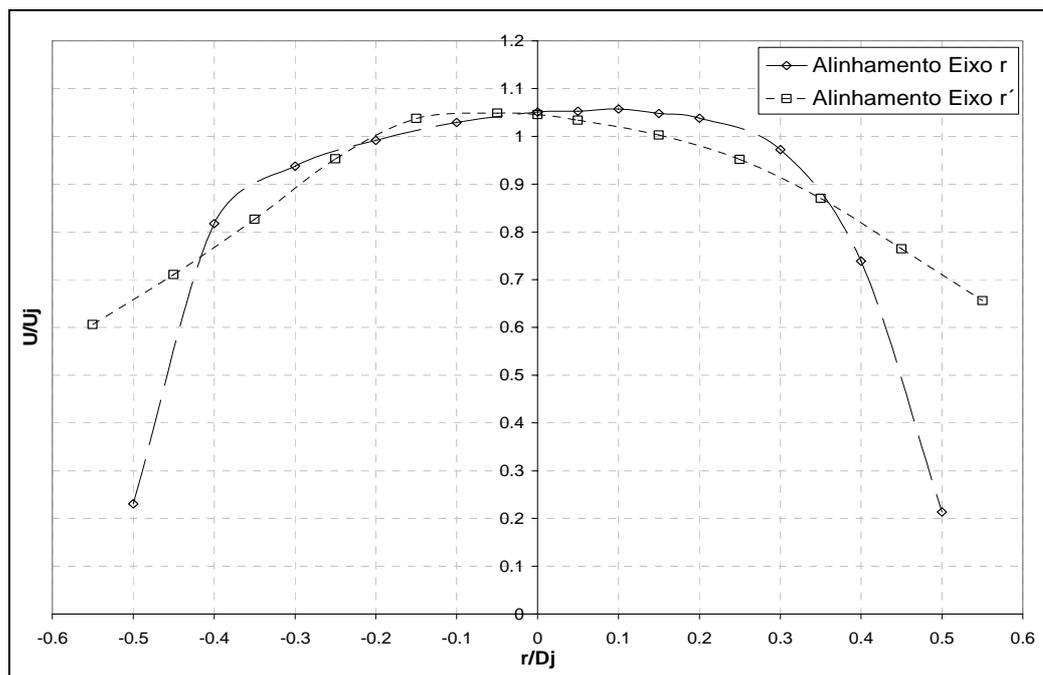


Figura 5.9 – Posicionamento do volume de medição no plano axi-simétrico em $X/D_j=1$, usando a evolução da velocidade média longitudinal (U) nos eixos radiais r e r' .

Na **Figura 5.9** é mostrado o resultado do processo de alinhamento para um deslocamento longitudinal de $x/D_j=1$, em termos da distribuição radial da componente longitudinal da velocidade média ao longo de duas direções, r e r' , as quais são perpendiculares entre si. Esta figura permite situar geometricamente a origem do eixo radial no local aonde são medidos os valores máximos desta

componente média da velocidade. A simetria esperada do escoamento não é verificada. Isto pode ser devido à influência da quantidade de partículas processadas, ou ao reflexo da face do queimador próxima ao volume de medição, ou ainda ao desalinhamento do eixo do jato com a vertical. Esta divergência pode ser claramente percebida na borda do jato, após de $r/D_j=0,4$, onde a baixa concentração de partículas possui maior influência.

A **Figura 5.10** mostra a evolução longitudinal da componente longitudinal da velocidade ao longo do eixo $r=0$ assim definido, com as incertezas pontuais representadas pelas barras. Nesta figura é possível constatar que o núcleo potencial, definido como a região de desenvolvimento inicial em que a velocidade em $r=0$ permanece constante, se estende até $x/D_j=4$. A partir deste ponto observa-se um decréscimo da velocidade, à medida que o jato se desenvolve. Isto ocorre por que o jato troca quantidade de movimento com fluido oriundo do meio ambiente. Após da região de desenvolvimento, aproximadamente em $x/D_j=20$, o jato decai e se espalha ainda mais. A evolução radial da velocidade média correspondente é mostrada na **Figura 5.11**. Como pode ser observado nesta figura, na região de desenvolvimento situada até $x/D_j<5$, a variação da velocidade média com a direção longitudinal é muito pequena. Note-se também uma forte assimetria na velocidade ao longo da direção radial, a qual tende a desaparecer a partir $x/D_j=10$.

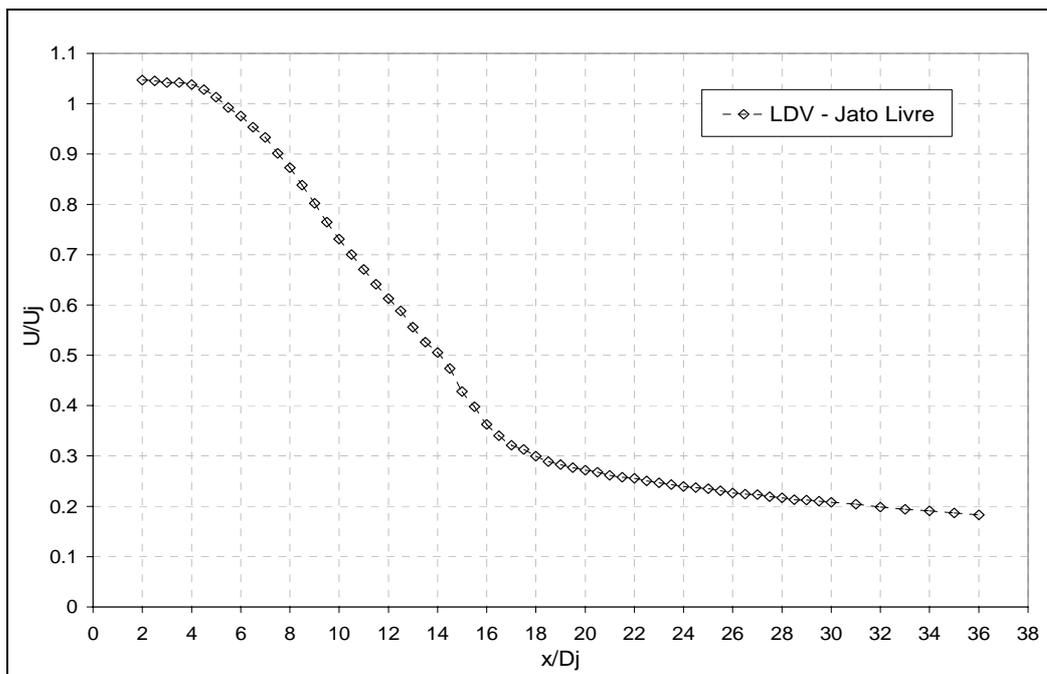


Figura 5.10 – Evolução da velocidade média longitudinal (U) ao longo da direção longitudinal.

A mistura ou troca de quantidade de movimento, entre o jato central e ambiente é caracterizada pela redução da velocidade média no centro do jato e pelo espalhamento deste na direção radial, os quais podem ser observados na **Figura 5.11**.

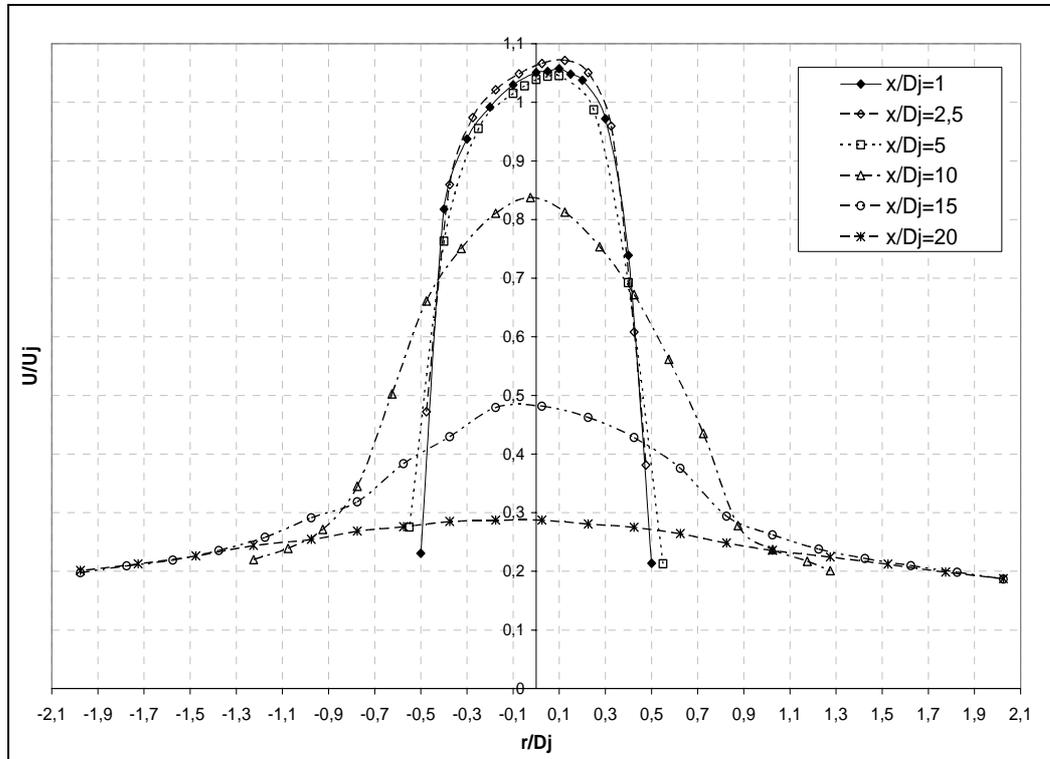


Figura 5.11 – Distribuição radial de velocidade média na direção longitudinal (U) para diferentes valores da coordenada longitudinal.

Na **Figura 5.12** é mostrada a evolução da componente transversal da velocidade média. A medição da componente transversal de velocidade para este tipo de escoamentos sem confinamento mostrou-se delicada. Na região de desenvolvimento inicial do jato $x/D_j < 5$, a velocidade média transversal é muito próxima de zero, o que é consistente com a constância observada da velocidade longitudinal. Na região desenvolvida do jato, a partir de $r=0$, o módulo da componente transversal da velocidade média aumenta com a distância ao centro até atingir num valor máximo, para em seguida diminuir com o espalhamento radial do jato. A posição radial deste valor máximo se desloca para valores de r/D_j maiores.

De acordo com a análise dos resultados obtidos para jato livre utilizando-se a técnica de medição LDV, acredita-se que os limites radiais de aquisição de dados marcam o contorno da região de borda do jato. Neste contorno é possível encontrar partículas traçadoras em número suficiente para gerar um sinal Doppler.

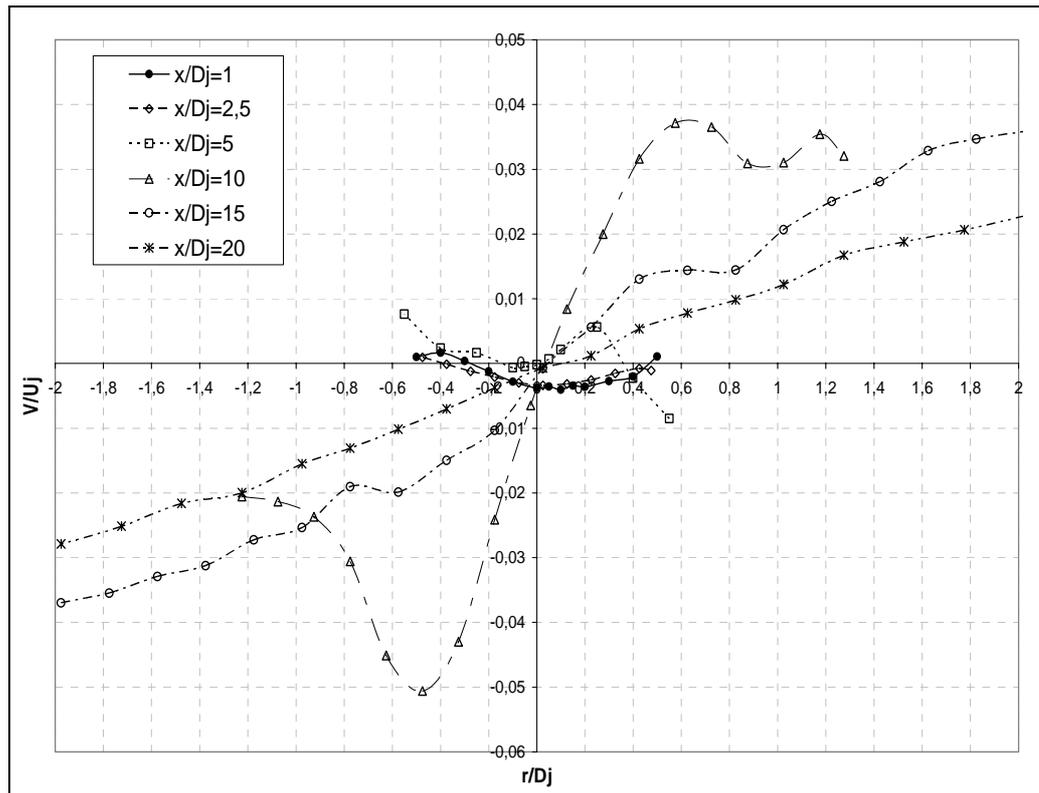


Figura 5.12 – Distribuição radial de velocidade média na direção transversal (V) para diferentes valores da coordenada longitudinal.

Na **Figura 5.13** se apresenta a evolução da intensidade turbulenta da componente longitudinal da velocidade (u'/U_j). Estas curvas mostram que ao longo da direção radial, a intensidade turbulenta atinge um valor máximo na região da borda do jato. Este máximo, característico desta região de forte mistura turbulenta, não é observado em $x/D_j=20$. A intensidade turbulenta ao longo do eixo $r=0$ aumenta de cerca 2%, na região inicial até cerca de 14% em $x/D_j=10$, para em seguida diminuir.

Na **Figura 5.14** é mostrada a distribuição radial da intensidade turbulenta transversal (v'/U_j), onde pode-se observar uma tendência de evolução análoga ao longo do eixo $r=0$; a intensidade turbulenta aumenta de 1% até atingir 12% em $x/D_j=10$ para em seguida cair. A presença de um máximo de intensidade na região de mistura turbulenta só foi observada em $x/D_j=5$ e 10.

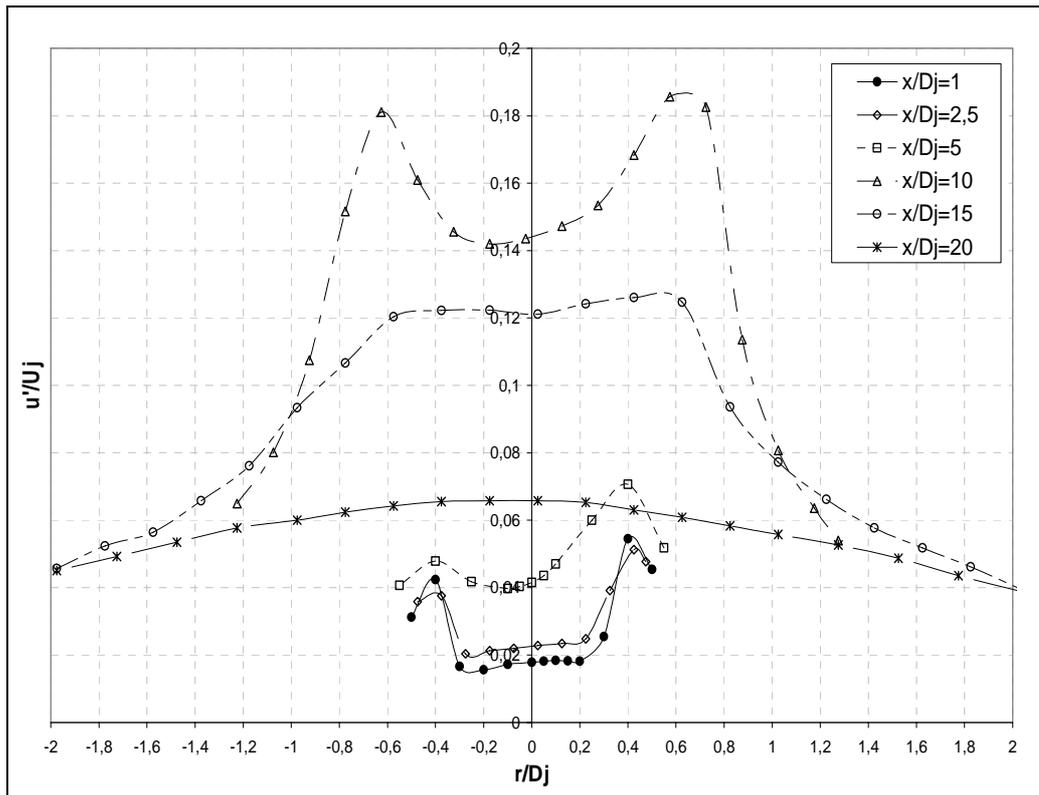


Figura 5.13 – Distribuição radial da intensidade turbulenta na direção longitudinal (u'/U_j) para diferentes valores da coordenada longitudinal.

