

ESTUDO DE UM JATO CRUZADO COM A TÉCNICA DE PIV

Rafael de Mello Pereira

Universidade de Brasília – UnB – Departamento de Engenharia Mecânica – Laboratório de Energia e Ambiente
Campus Universitário Darcy Ribeiro – Asa Norte – Brasília – DF – Brasil
mp.rafael@gmail.com

Flávio Antonio Castro de Medeiros Lula

flaviolula@gmail.com

Aldo João de Sousa

aldo@unb.br

Antonio C. P. Brasil Junior

brasiljr@unb.br

Resumo: Neste trabalho propõe-se o estudo experimental do escoamento em uma junção T em tubos cilíndricos com razão de diâmetros de 1/5. O escoamento principal é mantido constante e com número de Reynolds igual a 23570. Três diferentes razões de velocidade (R) são estudadas, 1,5; 2,0 e 2,5. Este estudo foi realizado utilizando a técnica de velocimetria por imagem de partículas, comumente conhecida pela sigla PIV. Foram realizadas medições em três pontos ao longo do escoamento principal ($1z/d$, $5z/d$ e $10z/d$) para cada razão de velocidade. Os resultados dos campos de concentração ao longo do escoamento principal são mostrados e comparados com dados experimentais de outros autores.

Palavras-chave: PIV, jato cruzado, escoamento cruzado.

1. INTRODUÇÃO

Quase todas as aplicações industriais para escoamentos fluidos são turbulentas. Considerando aplicações onde é necessário obter uma mistura essa propriedade é muito desejável, porque a difusividade turbulenta é consideravelmente maior que a difusividade molecular. Sendo, portanto a turbulência um processo natural com boa propriedade de mistura. Essa característica é sempre utilizada em aplicações onde é necessária a homogeneização de dois fluidos com diferentes propriedades, a exemplo a mistura de contaminantes ou qualquer outro escalar. Alguns exemplos industriais são injetores de motores a combustão interna, turbinas, bombas, reatores e o transporte de fluidos em sistemas hidráulicos e dispositivos de mistura com reação química.

No presente trabalho, o comportamento da hidrodinâmica de um jato em escoamento cruzado em tubos é estudado. Este é possivelmente o caso mais comum de misturador com dois escoamentos e tem importantes aplicações. A configuração para a geometria estudada é chamada "junção T" onde os tubos com diferentes diâmetros são conectados em um ângulo de 90° graus. A observação deste problema ao longo dos anos tem mostrado a presença de importantes estruturas turbulentas, como é o caso dos vórtices contra-rotativos (Andreopoulos 1997, Kelso 1996 e Margason 1993). Dados experimentais são fontes preciosas para o direcionamento da compreensão de qualquer fenômeno complexo tridimensional e este caso não é exceção.

A técnica de PIV tem algumas características muito apropriadas para o estudo deste tipo de escoamento. A mais importante delas é possivelmente a capacidade de capturar perfis de velocidade instantâneos em todo o domínio estudado de maneira completamente não intrusiva. Isso permite o estudo da dinâmica de estruturas complexas diferente de metodologias de captura pontuais.

Neste estudo os experimentos foram realizados de modo a capturar imagens instantâneas em três seções localizadas a frente da junção dos tubos que formam a geometria “T”. Para todos os casos foram calculadas duas componentes de velocidade média (u, v). Todas as medições foram feitas tendo o escoamento principal com número de Reynolds igual a 23570 e três razões de velocidade – R (U_{∞}/V_{jato}) ($R=1,5$; $2,0$ e $3,0$).

2. METODOLOGIA

Os experimentos foram realizados utilizando a técnica de velocimetria comumente conhecida como PIV (Particle Image Velocimetry). A técnica de Velocimetria de Imagens de Partículas - PIV é um tipo de medição ótica utilizada para a descrição de campos instantâneos de velocidade por meio do rastreamento da mudança de posição de partículas adicionadas aos fluidos estudados.

Consiste basicamente em iluminar uma seção qualquer do escoamento com um plano de luz em dois instantes de tempo consecutivos e captar imagens da reflexão da luz espalhada pelas partículas previamente misturadas ao fluido. Assim, as partículas a serem utilizadas em PIV devem ter algumas características desejáveis:

- 1- Ser suficientemente pequenas e ter baixa inércia em relação ao escoamento para seguirem a trajetória do fluxo estudado sem deslizamentos;
- 2- Ter densidade igual ou muito próxima a do fluido em que serão misturadas;
- 3- As partículas devem ter a superfície reflexiva para refletir da melhor forma possível a luz incidente;

Neste estudo, foram utilizadas partículas de vidro recobertas com prata do tipo CONDUCT-O-FIL fabricadas pela Potters Industries Inc. Tais partículas têm $13\mu\text{m}$ de diâmetro e massa específica igual a 1600kg/m^3 .

Para gerar a luz incidente nas seções de medição, foi utilizado um sistema com duas cavidades laser do tipo Nd:YAG com luz verde (comprimento de onda = 532 nm) e o sistema de captura de imagens utilizado era composto por uma câmera digital modelo SHARPVISION com sensor CCD de 1360×1024 pixels. Um filtro passa banda ($532 \pm 3\text{ nm}$) foi acoplado à lente da câmera digital a fim de que somente o comprimento de onda refletido pelas partículas fosse capturado pelo sensor CCD.