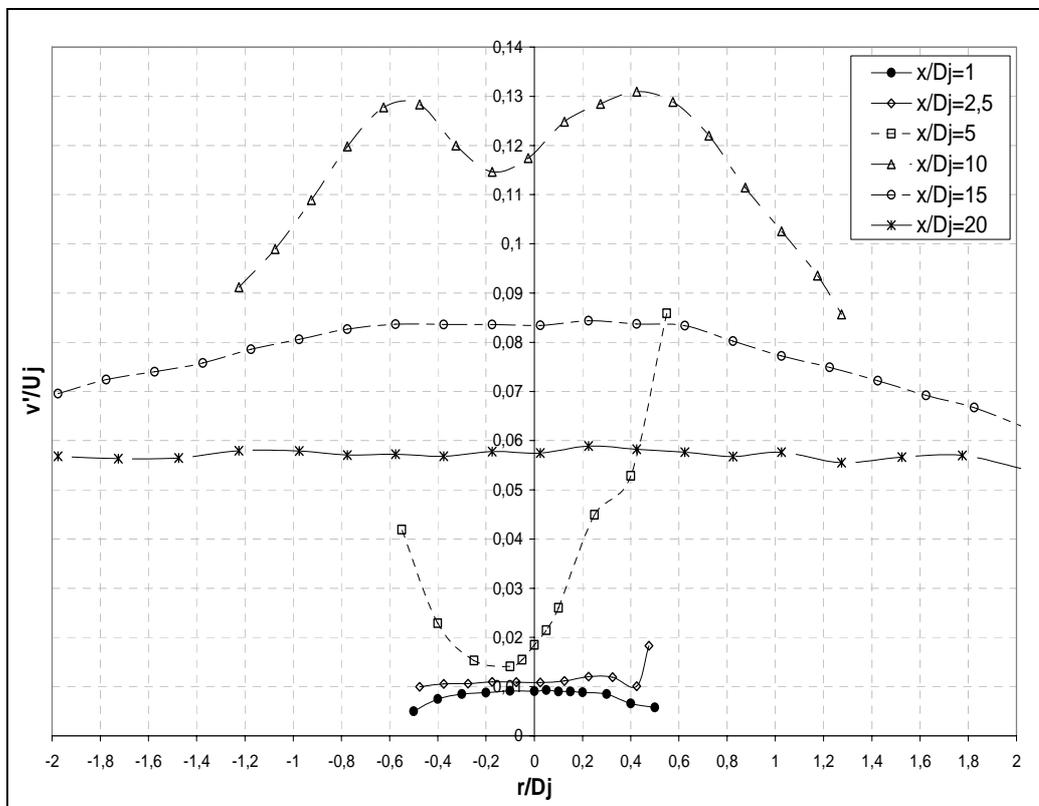


Figura 5.14 – Distribuição radial da intensidade turbulenta na direção transversal (v'/U_j) para diferentes valores da coordenada longitudinal.

5.2.2 Escoamento de jato com obstáculo

Nesta seção são apresentados resultados obtidos com a técnica LDV para o caso de ar anular escoando com jato central. Devido à presença de partículas traçadoras em ambos os escoamentos, foi possível realizar medições LDV até uma distância radial de $11D_j$.

A **Figura 5.15** que mostra a evolução da velocidade média longitudinal para $x/D_j=1$ em direções perpendiculares r e r' , permite localizar a origem do eixo de coordenadas utilizado para as medições de velocidade. Observa-se que as formas da evolução radial da velocidade média longitudinal são similares, e que as diferenças observadas situam-se dentro da incerteza experimental.

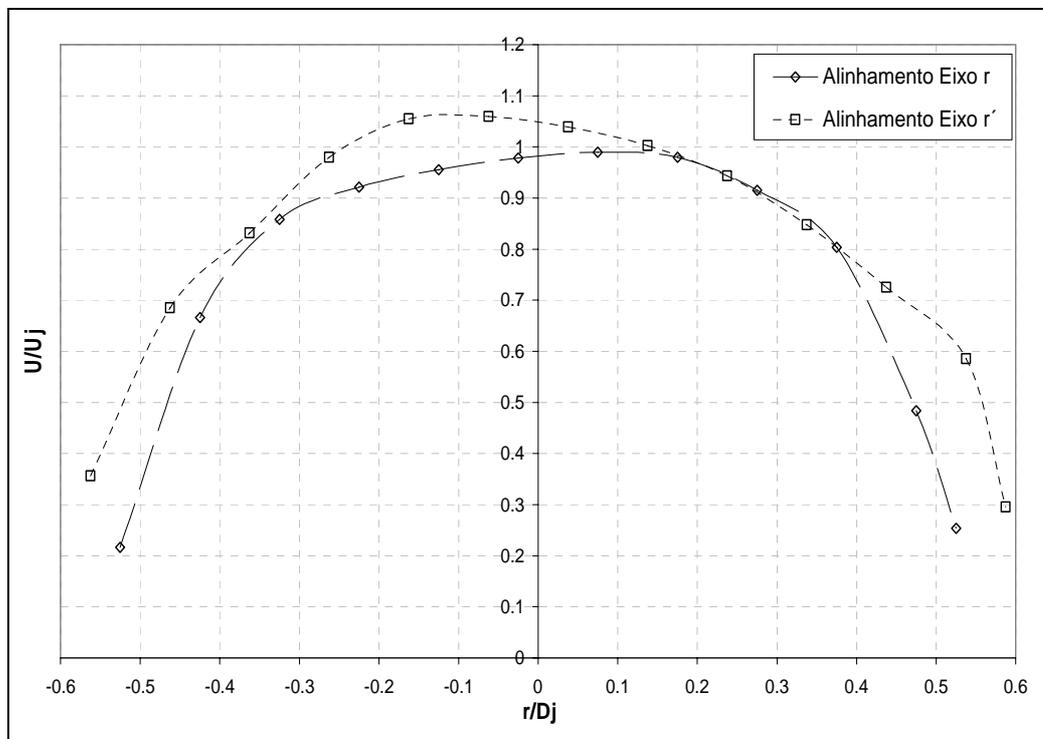


Figura 5.15 - Posicionamento do volume de medição no plano axi-simétrico em $X/D_j=1$, usando a evolução da velocidade média longitudinal (U) nos eixos radiais r e r' .

A evolução da velocidade média longitudinal (U) ao longo de $r=0$ para o jato com ar anular e jato livre é mostrada na **Figura 5.16**. Esta figura mostra que a região do núcleo potencial de jato com ar anular se estende até $x/D_j=5$, valor este ligeiramente superior ao caso de jato livre. A jusante desta região, a componente de velocidade (U) diminui rapidamente com o aumento da distância longitudinal. O comportamento das intensidades turbulentas na linha de centro serão descritas posteriormente conjuntamente com as outras técnicas usadas. A evolução da

velocidade longitudinal média na região de desenvolvida para o jato com ar anular é semelhante ao de jato livre, o que indica que a baixa velocidade do ar anular não é suficiente para alterar substancialmente a evolução em $r=0$. Também pode-se observar que foram medidos mais pontos ao longo do escoamento no jato com ar anular devido à maior quantidade de partículas traçadoras presentes do que no caso de jato livre além de $x/D_j=36$.

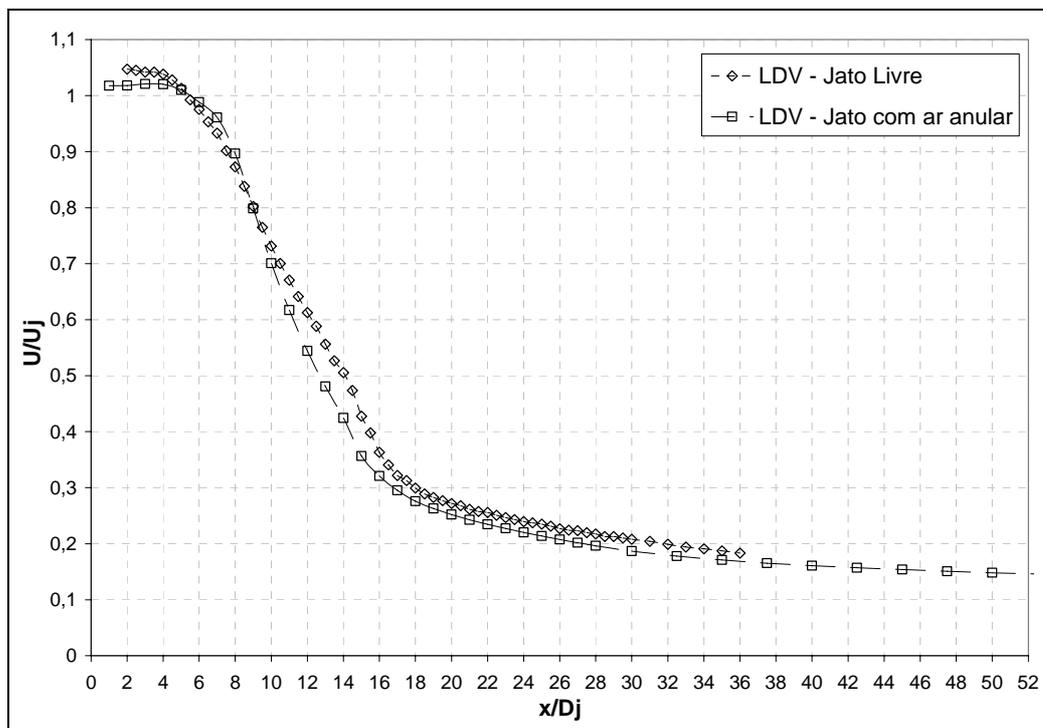


Figura 5.16 – Comparação da evolução da velocidade média longitudinal (U) ao longo da direção longitudinal do jato com com obstáculo e do jato livre.

Na **Figura 5.17** é apresentada a evolução radial da velocidade média longitudinal (U) para diversas posições radiais. Esta figura mostra a presença de uma região de recirculação fraca entre $x/D_j=1$ e 10. Esta região é caracterizada por valores negativos de U . Note-se que, por conveniência, apenas metade do plano (x,r) é mostrada. Esta região de recirculação estabelece um vórtice toroidal que gira no sentido do ar anular ao jato central. Os limites desta zona são a vizinhança da face do queimador $0,6 < r/D_j < 3,65$ e, na posição $x/D_j=10$, $1,9 < r/D_j < 4,8$. Note-se que o efeito da esteira desta zona de recirculação pode ser observado sob a forma de um déficit de velocidade até $x/D_j=20$.

A situação na evolução longitudinal da componente transversal da velocidade média de análise é mais complexa devido à divergência dos valores obtidos nas zonas próximas à linha de centro, como mostrado na **Figura 5.18**. Em teoria [21], e conforme o observado no caso do jato livre, estes valores deveriam

ser próximos de zero nesta região central, devido à simetria da configuração geométrica. Este comportamento anômalo dos valores medidos, observado na vizinhança do eixo $r=0$, pode estar ligado a uma escolha inadequada dos valores de frequência “Doppler shift”, de faixa de frequência de medição. Por uma questão de tempo disponível, não foi possível elucidar esta questão.

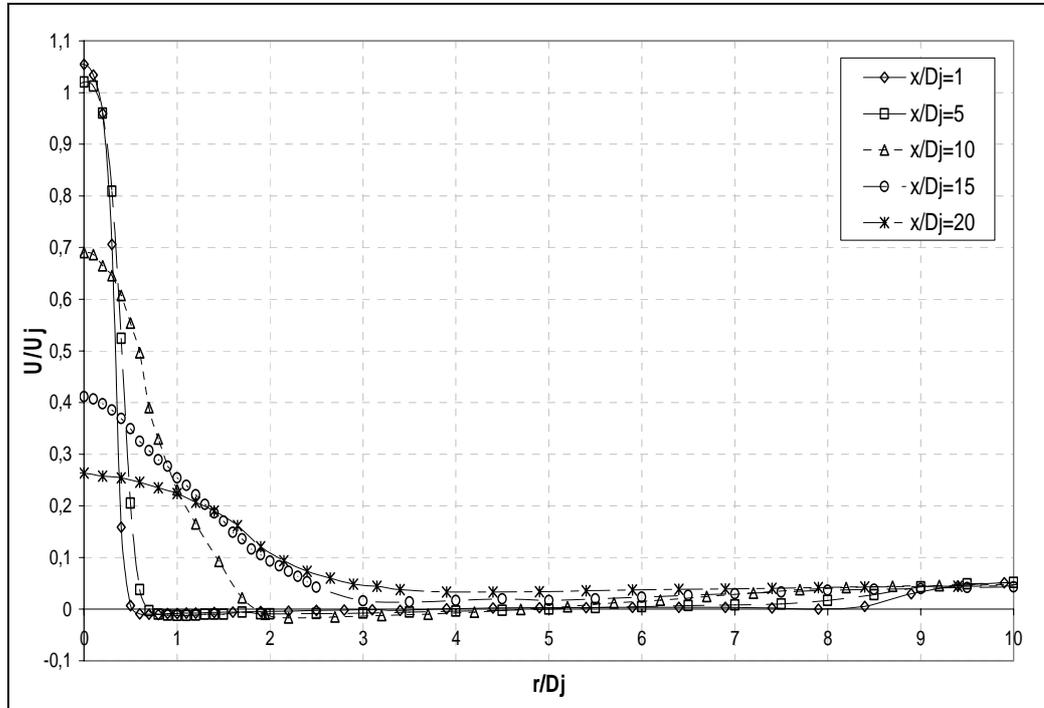


Figura 5.17 – Distribuição radial de velocidade média na direção longitudinal (U) para diferentes valores da coordenada longitudinal.

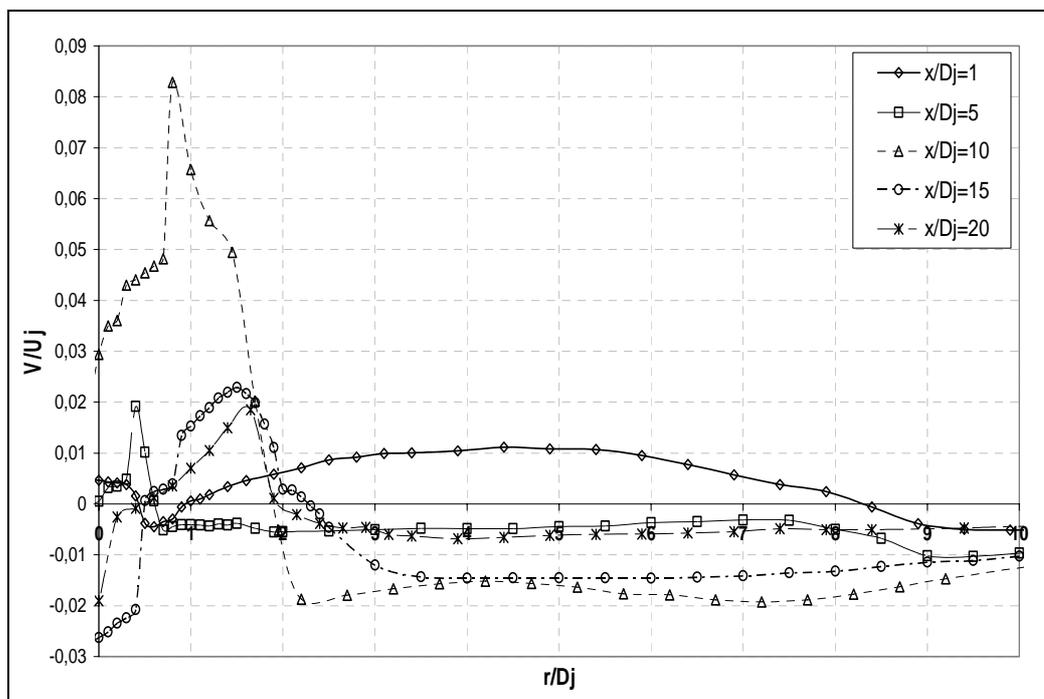


Figura 5.18 - Distribuição radial de velocidade média na direção transversal (V) para diferentes valores da coordenada longitudinal.

As distribuições radiais da intensidade de turbulência longitudinal (u'/U_j) são mostradas na **Figura 5.19**. De modo geral, observa-se que os valores máximos de intensidade ocorrem nas regiões onde o gradiente de velocidade média é elevado, isto é, nas camadas cisalhantes, como foi observado por Schefer et al. [26]. Assim, o valor máximo de $u'/U_j=0,17$ é atingido para um deslocamento longitudinal de $x/D_j=10$ e $r/D_j=0$. Este valor máximo é maior do que aqueles obtidos para o escoamento de jato livre e pode estar relacionado à presença da zona de recirculação. Os valores máximos de intensidade são similares aos obtidos no caso do jato livre para $x/D_j < 5$, isto é, na região de desenvolvimento inicial. Após atingir um máximo em $x/D_j=10$, a intensidade turbulenta longitudinal (u'/U_j) diminui nas direções longitudinais e radiais.