Nesta metodologia é importante que haja um sincronismo entre os pulsos de luz disparados pelas cavidades do laser e a captura das imagens pela câmera CCD. Esse procedimento foi realizado por um sincronizador da marca IDT PIV Inc. modelo *Extreme Timing Hub*. No presente estudo, o tempo entre pulsos de luz laser foi de $50\mu\text{s}$ e a frequência de disparo foi de 10 Hz . Maiores informações sobre a técnica podem ser lidas em (Raffel and Willert 1998), (Lourenco, Couesbet, Raffel, Kompenhans, Vogt, Willert, Carosone, Cenedese, Brücker, 1996-2003) and (Westerweel, 1997).

3. MONTAGEM EXPERIMENTAL

A figura 1 mostra a representação da montagem experimental construída. A montagem consiste em duas bombas d'água, bomba A e bomba B, usadas para gerar o fluxo de água na junção T. O diâmetro interno do tubo no circuito principal é de $25,0\text{ mm}$ e no circuito secundário de $5,0\text{ mm}$. A água utilizada é alimentada pelos tanques A e B, que continham partículas diluídas com a mesma concentração. O controle de vazão dos dois circuitos foi realizado com um inversor de frequência em cada bomba e a medição de vazão foi feita por meio de rotâmetros. Um cuidado especial foi feito com o intuito de estabilizar o escoamento antes da entrada na junção T, tal cuidado consistiu no uso de um trecho reto de tubulação no circuito principal com 50 vezes o diâmetro do tubo principal antes da entrada na seção de testes.

A câmera digital CCD foi posicionada na extremidade do circuito principal da seção de testes. A captura das imagens foi realizada com um sistema de aquisição que transmitia dados via porta firewire para um computador do tipo PC que armazenava as imagens. Todo o controle dos dispositivos (laser, câmera, sincronizador e aquisição) foi realizado com o software comercial da empresa IDT PIV, chamado Provision-XS.

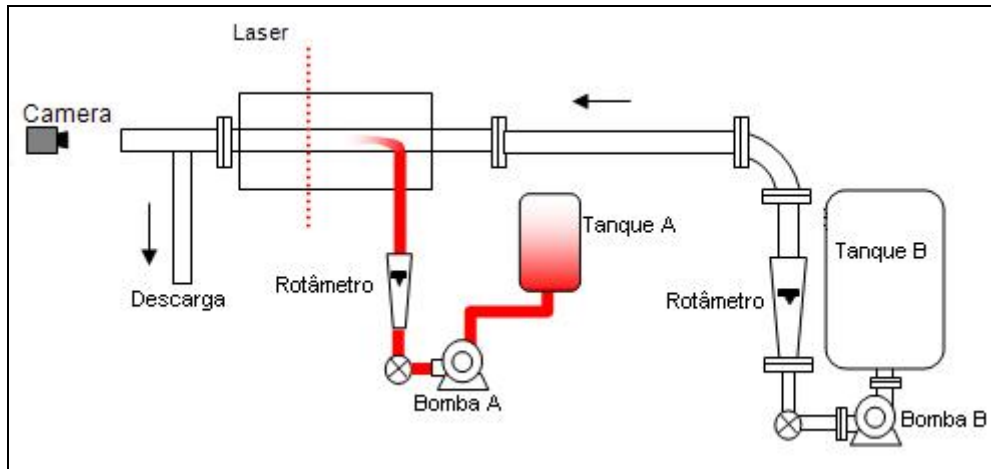


Figura 1: Esquema da montagem experimental.

A seção de testes foi feita com tubos de acrílico transparente e para reduzir os efeitos óticos e a reflexão da luz laser incidente, foi construído ao redor desta seção de testes um aquário que foi cheio com a mesma água utilizada nos tanques A e B. A figura 2 mostra duas possíveis configurações que podiam ser montadas nesta bancada. Para este trabalho foi escolhida a configuração 1, onde o laser corta o escoamento na seção transversal e a câmera CCD é posicionada em frente a parte final do tubo do circuito principal do teste.

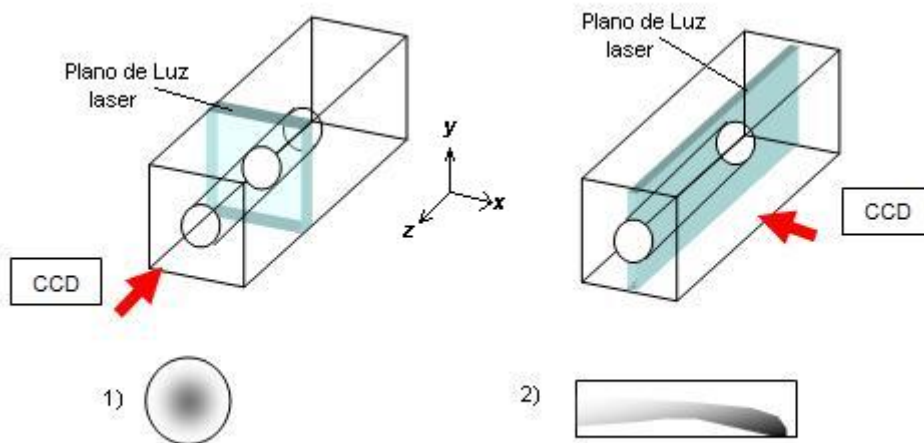


Figura 2: Configurações de montagem da bancada experimental.