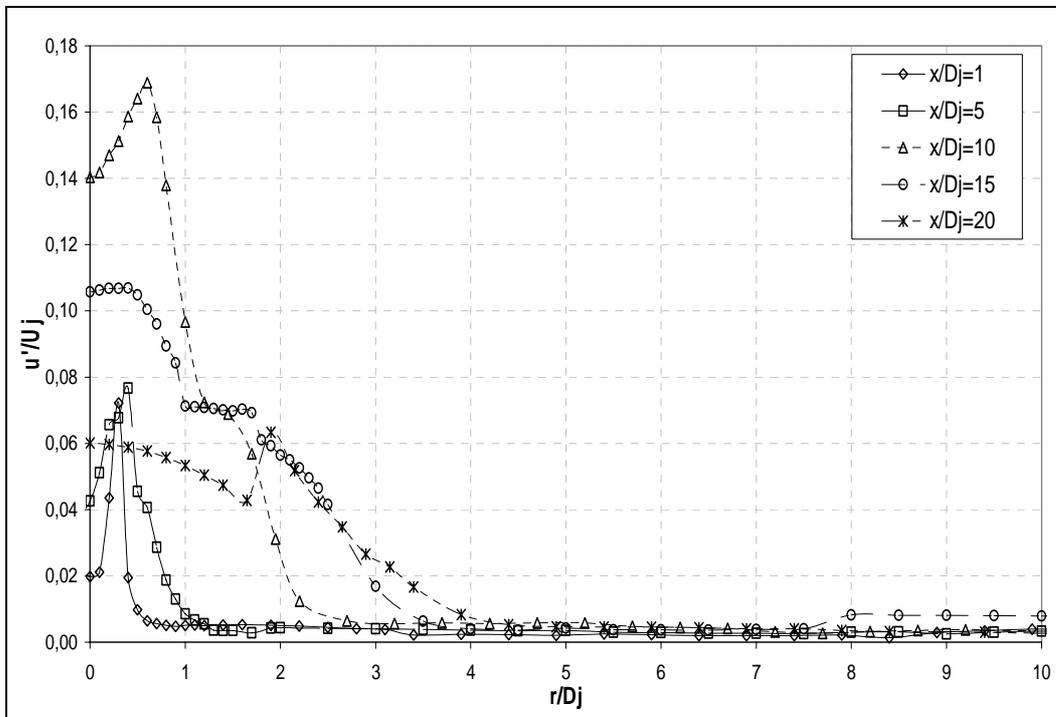


Figura 5.19 – Distribuição radial da intensidade turbulenta na direção longitudinal (u'/U_j) para diferentes valores da coordenada longitudinal.

A **Figura 5.20** mostra as distribuições radiais de intensidade turbulenta transversal (v'/U_j). O decréscimo de v'/U_j na fronteira externa da região de mistura é consistente com a transição entre o escoamento cisalhado e escoamento anular uniforme. Porém, devido às discrepâncias observadas na evolução da velocidade média transversal (V), os resultados da vizinhança de $r=0$ não são inteiramente confiáveis.

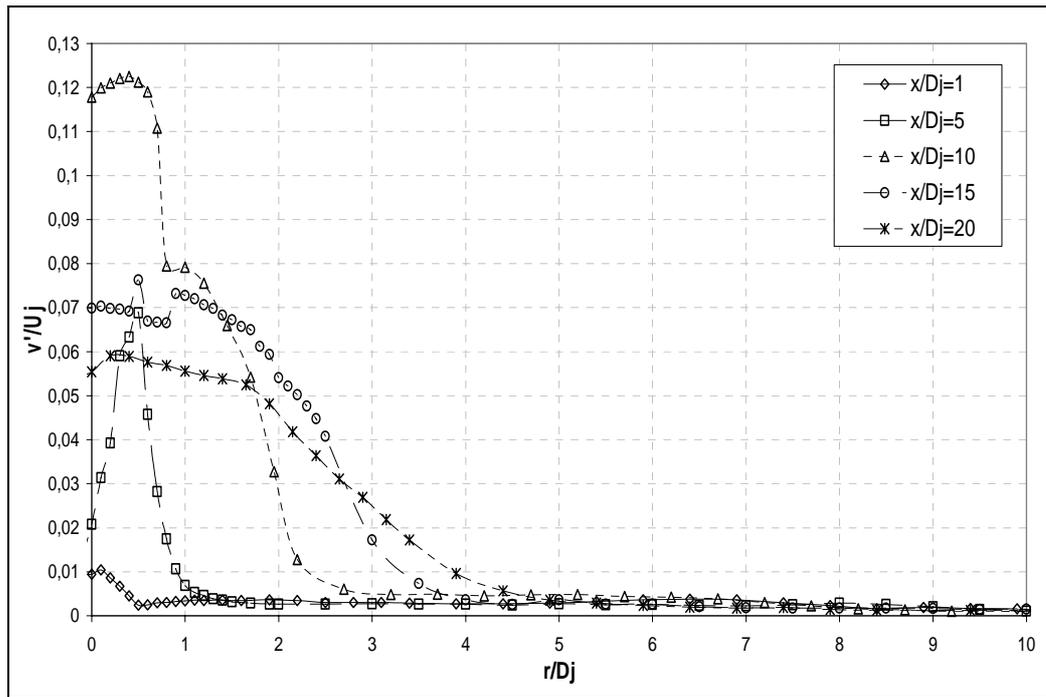


Figura 5.20 – Distribuição radial da intensidade turbulenta na direção transversal (v'/U_j) para diferentes valores da coordenada longitudinal.

5.3

Resultados experimentais obtidos com a técnica de medição PIV

Os resultados usando a técnica de medição PIV apresentados nesta seção foram obtidos apenas no caso do escoamento de jato central com ar anular, devido à maior concentração de partículas existente na periferia do jato, quando comparado com o jato livre.

Para fins de caracterização da estrutura do escoamento, as medidas de velocidade são apresentadas sob a forma de vetores nas **Figuras 5.21-(a)** e **(b)**, as quais foram obtidas para o intervalo de tempo entre pulsos laser (ΔT) de 5 e 80 μs , respectivamente. A comparação entre estas figuras mostra que é necessário adotar dois valores de ΔT para descrever seja o jato central, seja o restante do escoamento, devido à diferença entre os valores máximo e mínimo da velocidade. Assim, na **Figura 5.21-(a)** são mostrados cerca de 45000 vetores e na **Figura 5.21-(b)** representam-se cerca de 60000 vetores. O menor valor de ΔT , 5 μs permite descrever mais adequadamente a região central em $-0,5 < r/D_j < 0,5$ até uma posição longitudinal próxima de $x/D_j = 5$. Na **Figura 5.21-(a)** é possível perceber que existem poucos vetores na vizinhança da região central, zona do escoamento lento devido ao baixo valor do intervalo de tempo entre pulsos $\Delta T = 5 \mu s$; não foi

possível obter pontos vizinhos nas duas imagens para gerar o campo de vetores desta região.

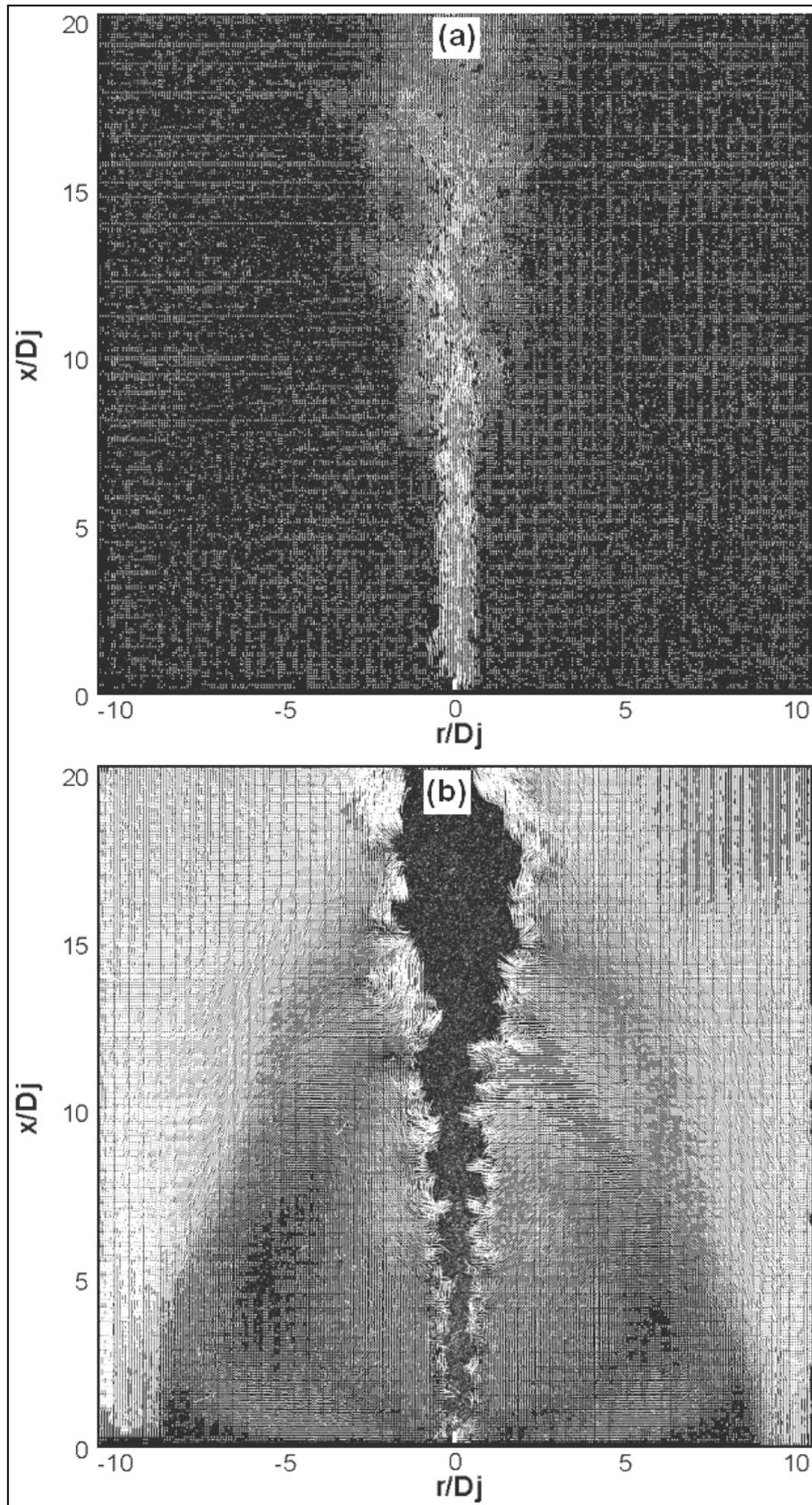


Figura 5.21 - Campo instantâneo de vetores velocidade com partículas traçadoras no jato central e ar anular para um intervalo de tempo entre pulsos (ΔT): (a) $5 \mu s$ e (b) $80 \mu s$.

Na **Figura 5.21-(b)** pode-se observar que o campo instantâneo de velocidade é mais bem representado na zona de recirculação e no ar anular. Nesta figura é possível observar claramente a formação da região de recirculação. A ausência de vetores na zona central é devido ao elevado valor do intervalo de tempo entre pulsos, $\Delta T=80 \mu s$. Com este valor não é possível correlacionar pontos vizinhos entre duas imagens para gerar o campo de vetores na vizinhança de $r=0$. Em ambas as figuras o processo intermitente de mistura turbulenta que ocorre na periferia do jato é claramente visível.

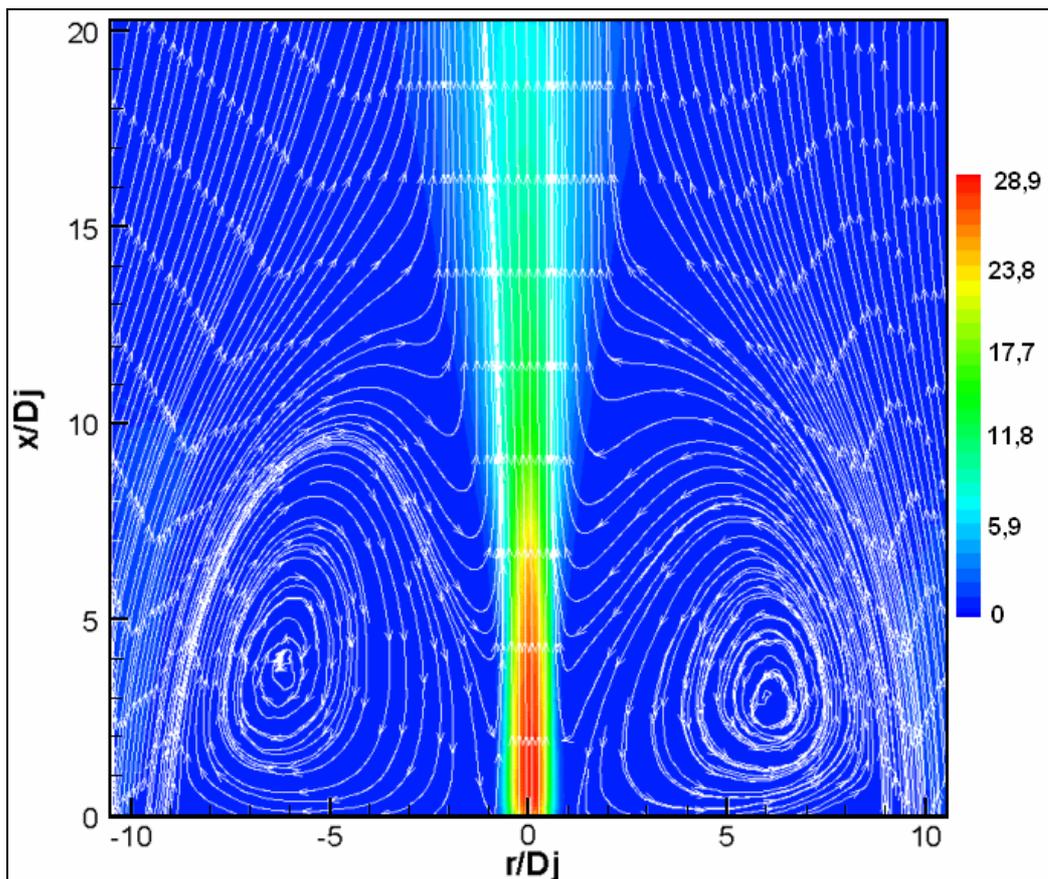


Figura 5.22 – Contornos do módulo da velocidade média (m/s) com linhas de corrente para o escoamento do jato com obstáculo, $Re=3870$.

A **Figura 5.22** mostra outra forma de representação do campo de velocidade no plano $x-r$, isto é, o contorno do módulo da velocidade média ao qual foram superpostas linhas de corrente do escoamento. Nesta figura pode-se observar de maneira clara o vórtice característico da zona de recirculação. Também pode ser verificado nesta figura que o escoamento em estudo é praticamente simétrico em torno de $r=0$. Esta figura foi obtida da média de 800 imagens de campos vetoriais de velocidade como na **Figura 5.21-(a)** para um intervalo de tempo entre pulsos laser de $5 \mu s$.

Na **Figura 5.22** pode-se observar também a natureza irregular das linhas de corrente na zona de recirculação, principalmente nos vórtices mais concêntricos formados na proximidade da face do queimador; isto pode ser atribuído ao efeito da estacionaridade do escoamento, que é a influencia da velocidade de rotação do vórtice com respeito à sua velocidade de translação, o movimento e a geração dos vórtices são afetados pelo processo de arrasto que ocorre na proximidade da superfície. Especificamente na região do jato central com um número de Reynolds de 3870, a estacionaridade dos vórtices resulta quase nula pela alta velocidade axial que influi nesta zona; entanto na região de estagnação próxima á superfície do queimador, a estacionaridade dos vórtices gerados é maior devido à baixa velocidade de translação e alta rotação característica nesta zona estagnada, alias também é refletido pelos baixos níveis de turbulência, parâmetros afetados pela influencia da baixa velocidade do ar anular de 1,5 m/s contribuindo também à baixa taxa de arrasto.

A evolução da velocidade média obtida na direção transversal (V) é mostrada na **Figura 5.23**, resultado da média de 800 campos. Esta figura permite apreciar o grau de simetria do escoamento e o valor desta velocidade. As cores dos contornos refletem o desvio da simetria em relação á $r=0$ na região a jusante da zona de recirculação. As regiões vazias no centro indicam a falta de vetores processados nesta zona central de alta velocidade. Isto ocorre, pois este campo vetorial foi obtido com um intervalo de tempo entre pulsos laser de $\Delta T=80 \mu s$.

Os contornos das velocidades turbulentas r.m.s. nas direções longitudinal (u') e transversal (v') são mostrados nas **Figuras 5.24 e 5.25**, respectivamente.

A **Figura 5.24** mostra os valores de u' , os quais diminuem a partir de $x/D_j=11$ na região próxima do centro do jato, onde são encontrados os maiores níveis de intensidade da turbulência. Na região de núcleo potencial, $x/D_j<5$, se observa uma maior velocidade turbulenta próxima à fronteira do jato central. Além disso, nas demais regiões, tais como a zona de recirculação, a velocidade turbulenta r.m.s. na direção longitudinal é menor do que 0,5 m/s.

A **Figura 5.25** mostra que os valores mínimo e máximo da velocidade turbulenta r.m.s. na direção radial v' são 0,4 e 2 m/s respectivamente, e são encontrados a jusante da região de desenvolvimento inicial (núcleo potencial) em $x/D_j>5$.

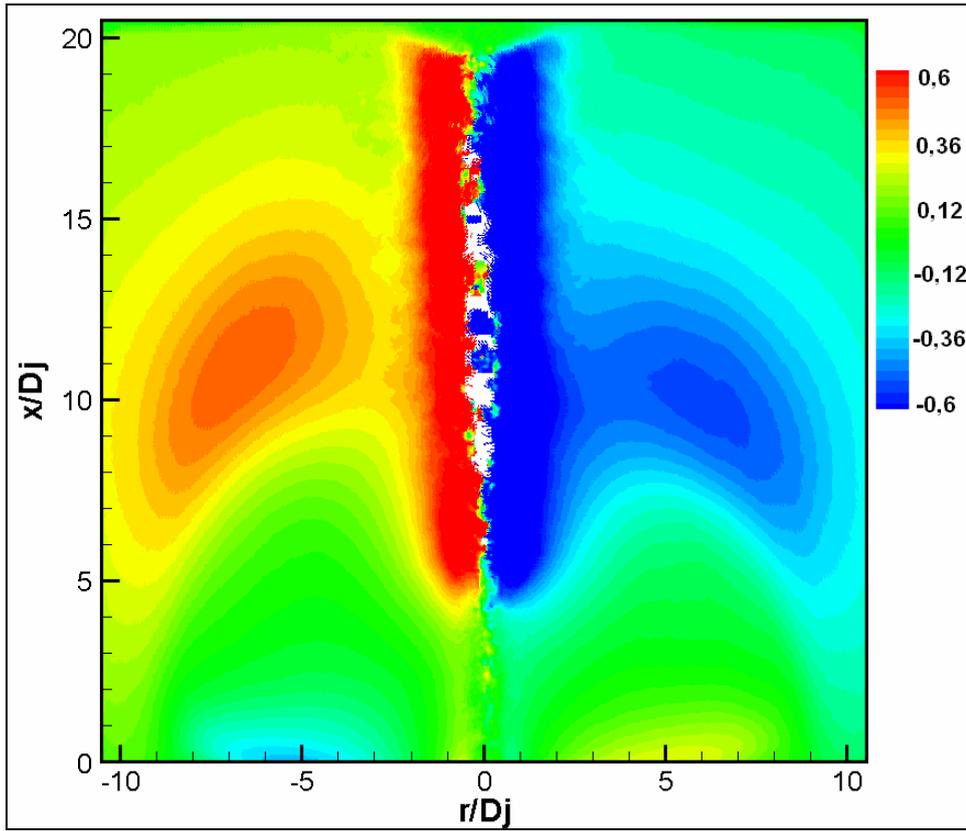


Figura 5.23 – Contornos de velocidade média transversal – V (m/s), $Re=3870$.

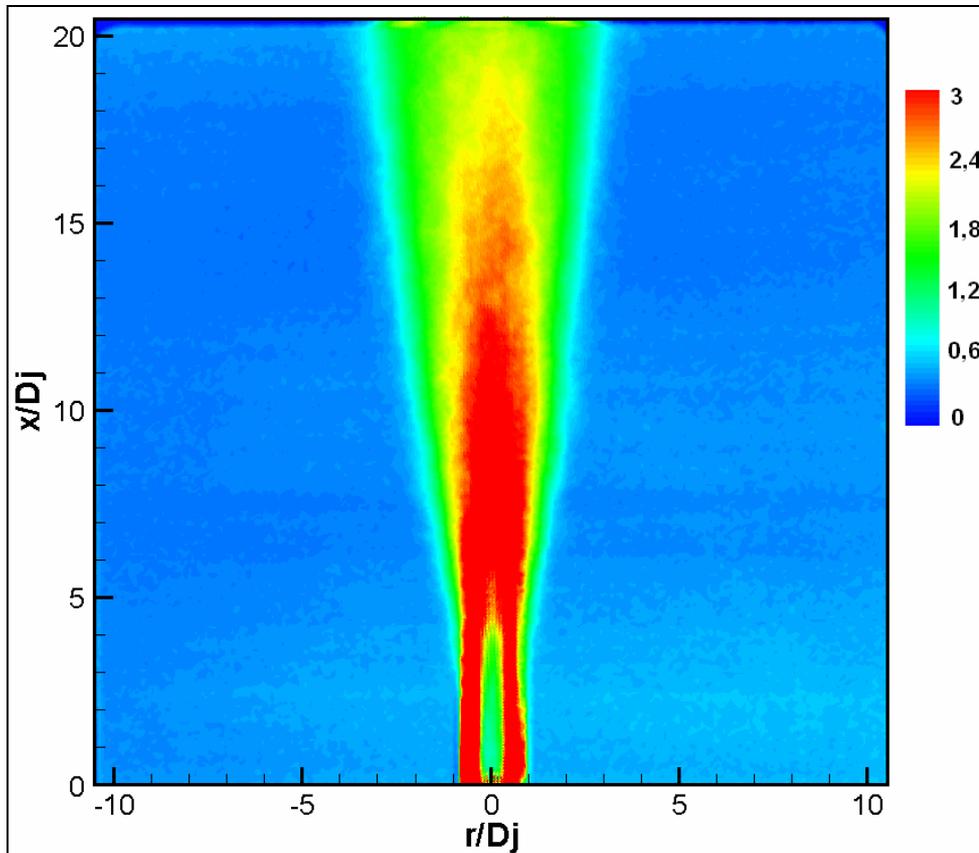


Figura 5.24 – Contornos de velocidade turbulenta r.m.s. na direção longitudinal – u' (m/s), com $\Delta T=5 \mu s$ e $Re=3870$.

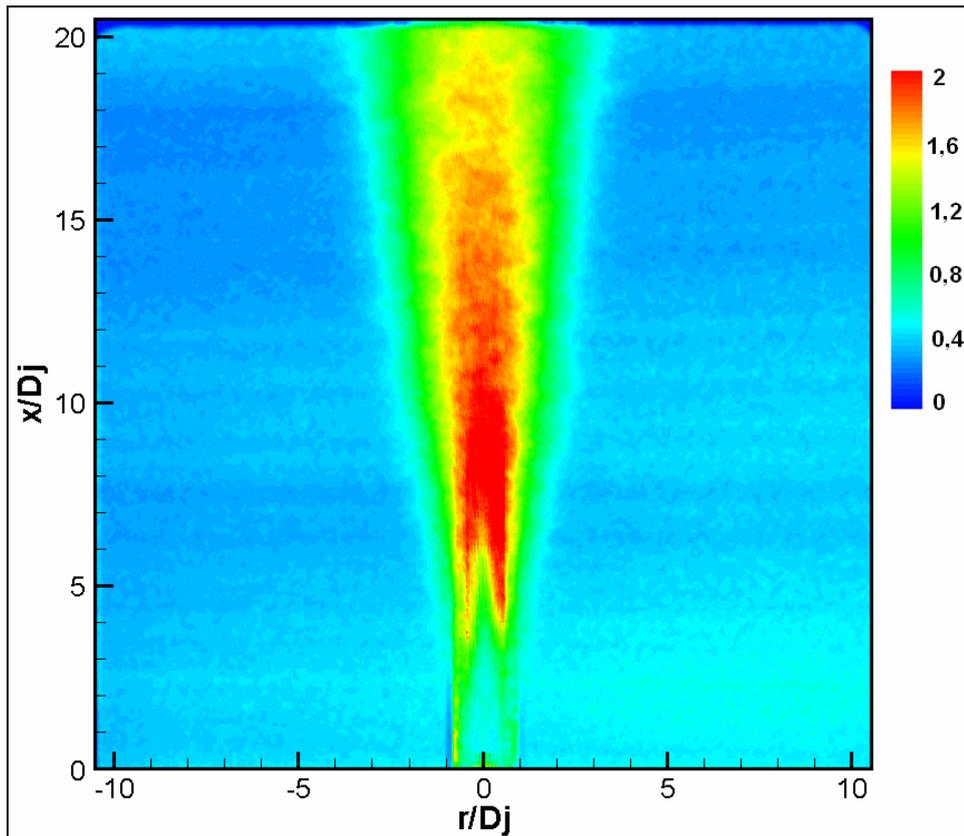


Figura 5.25 – Contornos de velocidade turbulenta na direção transversal r.m.s. – v' (m/s), com $\Delta T=5 \mu s$ e $Re=3870$.

São apresentadas e discutidas em seguida as distribuições radiais no plano (r,x) do escoamento, para diversas posições longitudinais das velocidades média e turbulenta r.m.s. correspondente às medições feitas com a técnica PIV.

A distribuição da velocidade média longitudinal (U/U_j) mostrada na **Figura 5.26** apresenta simetria com respeito ao eixo longitudinal $(r=0)$, o que esta em acordo com trabalhos antecedentes [17,26]. O valor mínimo da velocidade média longitudinal (U) na região de recirculação é $U/U_j=-0,0134$, o qual é encontrado em $x/D_j=5$. Nesta distribuição da velocidade média longitudinal pode se observar uma melhor simetria que a da técnica LDV como mostrados nas **Figuras 5.11** e **5.17**. Esta diferença é atribuída principalmente, à forma de obtenção dos dados nos pontos de medição. Na técnica PIV a amostragem de dados é instantânea com o registro e processamento simultâneo em toda a região, enquanto que, na técnica LDV, esta é realizada ponto a ponto.

Os valores de V/U_j , mostrados na **Figura 5.27** são muito pequenos em comparação com a velocidade longitudinal (U/U_j) sendo aproximadamente duas ordens de grandeza menores.

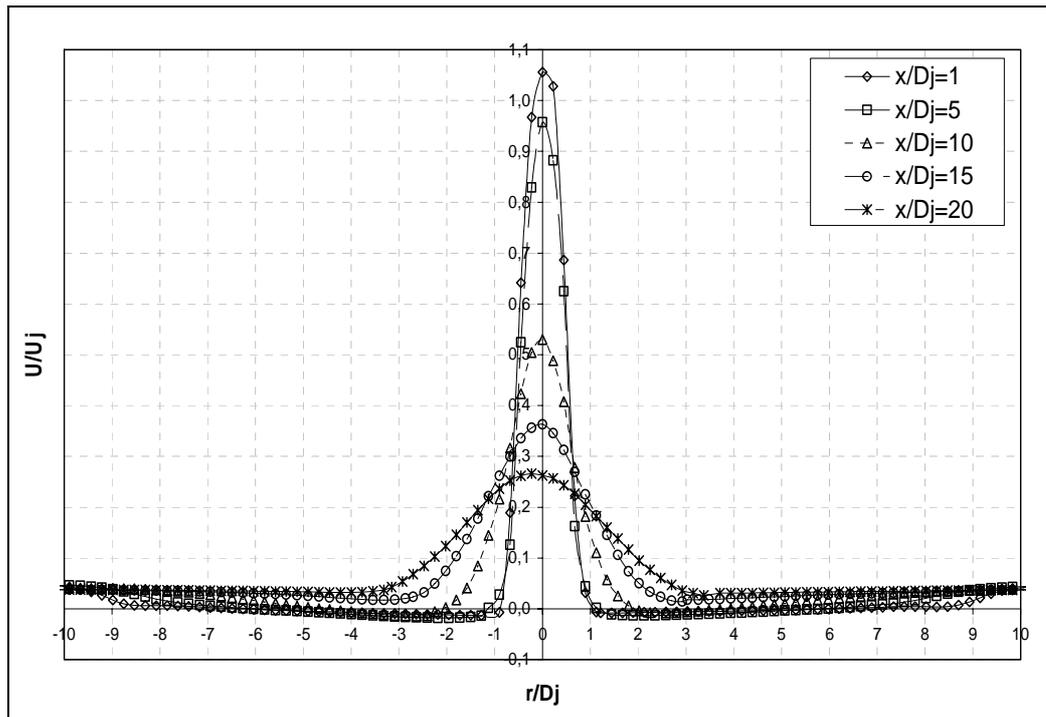


Figura 5.26 - Distribuição radial de velocidade média na direção longitudinal (U) para diferentes valores da coordenada longitudinal e $\Delta T=5 \mu s$.

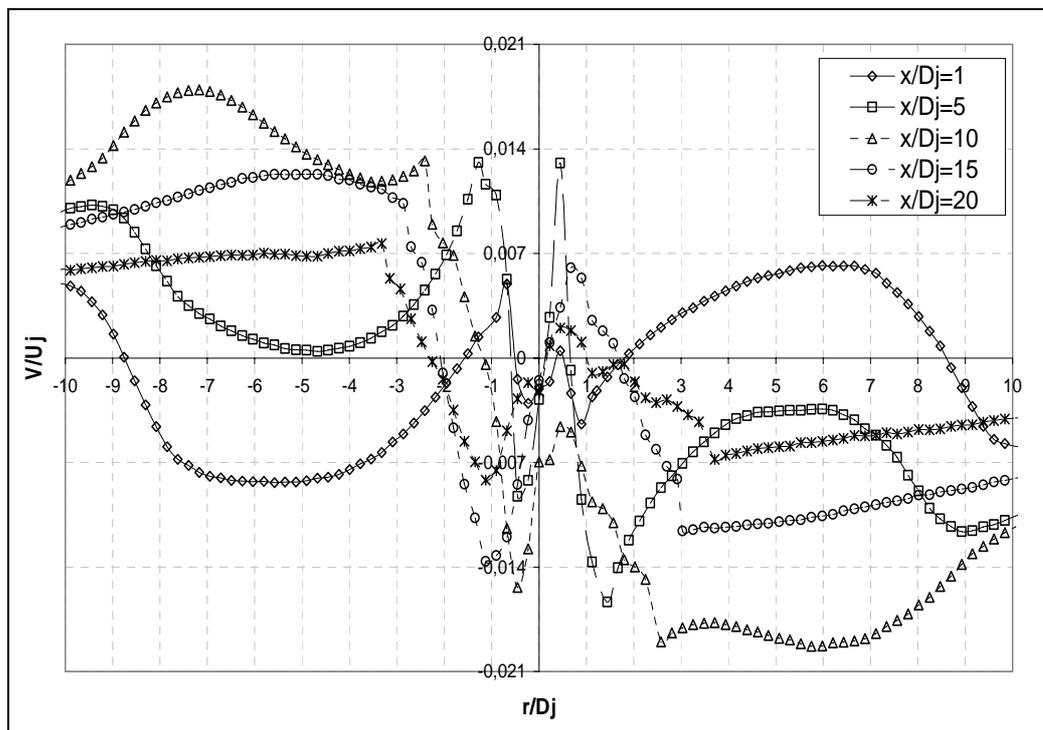


Figura 5.27 - Distribuição radial de velocidade média na direção transversal (V) para diferentes valores da coordenada longitudinal e $\Delta T=80 \mu s$.

Na **Figura 5.28** pode-se observar que a tendência das curvas de distribuição de intensidade turbulenta (u'/U_j) é a mesma observada na análise com o LDV. O valor máximo encontrado é $u'/U_j=0,17$; correspondente ao perfil $x/D_j=1$ em

$r/D_j=0,45$; ou seja, nas imediações da periferia do jato central onde ocorrem os maiores valores do gradiente de velocidade média. Como mostrado na **Figura 5.29**, que traz a evolução radial da intensidade turbulenta transversal para diversos valores da coordenada longitudinal, os níveis de flutuação do movimento turbulento radial são menores que seu correspondente longitudinal. Também pode ser observado nesta figura que o valor máximo de intensidade da turbulência v'/U_j é 0,075; o qual é encontrado no centro do jato a $x/D_j=10$.

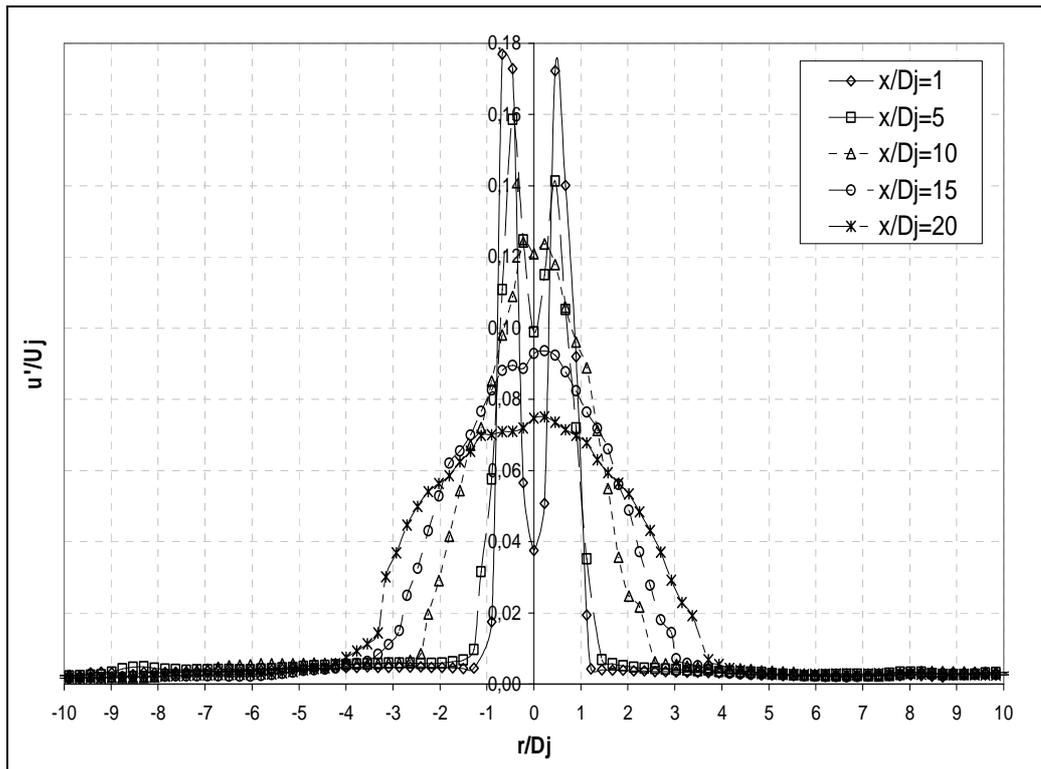


Figura 5.28 – Distribuição radial da intensidade turbulenta na direção longitudinal (u'/U_j) para diferentes valores da coordenada longitudinal e $\Delta T=5 \mu s$.