Um dos problemas enfrentados na montagem e configuração do sistema de medição PIV foi o ajuste do tempo de captura entre duas imagens. Devido à escolha da configuração 1, mostrada na figura 2a, se fosse utilizado um tempo muito grande entre imagens, as partículas que estivessem na primeira captura não estariam na segunda captura, pois elas já teriam saído do plano do laser, de espessura em 1 mm e se esse tempo fosse muito pequeno as partículas não teriam tempo para moverem-se o suficiente para que o sistema de medição percebesse tal movimento. Assim, a primeira estimativa desse tempo foi calculada baseando-se na espessura do laser e na velocidade do escoamento no tubo principal. Esse tempo calculado foi de 350 μ s, produzindo ótimos resultados na correlação. Todas as medições foram realizadas com esse espaço de tempo.

Os experimentos foram realizados com a captura de 400 imagens para cada posição de medição. Esse número de capturas foi restringido pela quantidade de memória RAM do computador que armazenava os dados experimentais. Esse número de imagens também se mostrou satisfatório para que se pudesse alcançar uma boa média temporal das imagens capturadas.

A tabela 1 abaixo, mostra as configurações utilizadas nas medições:

Tabela 1: Configuração de medição

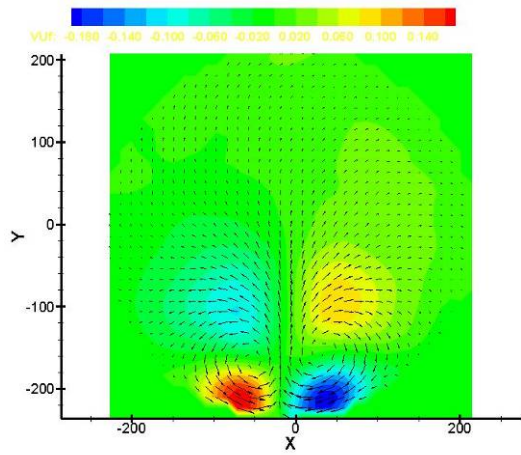
Teste n°	Circuito Principal		Circuito Secundário		R (V_j/U_∞)
	Q [m³/s]	U_∞ [m/s]	Q [m³/s]	V_j [m/s]	
1	5×10^{-4}	0,87	$2,5 \times 10^{-5}$	1,31	1,5
2			$3,50 \times 10^{-5}$	1,75	2,0
3			$4,17 \times 10^{-5}$	2,18	2,5

4. RESULTADOS

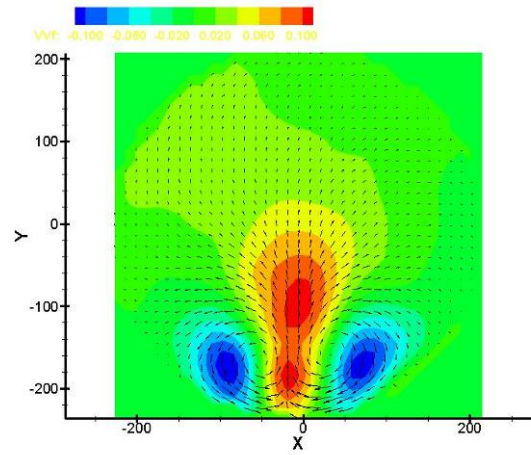
Os resultados foram obtidos para três seções ao longo do circuito principal em três razões de velocidade – R, totalizando nove configurações. Para cada uma destas configurações, foram calculadas duas componentes de velocidade medias ($\bar{u}, \bar{v}$) e a vorticidade (ω). A figura 3 mostra os perfis de velocidade média ($\bar{u}, \bar{v}$) para $z = 1D$. Neste caso já é possível ver a formação de dois vórtices perto da região de injeção. Esses vórtices capturados na posição $z = 1D$ tem intensidades diferentes a medida que a razão de velocidade (R) aumenta, conforme mostrado nas figuras 3a, 3c e 3e. O comportamento destes vórtices próximo à região de injeção tem sido estudado ao longo dos anos e sua apresentação qualitativa é comparável aos estudos de (Gang and Hui, 2001), (Haven, 1997), (Brücker, 1997) and (Lester, 1998).

Os resultados mostrados nas figuras 3b, 3d e 3f, que representam $\bar{v}$ quando $x = 1D$, claramente evidenciam a presença do jato entre dois pequenos vórtices e essa presença é maior quando a razão de velocidade é aumentada. Outra observação pertinente é o aumento dos vórtices contra-rotativos a medida que R é também elevado. É possível verificar o mesmo comportamento quando $x = 5D$, conforme figura 4b, 4d e 4f. A diferença neste caso é que há uma distribuição dos vórtices contra-rotativos ao longo do tubo, o que pode ser verificado nas figuras 4a, 4c e 4e. A figura 5, onde $x = 10D$, traz uma situação um pouco diferente das encontradas nas regiões onde $x = 1D$ e $x = 5D$. Nas figuras 5a, 5c e 5e, podemos observar que não há mais uma distribuição uniforme dos vórtices contra-rotativos e nas figuras 5b, 5d e 5f ainda é possível ver a presença do jato quando plotamos os contornos de $\bar{v}$, porém este sendo consideravelmente mais fraco que nas anteriores.