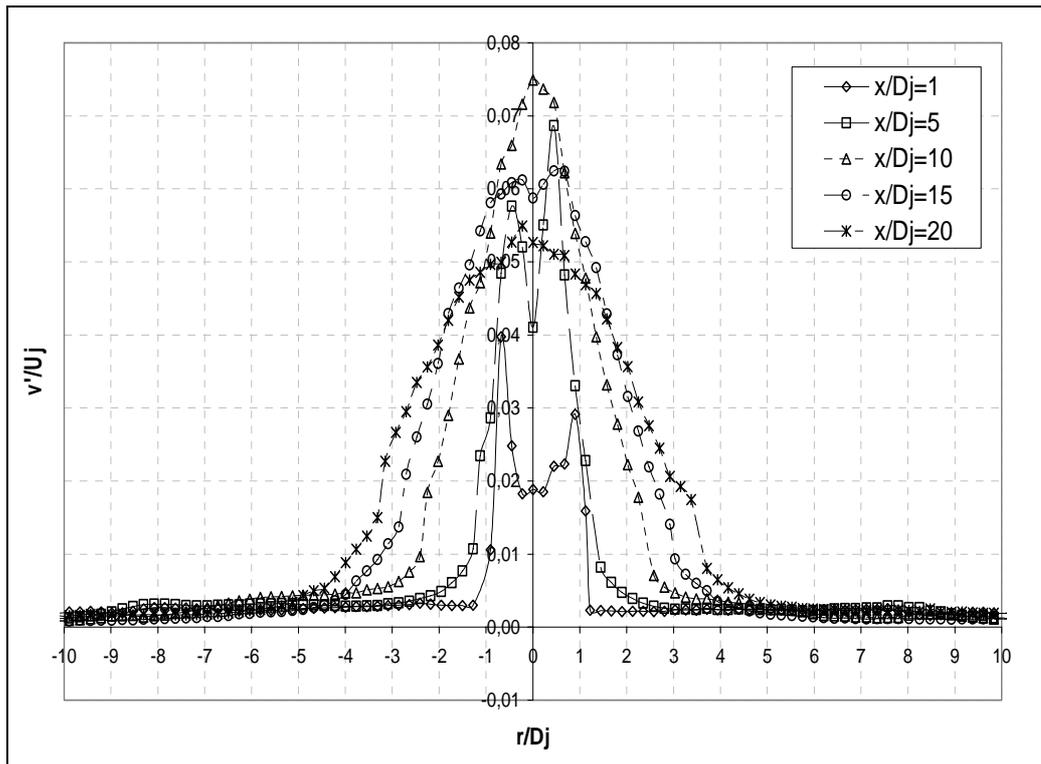


Figura 5.29 – Distribuição radial da intensidade turbulenta na direção transversal (v'/U_j) para diferentes valores da coordenada longitudinal e $\Delta T = 5 \mu s$.

5.4 Resultados da simulação numérica

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos na simulação numérica, usando o programa computacional Ansys CFX10. Dois casos foram avaliados, o primeiro corresponde ao jato livre e o segundo ao escoamento de jato central com ar anular a velocidade média de 1,5 m/s. Em ambos os casos o número de Reynolds do jato central foi mantido constante e igual a 3870, o que corresponde a uma velocidade média de saída do jato de 27,5 m/s. Este valor moderado do número de Reynolds é considerado suficiente para o estudo dos escoamentos em questão.

Num primeiro momento, apenas resultados ilustrativos do processo de convergência e da estrutura do escoamento serão mostrados. Mais adiante, uma comparação detalhada entre resultados numéricos e experimentais será feita.

5.4.1 Simulação numérica do jato livre

Nas **figuras 5.30 e 5.31** são apresentados o histórico dos resíduos r.m.s. obtidos durante o processo de convergência das equações de transporte de quantidade de movimento e de massa, e das equações do modelo de turbulência SST usado, isto é, a de energia cinética turbulenta (k) e a frequência turbulenta (ω) definidas no capítulo 4. Como pode ser observado em ambas as figuras a convergência é de natureza flutuante. Após 1000 iterações, os resíduos das equações possuem todos os valores inferiores à 10^{-5} , o que é considerado satisfatório, uma vez que foi utilizada uma versão de precisão simples do programa.

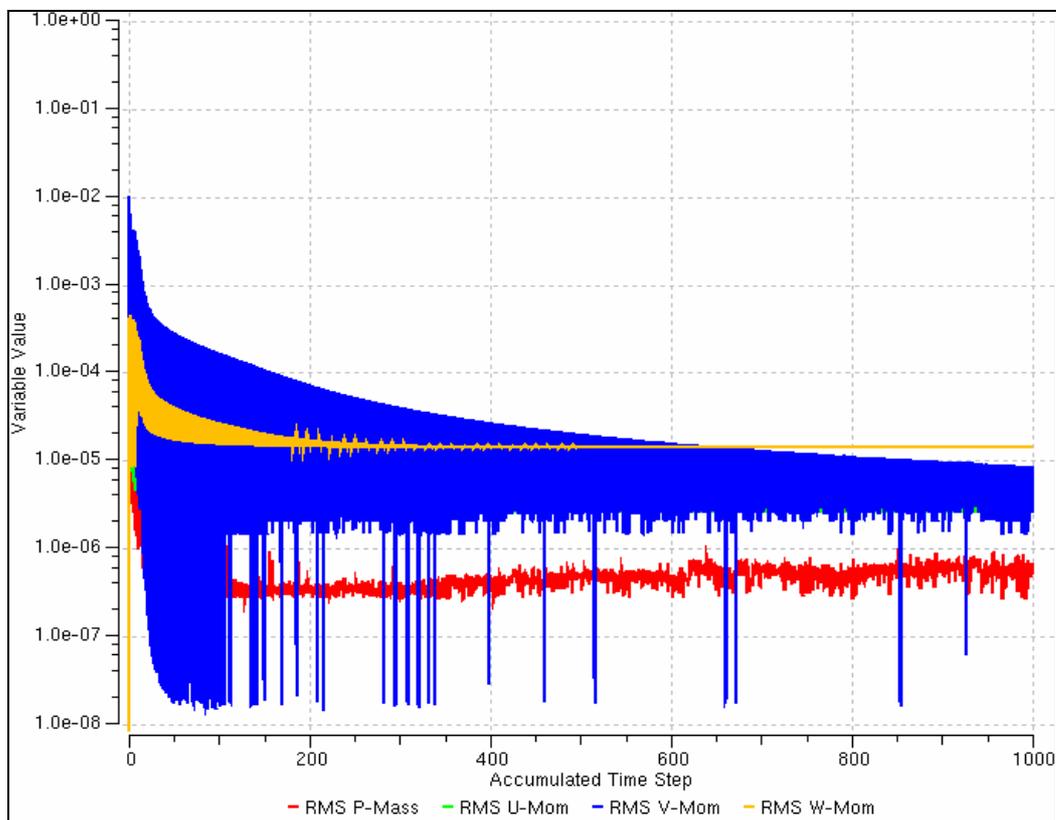


Figura 5.30 – Histórico de convergência de valores RMS do resíduo das equações de transporte de massa e de quantidade de momento para jato livre inerte.

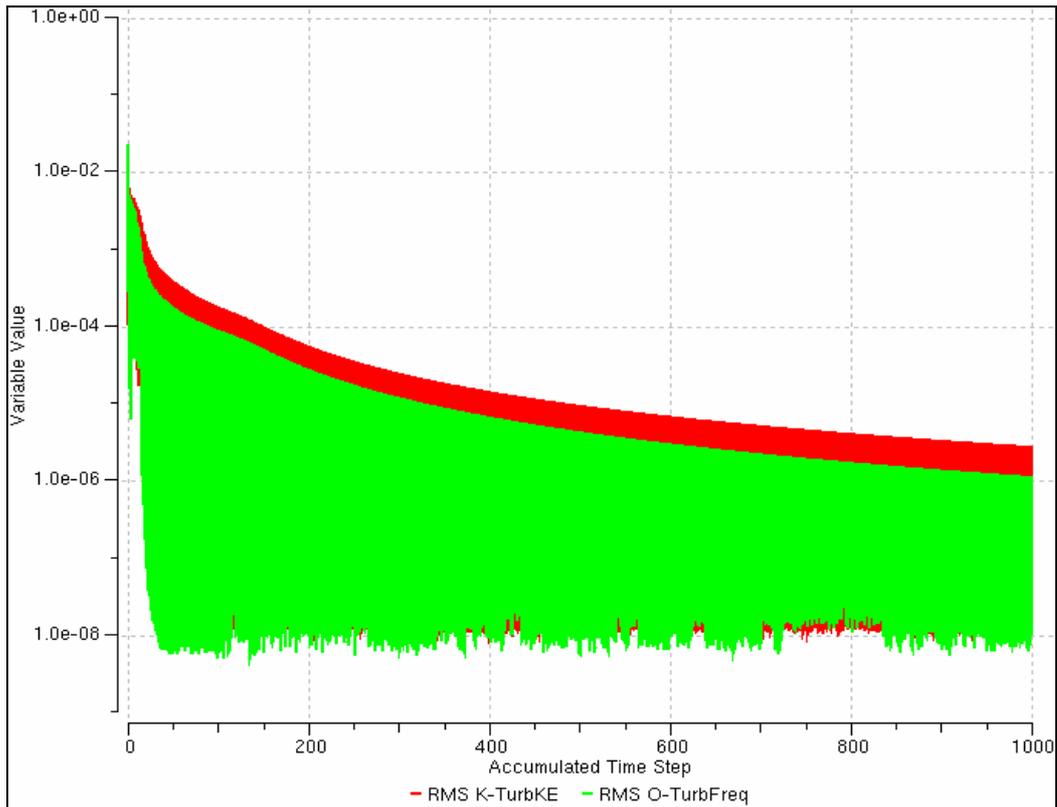


Figura 5.31 – Histórico de convergência de valores RMS do resíduo das equações do modelo de turbulência SST para jato livre inerte.

Nas **Figuras 5.32 e 5.33** são apresentadas as linhas de corrente coloridas pelo módulo da velocidade e o campo de vetores no plano (x,r) , respectivamente. Na primeira destas figuras se observam as trajetórias seguidas pelas partículas fluidas no escoamento de esquerda para a direita, onde os espaços vazios em branco indicam o fundo do gráfico. Na segunda figura pode-se observar a tendência de espalhamento radial da velocidade média. A estrutura do escoamento calculado é similar àquela obtida a partir dos resultados experimentais.

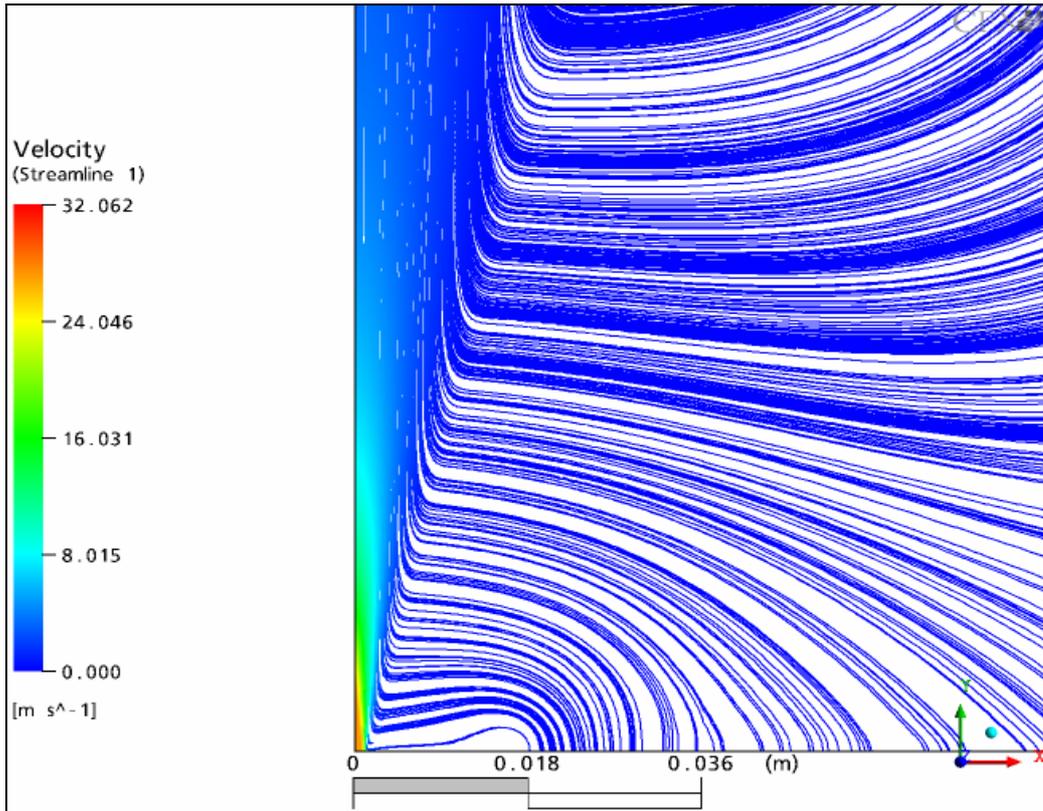


Figura 5.32 – Linhas de corrente baseadas na velocidade média no caso do escoamento para jato livre inerte.

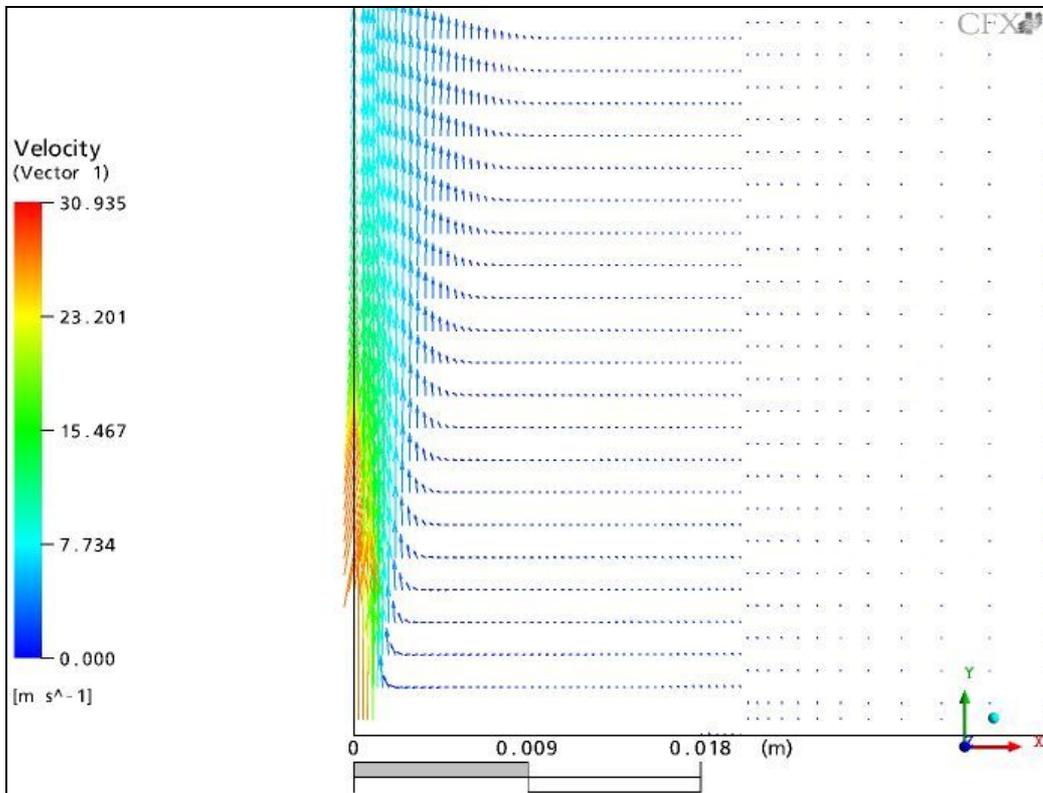


Figura 5.33 – Vetores velocidade média para jato livre inerte.

5.4.2 Simulação numérica do jato com obstáculo

Nas **Figuras 5.34 e 5.35** são apresentadas os históricos de convergência dos resíduos r.m.s. das equações de transporte de massa e de quantidade de movimento, e do modelo de duas equações de turbulência SST, respectivamente. Como pode-se observar nestas figuras, o nível de resíduo cai rapidamente nas 100 primeiras iterações. Em seguida, porém, flutuações de grande amplitude do valor r.m.s. ocorrem até o final do tempo de cálculo.