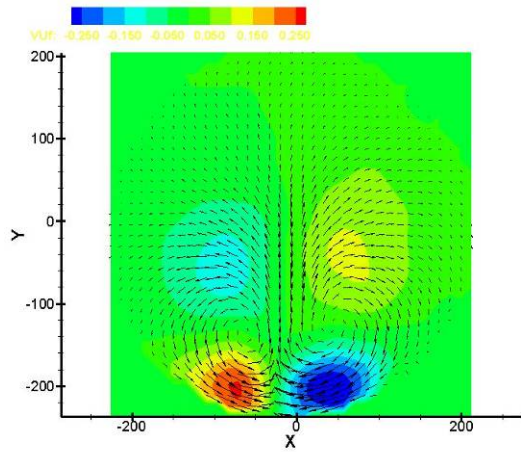
No conjunto de imagens da figura 6 estão plotados os perfis de vorticidade para $z = 1D$ e $5D$ e na figura 7 temos os perfis de vorticidade para $z = 10D$. Comparando os perfis das três posições é possível perceber claramente nas figuras 6a, 6b e 6c, onde $z = 1D$, que os vórtices são menores que nas figuras 6d, 6e e 6f, porém mostram uma distribuição uniforme dos vórtices contra-rotativos e que se dissipam ao longo do escoamento, situação evidenciada pelos perfis de vorticidade mostrados nas figuras 7a, 7b e 7c.



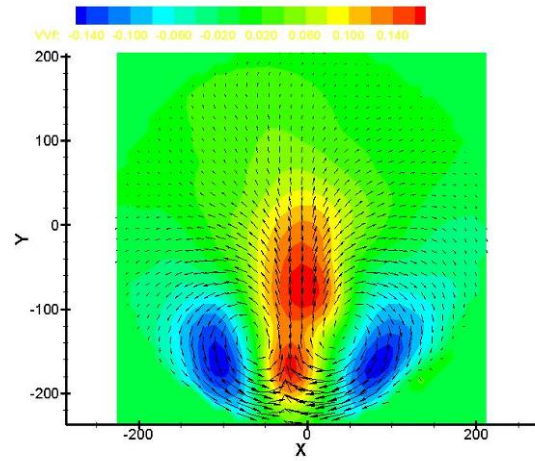
a) $Z = 1D$; $R=1.5$; U



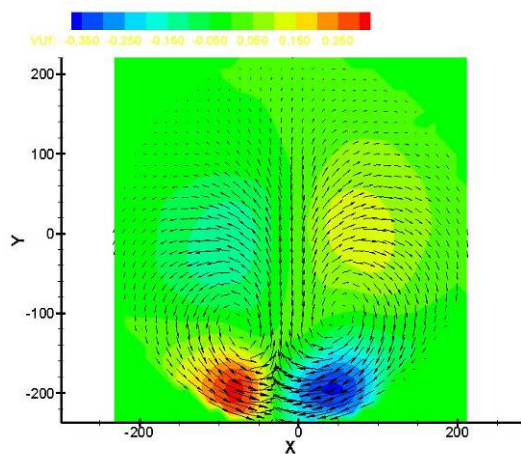
b) $Z = 1D$; $R=1.5$; V



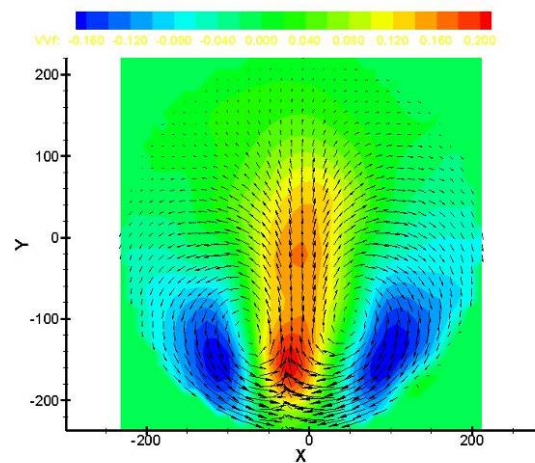
c) $Z = 1D$; $R=2.0$; U



d) $Z = 1D$; $R=2.0$; V

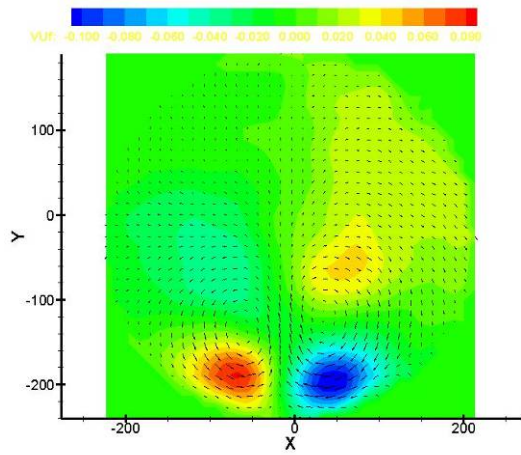


e) $Z = 1D$; $R=2.5$; U

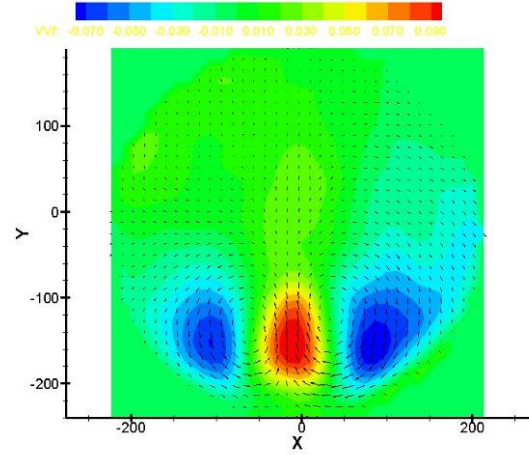


f) $Z = 1D$; $R=2.5$; V

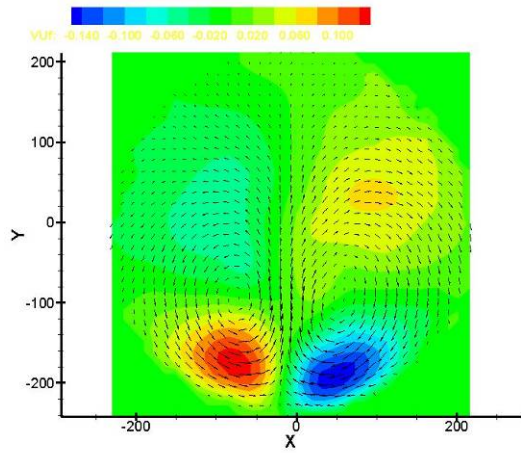
Figura 3. Dados experimentais: Perfis de velocidade para $Z=1D$.