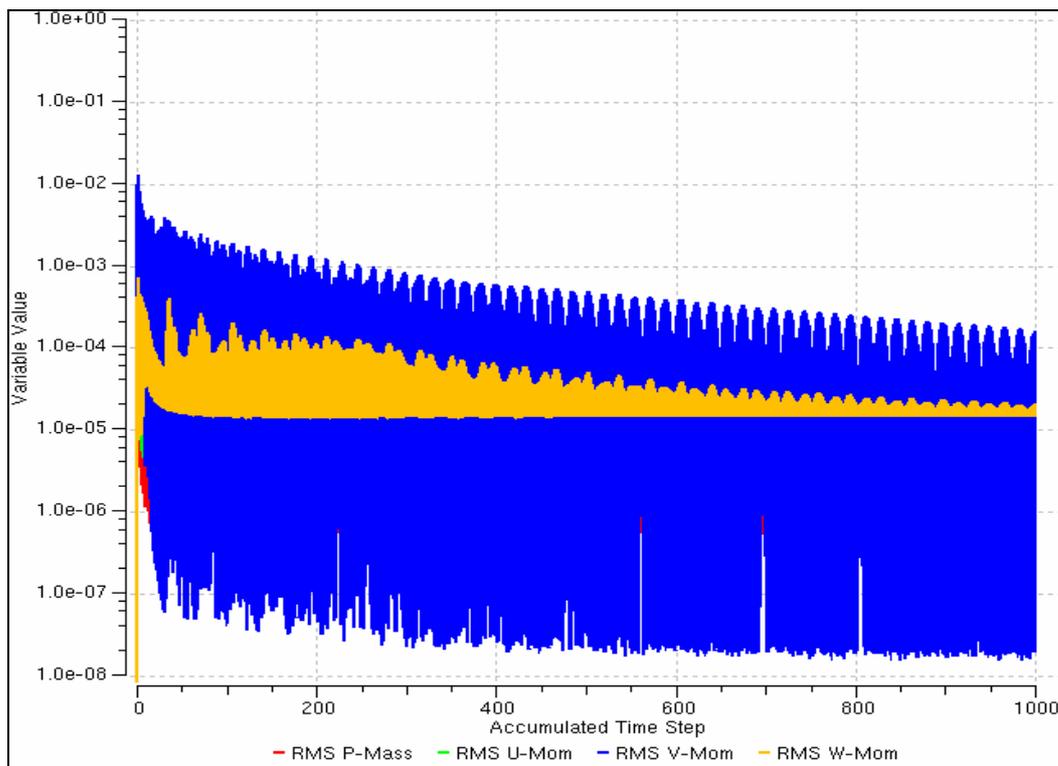


Figura 5.34 – Histórico de convergência de valores RMS do resíduo das equações de transporte de massa e de quantidade de movimento para jato inerte com obstáculo.

São apresentadas na **Figura 5.36** as trajetórias das partículas fluidas, ou linhas de corrente, do escoamento as quais foram coloridas pelo módulo da velocidade. É claramente observada a formação de um vórtice a jusante da face do queimador. Na **Figura 5.37** se mostra o campo de vetores, o que permite identificar a região de mistura que delimita o jato central.

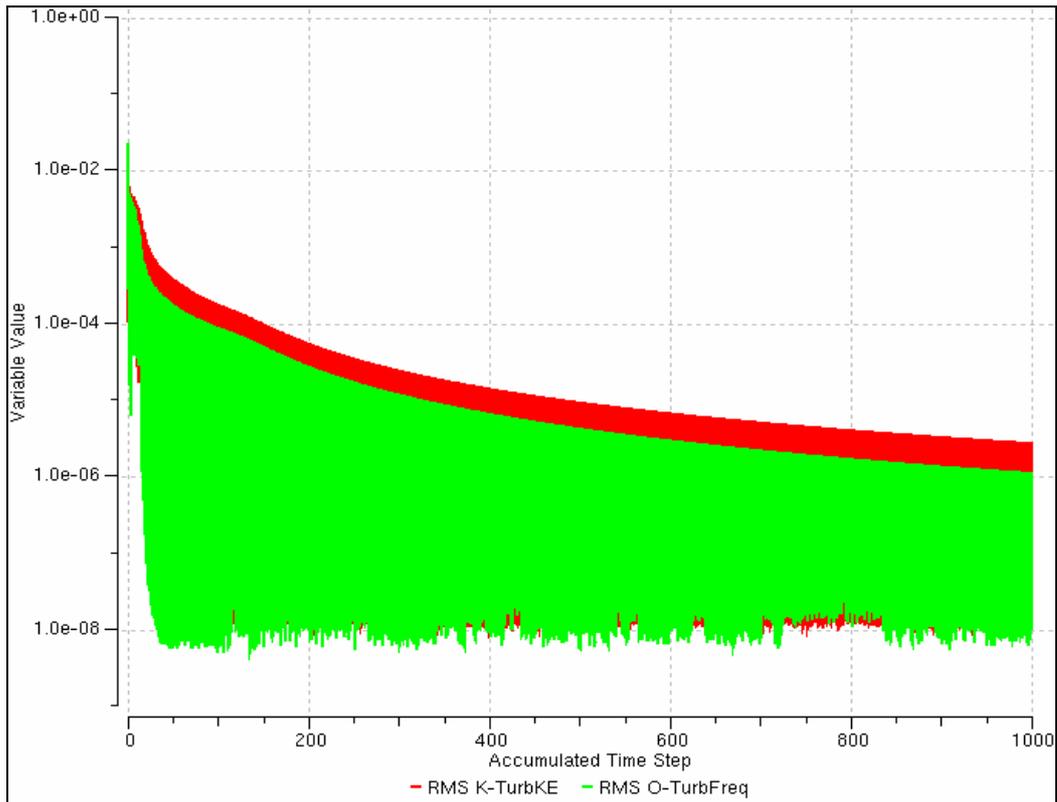


Figura 5.35 - Histórico de convergência de valores RMS do resíduo das equações do modelo de turbulência SST para jato inerte com obstáculo.

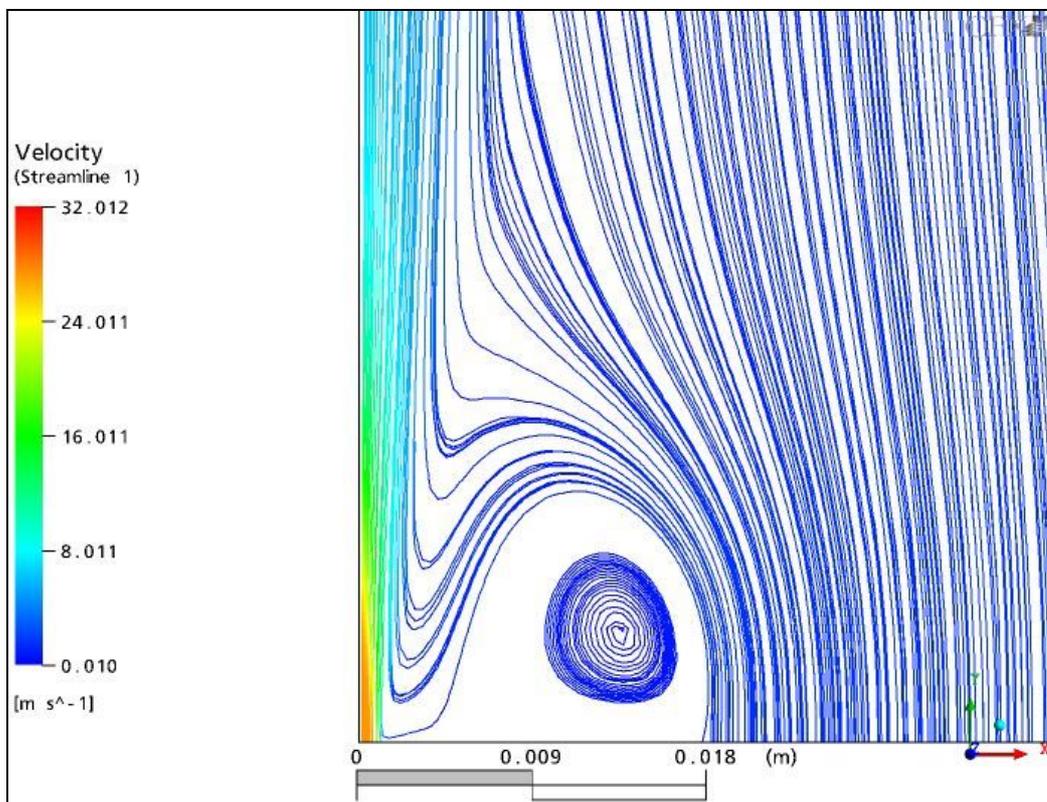


Figura 5.36 - Linhas de corrente baseadas na velocidade média no caso do escoamento para jato inerte com obstáculo.

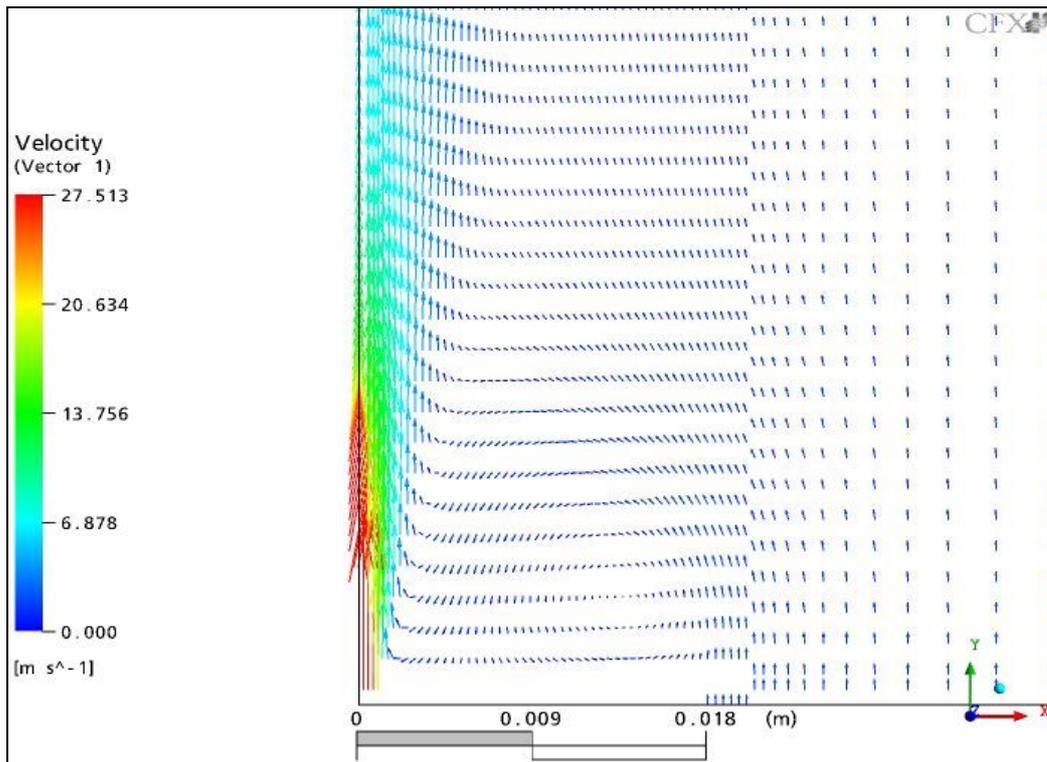


Figura 5.37 – Vetores velocidade média para jato inerte com obstáculo.

5.5

Análise comparativa do escoamento com obstáculo

Nesta seção é apresentada a comparação dos resultados experimentais obtidos com as técnicas laser LDV e PIV detalhados nas seções anteriores e os oriundos da simulação numérica usando o programa de cálculo Ansys/CFX-10.

Serão analisadas quantitativa e qualitativamente as principais características do campo de velocidade média (normalizado pela velocidade média de saída do jato central) e a intensidade turbulenta. Uma vez que todas as figuras desta seção envolvem principalmente a comparação entre os resultados experimentais e numéricos.

Para o melhor analisar, os resultados obtidos serão apresentados em duas seções, a primeira traz a evolução da velocidade na direção longitudinal ao longo da linha de centro e a segunda mostra a distribuição de velocidade na direção transversal para diferentes deslocamentos longitudinais.

5.5.1

Distribuição longitudinal da velocidade média e intensidade turbulenta ao longo do eixo de simetria

Nesta seção, na primeira **Figura 5.38** é mostrada a velocidade média longitudinal (U) ao longo do eixo $r=0$. Nesta figura podem ser claramente discernidas as regiões do núcleo potencial e a de jato desenvolvido. Os resultados experimentais LDV e PIV apresentam uma boa concordância entre si, em particular na região de núcleo potencial e no início da região de desenvolvimento do escoamento.

O comprimento da região potencial é cerca de $x/D_j=5$ no caso das medições, mas no caso da simulação apenas é $x/D_j=3$. Uma região de transição aparece em seguida, a qual é afetada pela troca de quantidade de movimento entre o jato central e a região de recirculação. Um decréscimo da velocidade longitudinal é observado nesta região. Note-se que a taxa de decaimento da velocidade na zona inicial de desenvolvimento do jato é praticamente idêntica nos três casos após de $x/D_j=20$. A discrepância na região de transição das medidas com respeito à simulação CFD pode ser atribuída à escolha das condições de contorno para o jato central, em termos de flutuação de velocidade. Entre tanto, um estudo de sensibilidade não foi realizada.

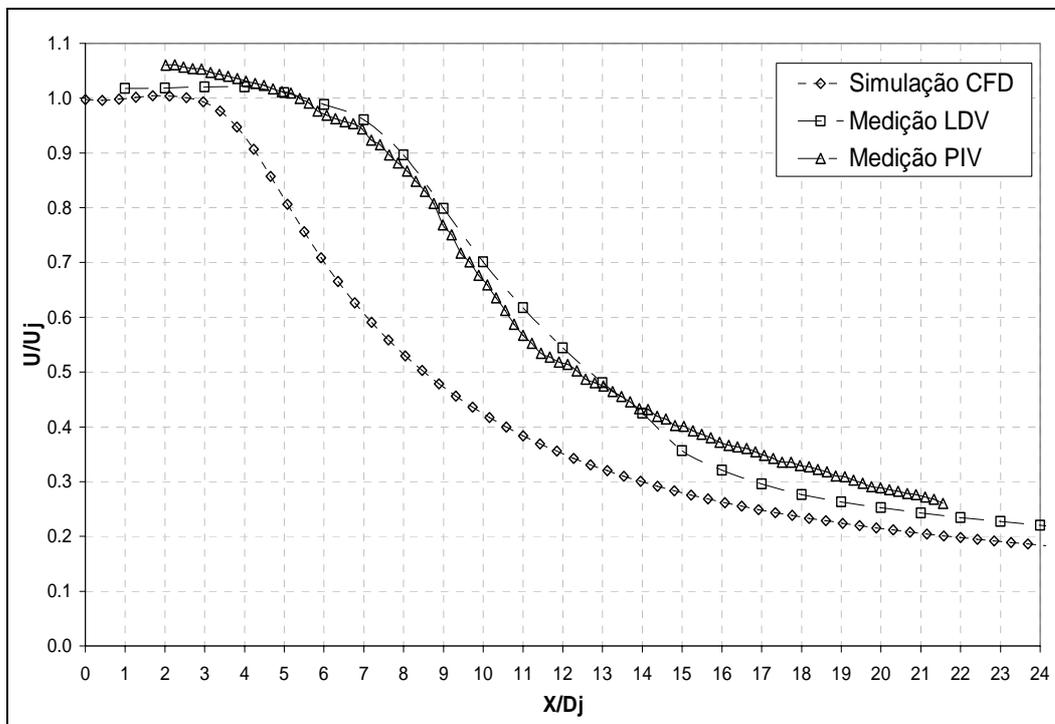


Figura 5.38 – Comparação da evolução da velocidade média longitudinal (U) ao longo da direção longitudinal.

A distribuição da intensidade turbulentas longitudinais (u'/U_j) ao longo da linha de centro é mostrada na **Figura 5.39**, onde se observa que os valores máximos obtidos experimentalmente estão em torno do 17% e ocorrem próximo à posição longitudinal de $x/D_j=10$. Outra característica importante pode ser observada na região potencial, $x/D_j < 5$, e na região de transição, $x/D_j < 20$; onde os resultados experimentais divergem entre si. Isto pode ser atribuído à pequena quantidade de vetores válidos nesta região para o processamento PIV das flutuações turbulentas r.m.s. Este tipo de discrepância pode ser diminuída registrando-se uma amostragem com maior quantidade de imagens. Admite-se aqui que o resultado mais confiável é o obtido pela técnica LDV.

Os resultados oscilatórios obtidos com a técnica PIV poderiam ser atribuídos ao efeito de peak locking [22]; o qual é uma consequência de uma baixa resolução na avaliação dos picos de correlação cruzada na determinação dos deslocamentos em pixels das imagens obtidas das partículas traçadoras. Em alguns casos o estimador de pico sub-pixel desta correlação cruzada pode não definir com exatidão os deslocamentos de partículas, determinando erroneamente estes picos, levando à diminuição do número de vetores válidos.