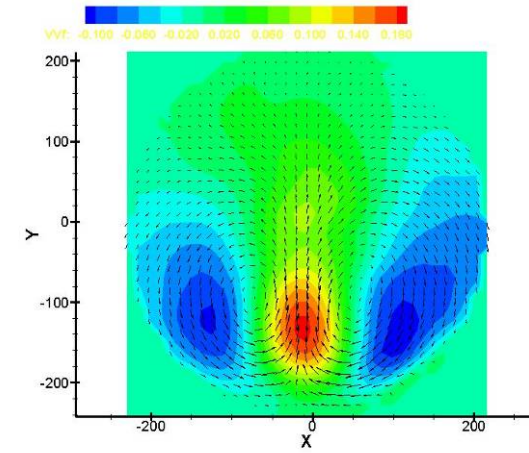
a) $Z = 5D$; $R=1.5$; U



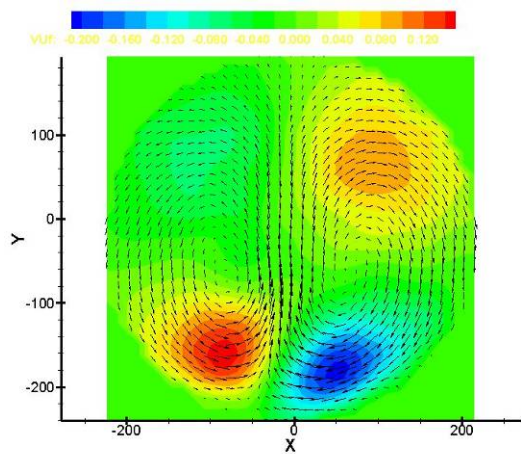
b) $Z = 5D$; $R=1.5$; V



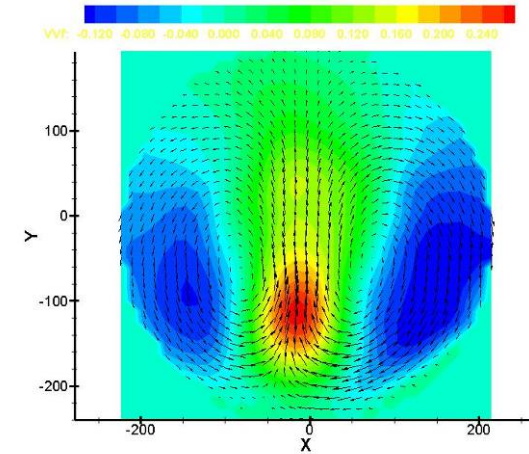
c) $Z = 5D$; $R=2.0$; U



d) $Z = 5D$; $R=2.0$; V

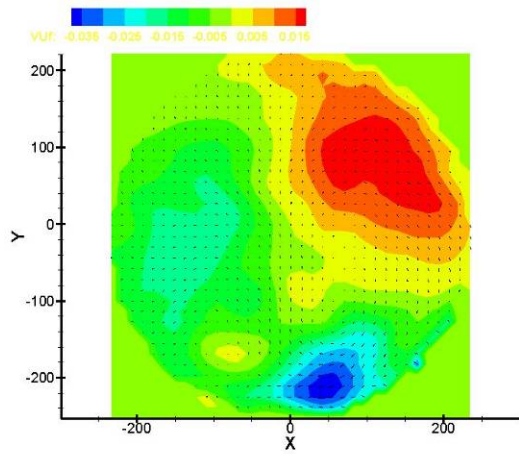


e) $Z = 5D$; $R=2.5$; U

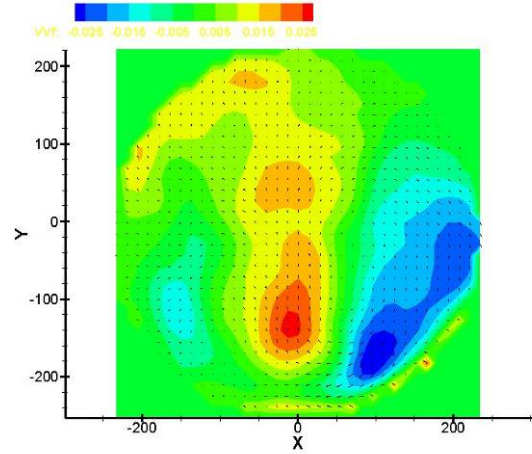


f) $Z = 5D$; $R=2.5$; V

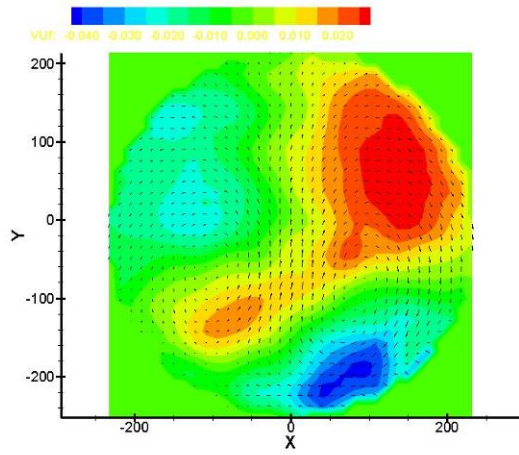
Figura 4. Dados experimentais: Perfis de velocidade para $Z=5D$