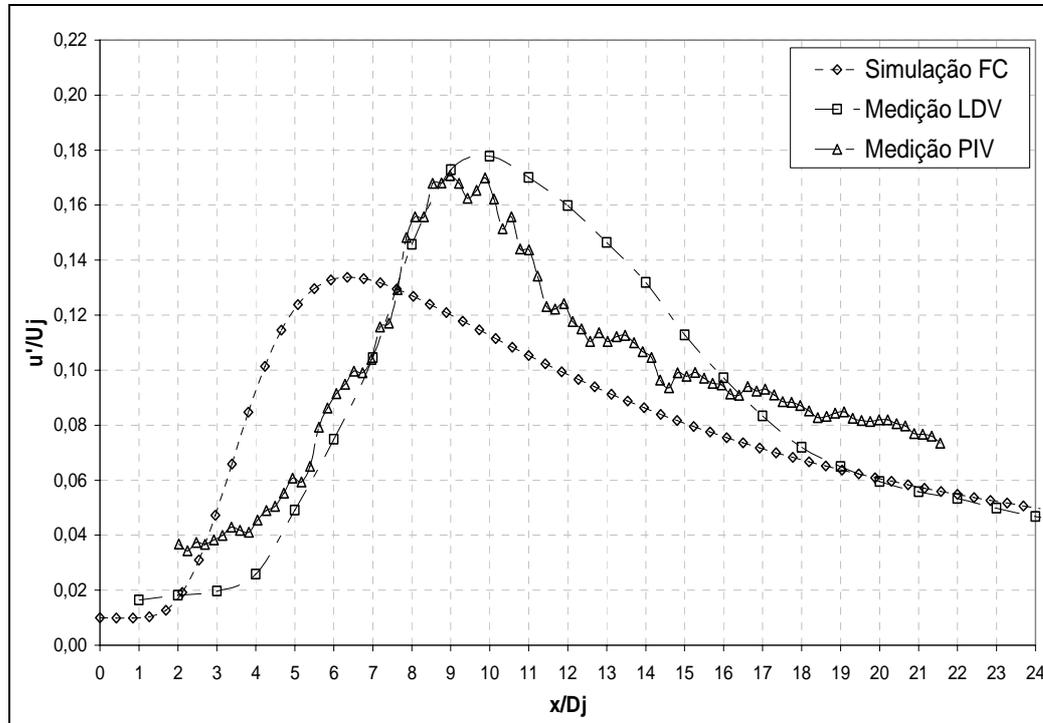


Figura 5.39 – Comparação da evolução da intensidade turbulenta na direção longitudinal (u'/U_j) ao longo da direção longitudinal.

No caso da simulação CFD na **Figura 5.39** e **5.40** o valor das intensidades turbulentas u'/U_j e v'/U_j foram calculados a partir da energia cinética turbulenta,

assumindo-se a condição de isotropia. O cálculo numérico antecipa a localização e subestima o valor da intensidade turbulenta longitudinal máxima em $r=0$.

Na **Figura 5.40** é mostrada a intensidade turbulenta transversal (v'/U_j) no eixo $r=0$, onde os resultados experimentais apresentam uma tendência similar e um máximo local no intervalo $9 < x/D_j < 10$, sendo este valor em torno de 8 % de U_j . Após deste máximo uma grande discrepância é observada entre a medição LDV e a PIV, a qual é devida à dificuldade do processamento na região central afastada, a qual contém pequena quantidade de partículas traçadoras para a medição da componente transversal da velocidade. Assim, a tendência mais confiável de v'/U_j é para o PIV, onde foram adquiridos os campos de velocidade transversal de dimensões reduzidas até $x/D_j=21$ com um menor intervalo de tempo entre pulsos laser de 5 μ s, isto para reproduzir com melhor resolução as interações ocorridas na região do jato central.

Adicionalmente, a comparação das **Figuras 5.39** e **5.40** indicam que a hipótese de isotropia, que encontra-se na base do modelo SST, não é respeitada ao longo do eixo $r=0$.

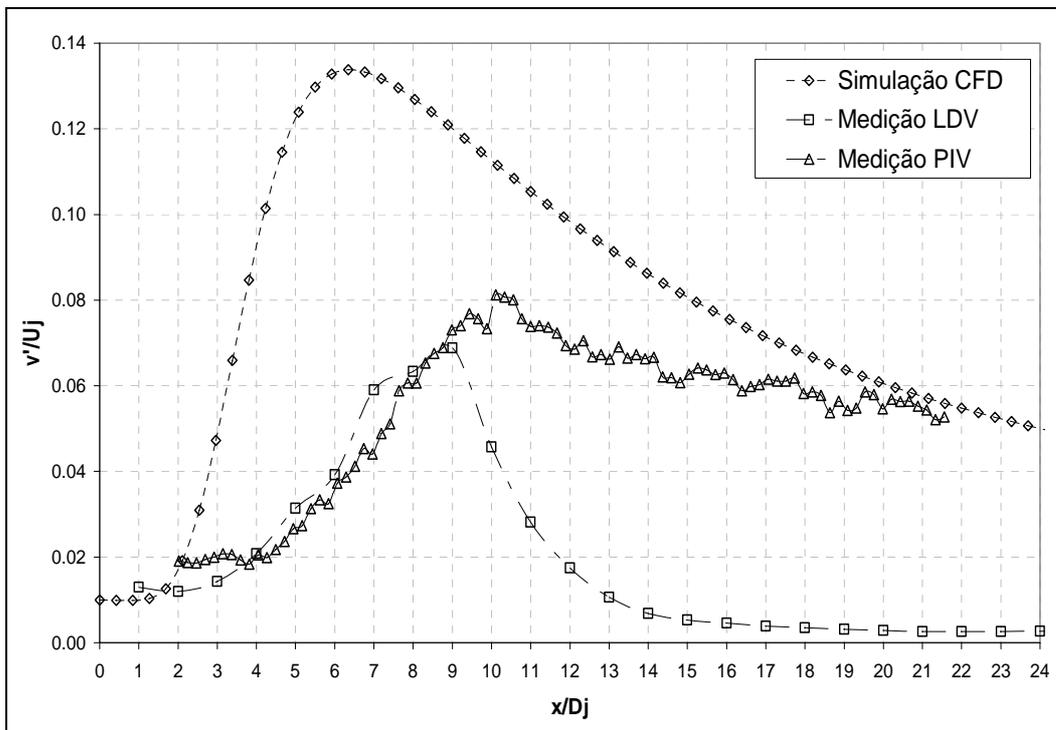


Figura 5.40 – Comparação da evolução da intensidade turbulenta na direção transversal (v'/U_j) ao longo da direção longitudinal.

5.5.2

Distribuição radial da velocidade média e intensidade turbulenta para diversos deslocamentos longitudinais

A **Figura 5.41** mostra a comparação entre resultados experimentais e numéricos das distribuições radiais de velocidade longitudinal obtidas em diversas posições longitudinais do escoamento. Por simplicidade só são mostrados valores obtidos para o semi-eixo radial positivo. Na primeira posição longitudinal, $x/D_j=1$, se observa a coincidência da velocidade máxima no centro, $U/U_j=1,056$, obtidas com ambas as técnicas experimentais, entretanto o espalhamento radial do jato central é maior no caso do resultado obtido com o PIV. Neste caso, a velocidade longitudinal se anula em $r/D_j=1,125$, o que ocorre no caso de medição LDV em $r/D_j=0,5$. Note-se que $u=0$ define o início da região de recirculação na vizinhança da superfície do queimador.

O resultado de cálculo CFD exhibe um ótimo acordo com a medição PIV. Para $x/D_j=1$ a zona de estagnação é encontrada na faixa de $0,5 < r/D_j < 3,9$ para o LDV, enquanto no caso do PIV esta corresponde à faixa de $1,125 < r/D_j < 6$, já no caso CFD, sua extensão radial é até $r/D_j=7$. Os valores mínimos de U/U_j nos casos das medições LDV, PIV e do cálculo CFD são respectivamente, $-0,017$, $-0,0078$ e $-0,051$.

Nesta figura também é possível verificar que, a partir de $x/D_j=5$, o espalhamento do jato no caso de CFD é consideravelmente menor do que aqueles obtidos experimentalmente. Este maior espalhamento calculado é acompanhado de uma sub-estimação das dimensões radiais e longitudinais da zona de recirculação. Esta zona de recirculação persiste até uma distância em torno de $x/D_j=10$ nos experimentos, e desaparece a uma distância compreendida entre $10D_j$ e $15D_j$ a jusante do queimador.

A análise da **Figura 5.41-(b)** obtida o deslocamento $x/D_j=5$, permite verificar que os valores experimentais de extensão da zona de recirculação são $0,7 < r/D_j < 5$, para o LDV, e $1,15 < r/D_j < 5,9$ para o PIV. Na região do ar anular o valor de U/U_j é $0,043$, para o caso de PIV e $0,05$ para o LDV. Além disto, o comportamento da velocidade média na região central do jato guarda as mesmas peculiaridades já observadas na primeira estação de medida, isto é, o espalhamento obtido com LDV é menor do que aquele obtido com PIV.

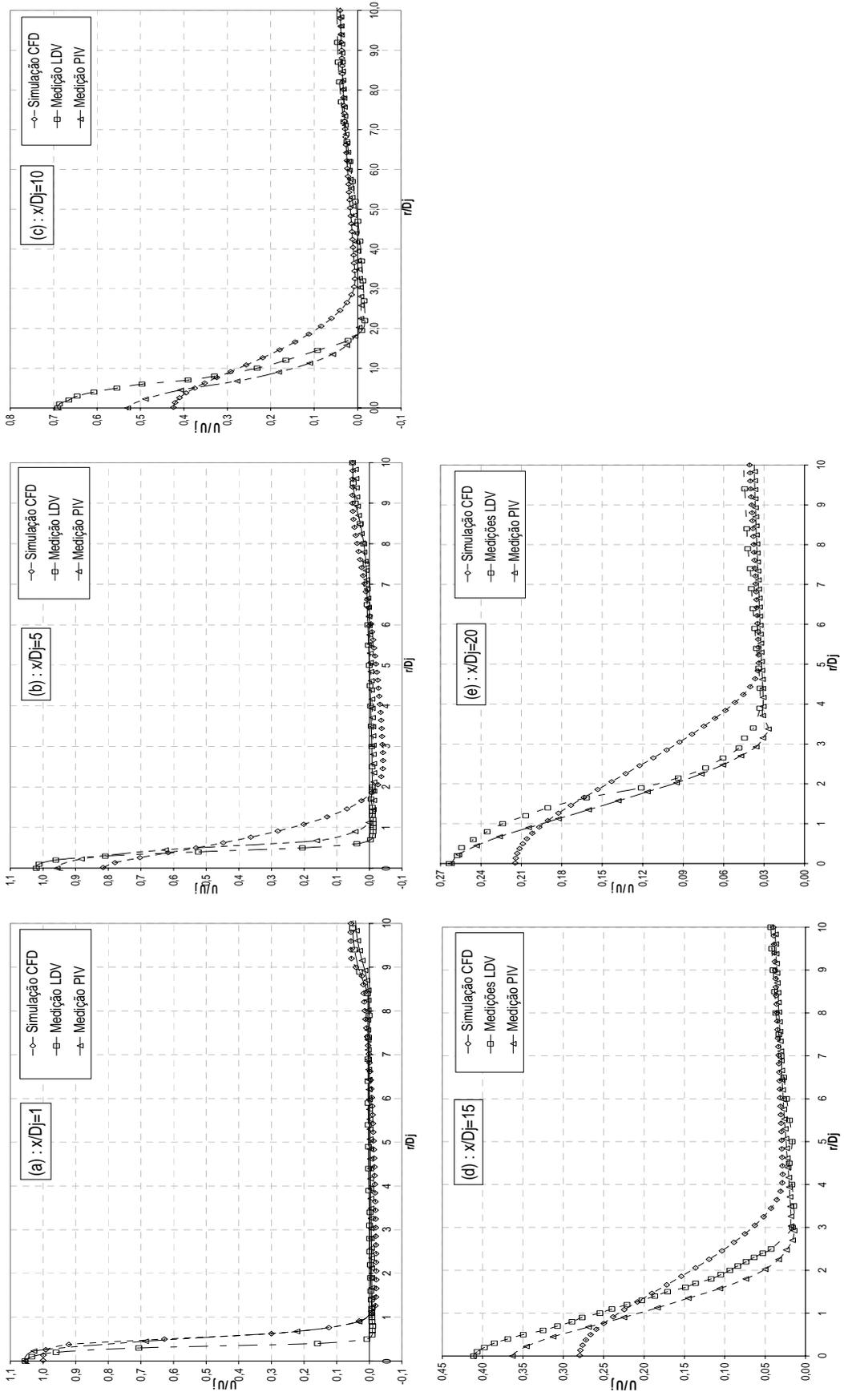


Figura 5.41 – Comparação de resultados PIV, LDV e CFD das distribuições radiais da velocidade média longitudinal (U/U_0) para diferentes deslocamentos longitudinais (x/D_j).

Na **Figura 5.41-(c)** pode-se observar que na região central do jato, um ponto de estagnação onde $U/U_j=0$ ocorre, é em $r/D_j= 1,9$ para ambas as técnicas experimentais. Por outro lado a zona de recirculação termina em $r/D_j=4,8$ para o caso PIV e em $r/D_j=3,9$ no caso de LDV. Todas as técnicas utilizadas levaram ao valor de $U/U_j=0,04$ na região de ar anular.

As distribuições radiais de velocidade longitudinal medidas em $x/D_j=15$ e 20, as quais são mostradas nas **Figuras 5.41-(d)** e **(e)** respectivamente, permitem constatar que a tendência observada nesta região é similar para os casos experimentais e a discrepância entre as medidas, não maior do que 5% de U_j , é menor do que aquela encontrada nas posições à montante. Note-se que, a partir de $x/D_j=15$ não há ocorrência de escoamento reverso.

A principal discrepância entre as medidas LDV e PIV da velocidade longitudinal U/U_j é observada na região de espalhamento radial do jato central a partir de $x/D_j=5$, na qual ocorre uma queda rápida da velocidade longitudinal, devido à troca de quantidade de movimento entre a região de recirculação e o jato. O resultado mais confiável é o obtido das medidas PIV, devido a que esta técnica laser de caráter instantâneo fornece nestas regiões de movimento lento e rápido uma representação aerodinâmica mais próxima do campo de velocidade pelo escoamento predominantemente axial.

A **Figura 5.42** mostra a evolução radial da velocidade transversal (V/U_j) para diferentes valores da posição longitudinal, x/D_j . As comparações que serão apresentadas aqui devem ser interpretadas com cautela, pois as medições desta componente são mais delicadas do que os da componente longitudinal.

Na primeira estação longitudinal $x/D_j=1$, percebe-se que as medidas obtidas com LDV e PIV apresentam um comportamento qualitativamente similar, em particular a região situada entre a zona de recirculação e o ar anular próximo a $r/D_j= 8,5$. A velocidade transversal calculada na simulação atinge extremos cujo valor absoluto é até 10 vezes maior do que o determinado nos experimentos.

Adicionalmente, a componente radial do gradiente da velocidade na direção radial é muito maior no cálculo CFD, do que nos resultados experimentais.

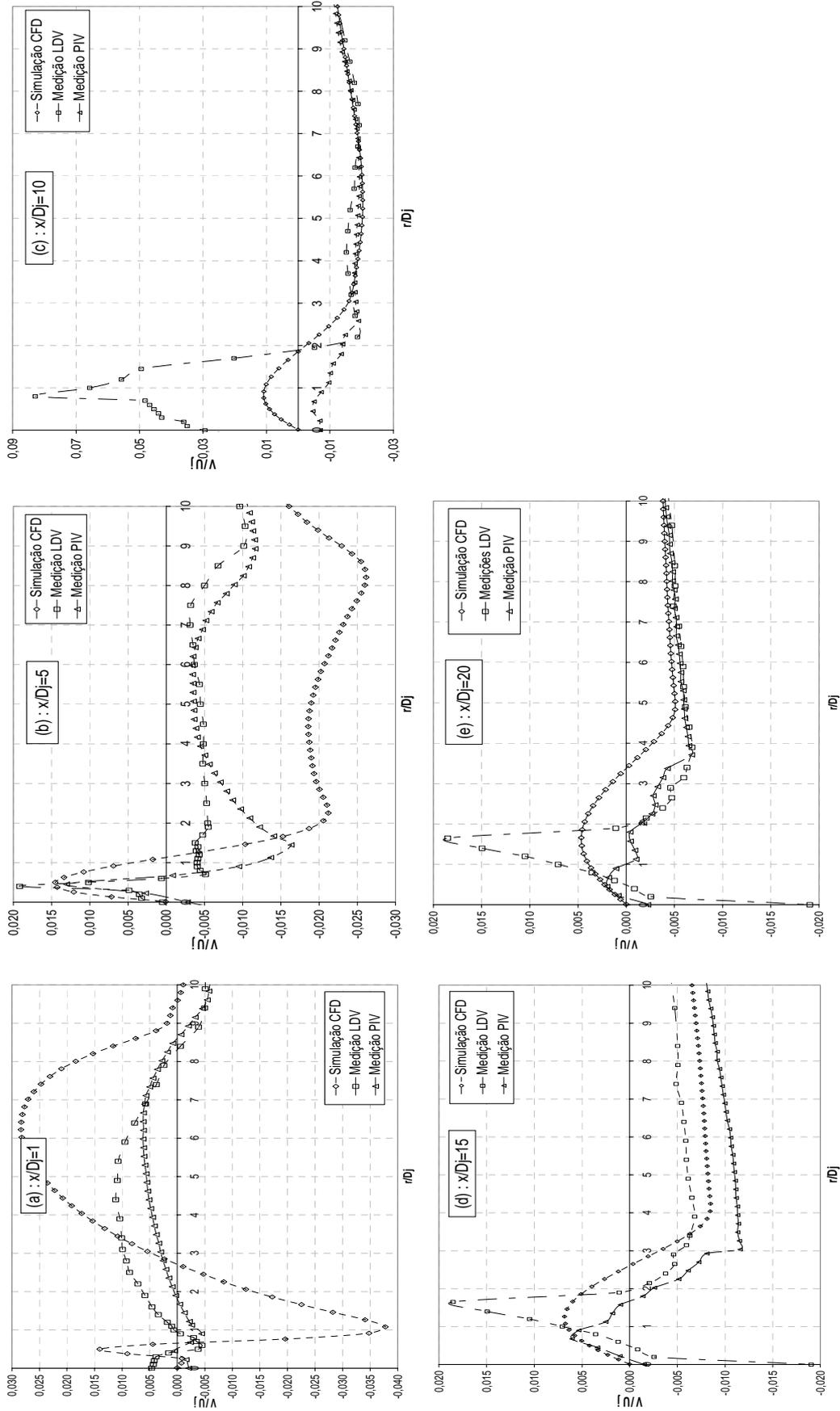


Figura 5.42 – Comparação de resultados PIV, LDV e CFD das distribuições radiais da velocidade média transversal (V/U_j) para diferentes deslocamentos longitudinais (x/D_j).

A determinação da origem da discrepância entre cálculo e experimento, fora do alcance do presente trabalho, requer um estudo de sensibilidade do resultado calculado ao refinamento da malha computacional e à escolha das condições de contorno.

A **Figura 5.42-(b)** mostra a variação de V/U_j com r/D_j para $x/D_j=5$. A tendência calculada da evolução de V/U_j é em melhor acordo com os resultados experimentais do que na posição a montante ($x/D_j=1$). Assim, o valor máximo de V/U_j previsto pelo cálculo na vizinhança do eixo $r=0$ situa-se entre os valores experimentais. Porém, devido à expansão lateral do jato ser super-estimada nos resultados de cálculo, o valor absoluto da velocidade de “entrainment” obtida numericamente é 4 vezes maior do que os experimentais.

A partir de $x/D_j=10$ da **Figura 5.42**, os resultados experimentais e numéricos apresentam uma grande discrepância na vizinhança do eixo $r=0$ e um excelente acordo para os maiores valores de r . Os resultados do LDV na vizinhança do jato central são particularmente anômalos e indicam problemas na aquisição de dados.

A discrepância geral encontrada entre as medidas experimentais da velocidade transversal V/V_j pode ser atribuída principalmente à limitação do equipamento LDV na medição desta componente na região central e de estagnação de um escoamento predominantemente axial. As medidas mais confiáveis são as oferecidas pela técnica PIV, podendo ser melhoradas especialmente acertando os valores do lapso entre pulsos laser relativamente altos na zona de estagnação onde o escoamento é reverso e lento, e assim obter os valores desta componente de forma mais precisa.

Na **Figura 5.43** se mostra a variação radial da intensidade turbulenta na direção longitudinal (u'/U_j) para diversos valores de x/D_j . Na primeira das posições longitudinais uma excelente concordância é observada entre os resultados obtidos com as técnicas PIV e CFD. Por outro lado, a técnica LDV subestima o valor máximo de $u'/U_j=0,07$, o qual é menos da metade do obtido com as outras duas técnicas. Baixos valores da intensidade turbulenta (u'/U_j) cerca de 0,04% e 0,02% são observados na zona de recirculação. A extensão radial da região fortemente turbulenta no caso das medidas LDV, é 50% menor do que a obtida com as técnicas PIV e CFD. Esta discrepância é condizente com aquela observada nos resultados obtidos para a distribuição radial da velocidade média.

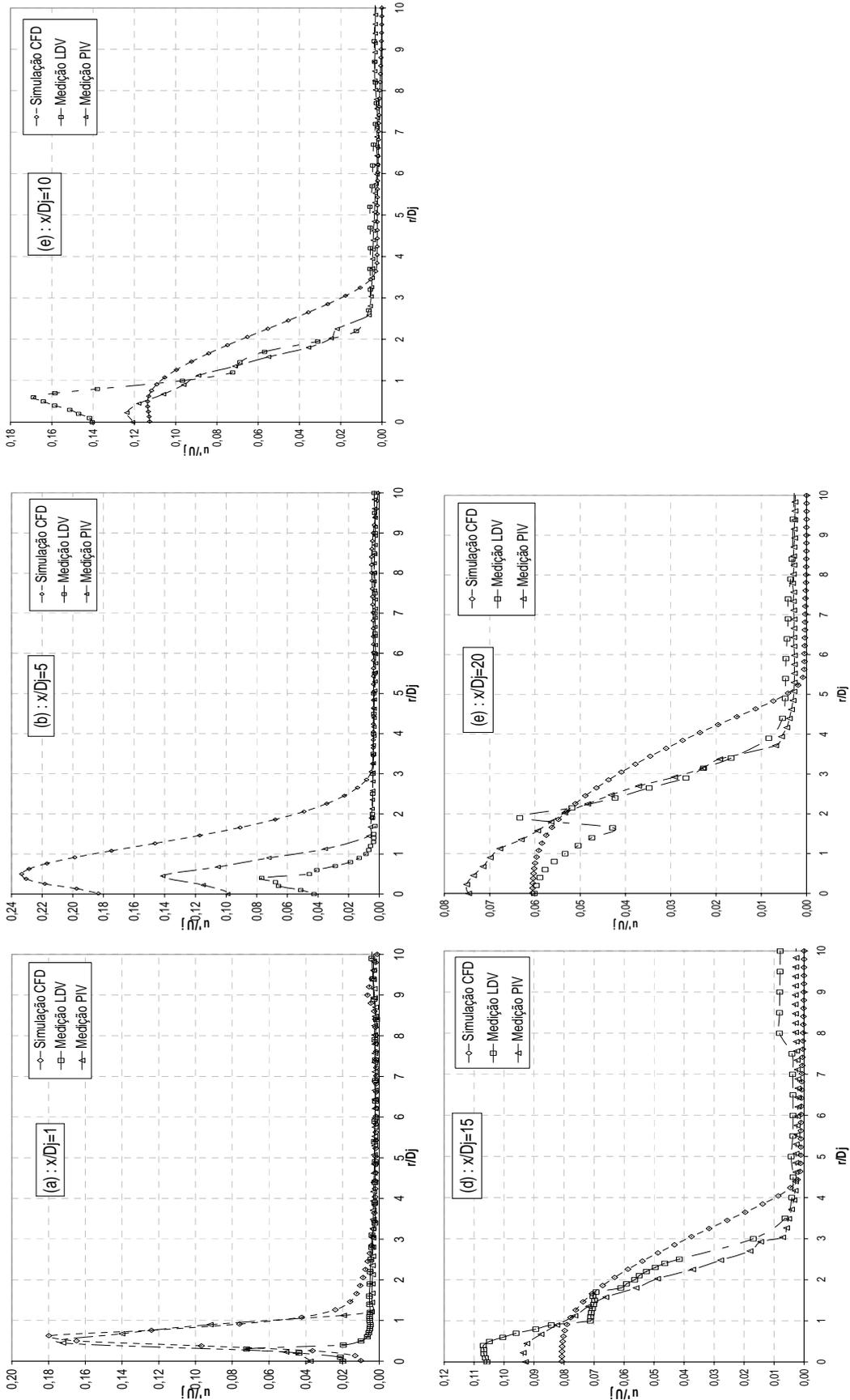


Figura 5.43 – Comparação de resultados PIV, LDV e CFD das distribuições radiais da intensidade turbulenta longitudinal (u'/U_j) para diferentes deslocamentos longitudinais.

Uma diferença entre valores experimentais e computacionais é observada na segunda posição longitudinal, $x/D_j=5$. O valor máximo de intensidade turbulenta calculada é quase duas vezes do que aquele obtido com o PIV, que por sua vez também é o dobro do valor obtido com LDV. A extensão lateral afetada pela turbulência também segue, qualitativamente, esta mesma progressão discrepante.

Como pode ser visto na **Figura 5.43**, a partir da posição $x/D_j=10$, os resultados obtidos com CFD subestimam o valor de u'/U_j na vizinhança do centro do jato, em relação a ambas as técnicas experimentais. Por outro lado, os resultados numéricos superestimam estes valores na periferia do jato. Nestas três posições os resultados obtidos com o LDV na vizinhança do eixo $r=0$ apresentam comportamento não monotônico incompatível com escoamento no regime do contínuo.

Na posição de $x/D_j=10$ os níveis de turbulência u' são coincidentes para as três técnicas após de $r/D_j=3,48$ na região de recirculação e estão em torno de 0,4%, valores estes muito baixos em comparação com a região central. No caso de $x/D_j=15$ a intensidade turbulenta u'/U_j obtida nos casos experimentais tende a convergir a níveis de turbulência de 0,37%, após de $r/D_j= 3,5$.

As discrepâncias observadas nas medições laser da intensidade turbulenta longitudinal u'/U_j podem ser devidas à escolha dos parâmetros de operação do equipamento de medição, especialmente no caso do LDV, pois estes resultados dependem da taxa de sinais das partículas traçadoras e da incerteza da velocidade média obtida. Cabe notar que na periferia do escoamento, externo à zona de recirculação, uma excelente concordância existe entre as duas técnicas. A técnica PIV oferece os resultados mais confiáveis, pois nos fornece a possibilidade de caracterizar a natureza dual da aerodinâmica do escoamento, as regiões lenta e rápida em forma instantânea ajustando-se de forma adequada o intervalo entre pulsos laser e aumentando-se a quantidade de imagens registradas de modo a otimizar o cálculo das flutuações turbulentas r.m.s. obtidas do campo de velocidade.

Na **Figura 5.44** é mostrada a evolução radial da componente transversal da intensidade turbulenta (v'/U_j) para diferentes posições longitudinais. Uma grande discrepância entre as três técnicas utilizadas foi obtida na posição $x/D_j=1$. Esta discrepância qualitativa acompanha aquela obtida para os valores médios da velocidade radial, a qual foi mostrada na **Figura 5.42-(a)**.

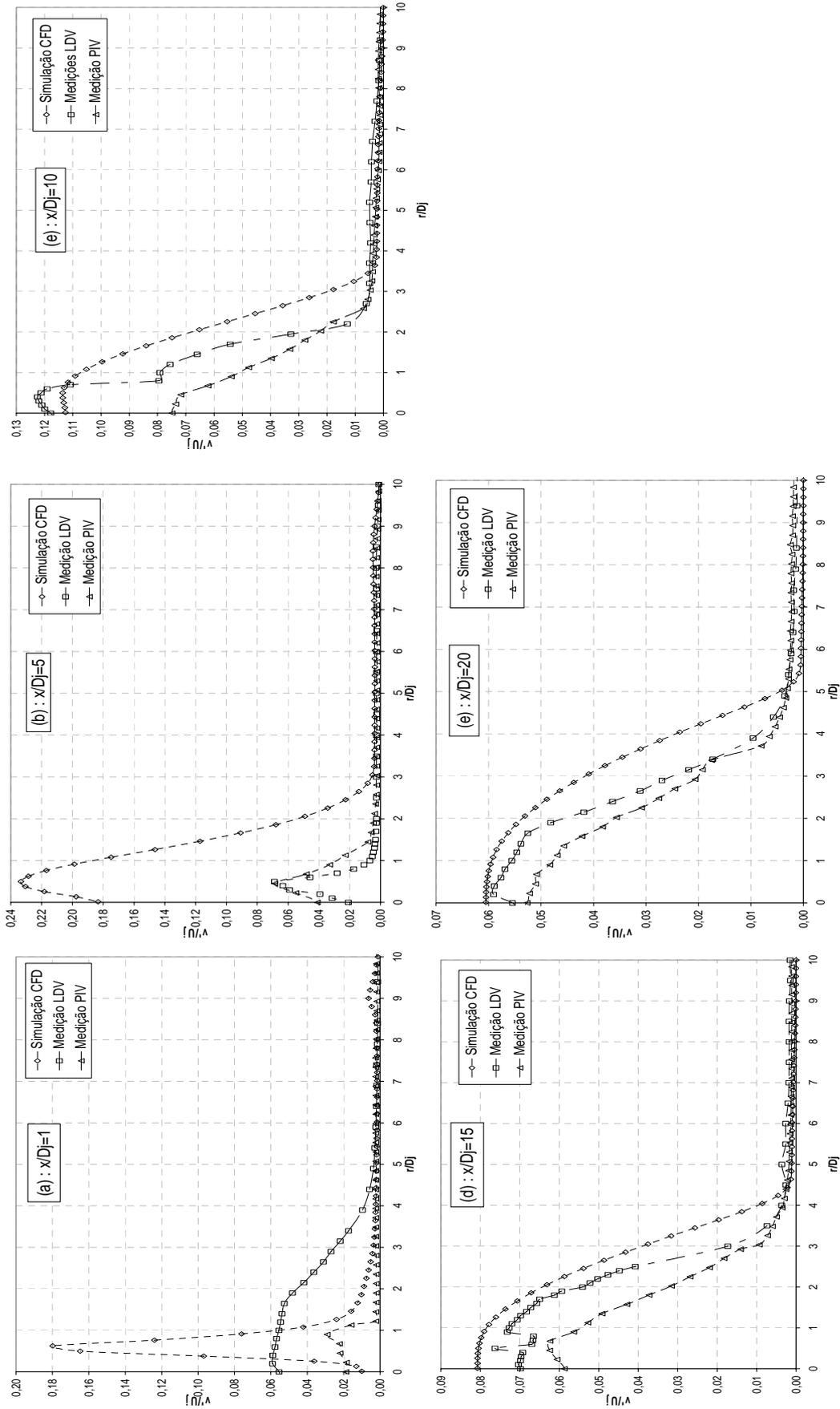


Figura 5.44 – Comparação de resultados PIV, LDV e CFD das distribuições radiais da intensidade turbulenta transversal (v'/U_j) para diferentes deslocamentos longitudinais.

Na segunda estação longitudinal, $x/D_j=10$, um bom acordo é obtido entre as técnicas experimentais, enquanto que os valores calculados de v'/U_j são muito maiores do que estes. Em particular, o valor máximo de v'/U_j é 0,24 nos cálculos, e 0,075 nos experimentos PIV a técnica laser mais confiável.

As discrepâncias entre cálculo e experimentos obtidas nestas primeiras posições longitudinais, tanto em termos de velocidade média, quanto de intensidade turbulenta, indicam que é indispensável a utilização de um modelo de turbulência capaz de levar em conta a anisotropia das flutuações turbulentas para que uma correta predição do escoamento seja realizada.

A **Figura 5.44** mostra que, a partir da seção $x/D_j=15$, um bom acordo qualitativo foi obtido entre resultados experimentais e de simulação. Na medida em que o jato se desenvolve as discrepâncias observadas diminuem, sem que, no entanto, um bom acordo quantitativo seja alcançado.

As discrepâncias observadas nas medições LDV e PIV das intensidades turbulentas transversais v'/U_j podem ser atribuídas à natureza do escoamento predominantemente axial e reverso na regiões central e de recirculação, como foi mencionado no caso da obtenção da velocidade média. Isto é devido ao fraco sinal desta componente. A técnica PIV neste caso também oferece a maior qualidade dos dados obtidos, podendo ser melhorada aumentando-se tanto a quantidade de imagens registradas, como melhorando-se a qualidade da resolução usando algoritmos matemáticos que permitam um processamento ótimo e simplificado.

Em resumo, alias de identificar as principais regiões do escoamento operando com o número de Reynolds do jato central de 3870, a zona de interesse para o análise deste escoamento usando a técnica mais confiável como o PIV encontra-se na região de recirculação, a qual é caracterizada pela formação de um vórtice toroidal, produto da interação dos dois escoamentos. Nesta região foram encontrados os mais baixos níveis da intensidade de turbulência, em torno de 0,4% para u'/U_j e v'/U_j .

A linha de estagnação externa (definida como o local onde $V=0$) é influenciada pelo ar anular e se inicia em $r/D_j=4$ e contém o centro do vórtice contra-rotativo em $r/D_j=5,8$ e $x/D_j=3$. A linha de estagnação interna é influenciada pelo jato central e se inicia em $r/D_j=0,5$. Estas linhas convergem em um ponto localizado a jusante do queimador, aproximadamente em $x/D_j=11,5$ e $r/D_j=2$.

A região denominada desenvolvida é aquela onde a evolução radial de U é similar ao longo do eixo radial. Nesta região os máximos níveis da intensidade de turbulência foram atingidos na região central do jato com $u'/U_j=7,5\%$ e $v'/U_j=5,5\%$ e o mínimo para ambos foi de $0,25\%$.

As intensidades de turbulência mais altas estão concentradas na região central do jato, sendo as máximas de $u'/U_j=17\%$ e $v'/U_j=12\%$ em $x/D_j=10$.

Na região de estagnação foram encontradas as mais baixas velocidades média e turbulenta longitudinais, cujos valores estão em torno de $U/U_j=-0,017$ e $u'/U_j=0,005$.