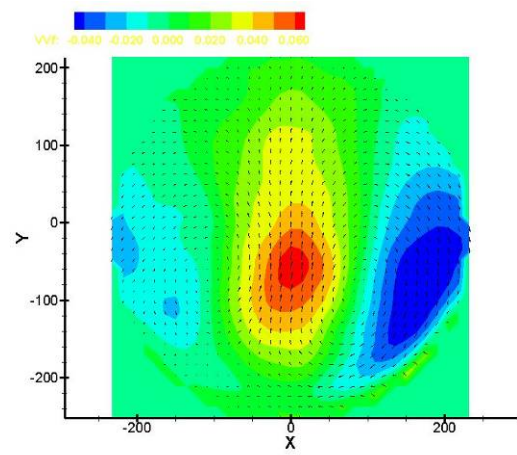
a) $Z = 10D$; $R=1.5$; U



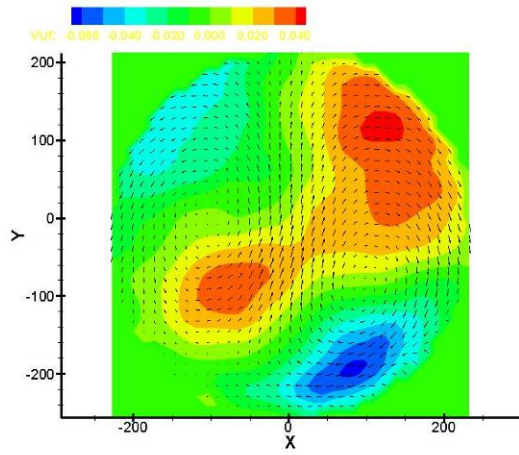
b) $Z = 10D$; $R=1.5$; V



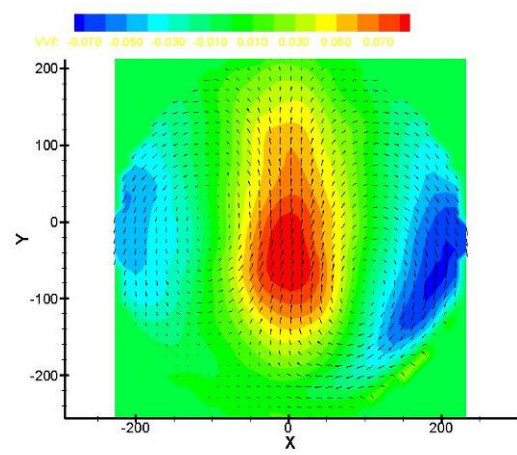
c) $Z = 10D$; $R=2.0$; U



d) $Z = 10D$; $R=2.0$; V

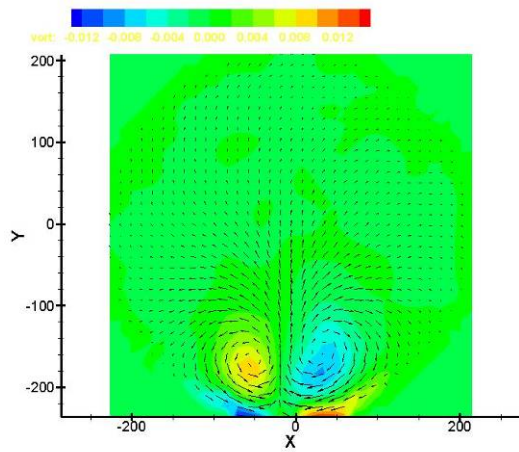


e) $Z = 10D$; $R=2.5$; U

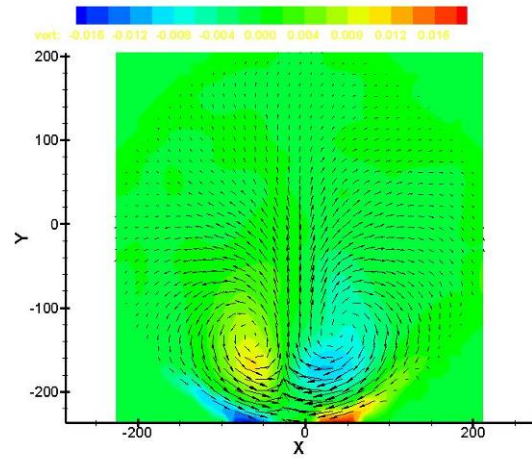


f) $Z = 5D$; $R=2.5$; V

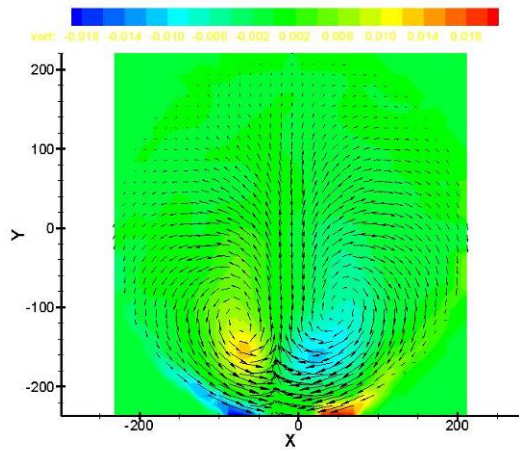
Figura 5. Dados experimentais: Perfis de velocidade para $Z=10D$.



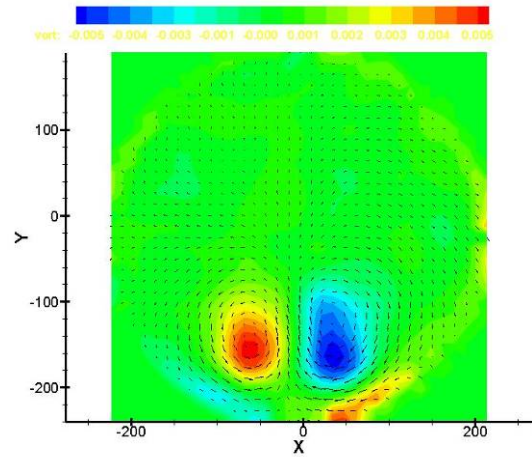
a) $Z = 1D$; $R=1.5$; vorticidade



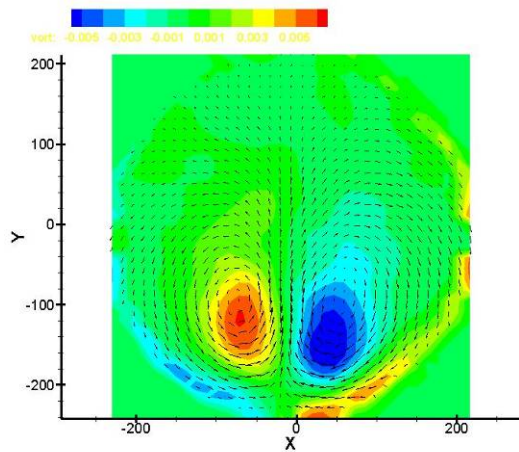
b) $Z = 1D$; $R=2.0$; vorticidade



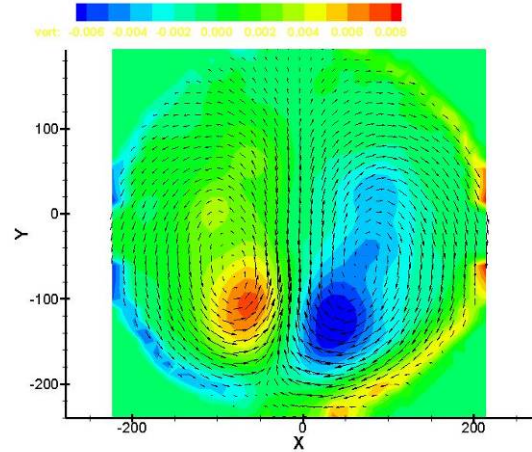
a) $Z = 1D$; $R=2.5$; vorticidade



b) $Z = 5D$; $R=1.5$; vorticidade



a) $Z = 5D$; $R=2.0$; vorticidade



b) $Z = 5D$; $R=2.5$; vorticidade

Figura 6. Dados experimentais: Perfis de vorticidade para $Z=1D$ e $5D$.

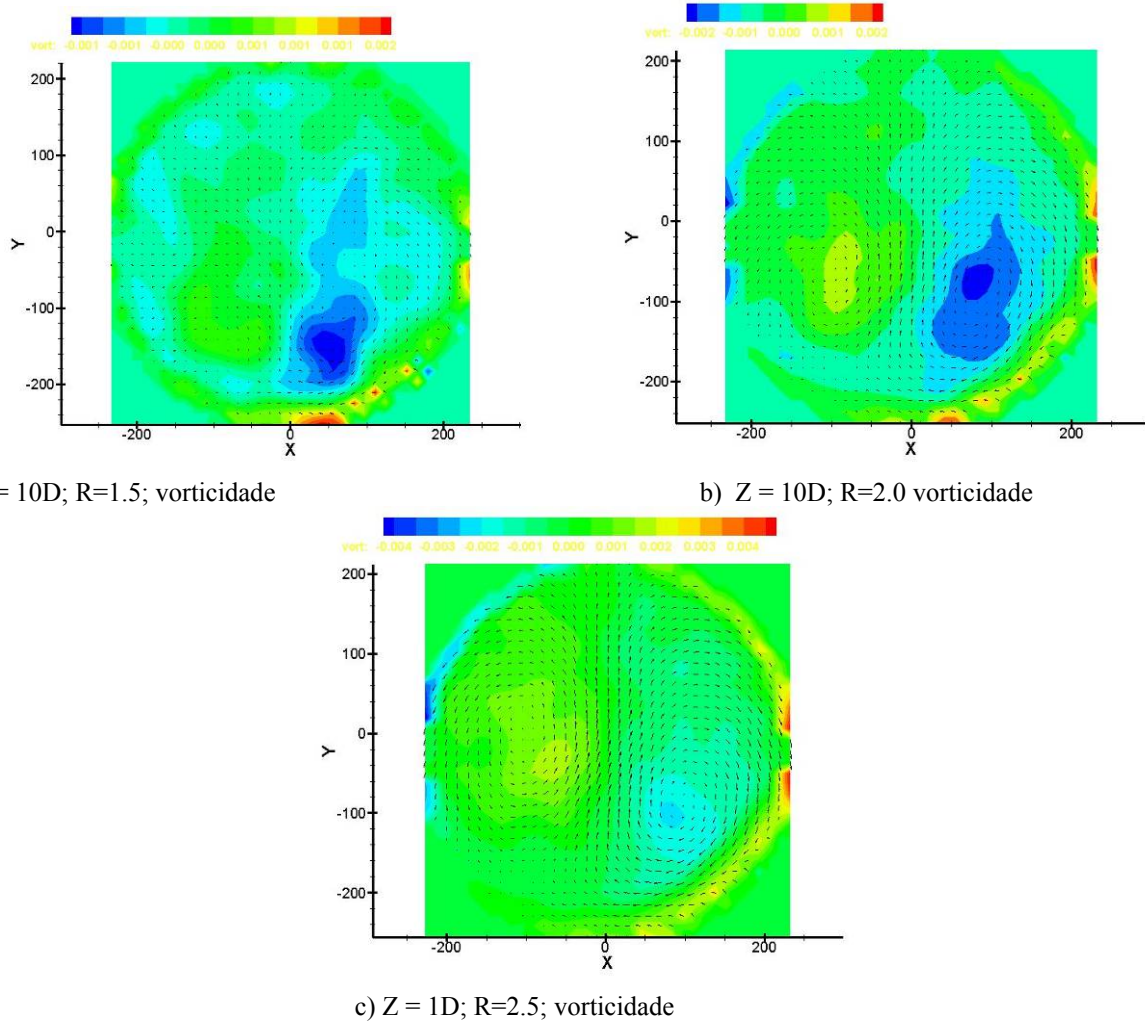


Figura 7. Dados experimentais: Perfis de vorticidade para $Z=10D$.

5. CONCLUSÃO

Os resultados qualitativos conseguidos neste trabalho estão muito próximos daqueles que eram esperados pela equipe. Comparando os perfis de velocidade com aqueles mostrados na bibliografia estudada é possível verificar que as mesmas estruturas turbulentas formadas pela injeção na junção “T”, especialmente os vórtices contra-rotativos que são as estruturas classicamente encontradas neste tipo de montagem, foram também localizadas. Outra observação pertinente foi o do comportamento do jato no escoamento com o aumento da razão de velocidades, implicando em mudança na posição do jato e em sua intensidade ao longo do eixo Z .

Assim, a técnica de PIV mostrou ser uma ferramenta poderosa e adequada para a investigação deste tipo de problema, especialmente para o estudo dos fenômenos de grandes escalas de turbulência.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a ajuda financeira dada pela Eletronorte e pelo CNPq.

7. REFERÊNCIAS

- Andreopoulos, J., 1985, “on the Structures of Jets in a Crossflow”, J. Fluid Mech. 157, 163-197.
 Kelso R. M., Lim T. T. and Peryy A. E., 1996, “An Experimental Study of Round Jets in a Cross-flow”, J. Fluid Mech. 306, 111-144.

- Margason R. J., 1993, "Fifty years of Jet in a Cross Flow Research", AGARD Meeting on Computational and Experimental Assessment of Jets in a Cross Flow, April 1993.
- Raffel M., Willert C., and Kompenhans J., 1998, "Particle Image Velocimetry", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- Lourenco L.M., Couesbet G., Raffel M., Kompenhans J., Vogt A., Willert C., Carosone F., Cenedese A., Brücker, Royer H., 1996-2003, "Particle Image Velocimetry: Lecture Series" von Karman Institute of Fluid Dynamics, Chaussée de Waterloo, 72 B – 1640 Rhode Saint Genèse - Belgium
- Westerweel J., 1997, "Fundamentals of digital particle image velocimetry", Meas. Sci Technol., No., pp. 1379-1392.
- Gang Pan and Hui Meng, 2001, "Experimental Study of Turbulent Mixing in a Tee Mixer Using PIV and PLIF", AIChE Journal.
- Haven B. A. and Kurosaka M., 1997, "Kidney and anti-kidney vortices in crossflow jets", J. Fluid Mech., vol. 352, pp. 27-64.
- Brücker C., 1997, "Study of the Three-Dimensional Flow in a T-Junction Using a Dual-Scanning Method for Three Dimensional Scanning – Particle – Image Velocimetry (3-D SPIV)", Experimental thermal and Fluid Science.
- Lester L., Yuan and Robert L. Street, 1998, "Trajectory and entrainment of a round jet in crossflow", Physics of Fluids, vol 10, No. 9, September 1998.
- Monclova Luis A. and Forney Larry J., 1994, "Numerical Simulation of a Pipeline Tee Mixer", School of Chemical Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia 30332.