



Ministério da Educação – Brasil  
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM  
Minas Gerais – Brasil  
Revista Vozes dos Vales: Publicações Acadêmicas  
Reg.: 120.2.095 – 2011 – UFVJM  
ISSN: 2238-6424  
QUALIS/CAPES – LATINDEX  
Nº. 07 – Ano IV – 05/2015  
<http://www.ufvjm.edu.br/vozes>

## **Medida dos perfis de velocidade axiais em um hidrociclone para a separação óleo-água: comparação entre dados simulados e experimentais.**

Cristiano Agenor Oliveira de Araújo<sup>1</sup>  
Doutorado em Engenharia Química na Universidade Federal do Rio de Janeiro/Escola de Química/Departamento de Engenharia Química - UFRJ  
Rio de Janeiro - RJ - Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/8015054807690894>  
E-mail: [cristianoagenor@gmail.com](mailto:cristianoagenor@gmail.com)

Prof. D.Sc. Cláudia Míriam Scheid<sup>2</sup>  
<http://lattes.cnpq.br/7777291180260276>  
Prof. D.Sc. Juliana Braga Rodrigues Loureiro<sup>3</sup>  
<http://lattes.cnpq.br/8722351132929013>  
Prof. D.Sc. Tânia Suaiden Klein<sup>1</sup>  
<http://lattes.cnpq.br/1008981061334220>  
Prof. Ph.D. Ricardo de Andrade Medronho<sup>1</sup>  
<http://lattes.cnpq.br/2883241764449950>

**Resumo:** Os hidrociclones são equipamentos compactos, de baixo custo operacional e que empregam o campo centrífugo para promover a separação de fases. A evolução em sua geometria para a separação óleo-água culminou em entradas duplas e duas seções cônicas visando aumentar a eficiência de separação.

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro/ Escola de Química/Departamento de Engenharia Química, Av. Horácio Macedo 2030, Edifício do Centro de Tecnologia, Bloco E / sala 200, Cidade Universitária.

<sup>2</sup> Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro/ Instituto de Tecnologia /Departamento de Engenharia Química, BR-465, Km 7, CEP: 23890-000, Seropédica – RJ, Brasil.

<sup>3</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro/Núcleo Interdisciplinar de Mecânica dos Fluidos – NIDF CT2, Cidade Universitária.

Neste trabalho, a Fluidodinâmica Computacional (CFD) e a velocimetria por imagens de partículas (PIV) foram empregadas para medir os perfis de velocidade de um hidrociclone para separação de dispersões óleo-água. A geometria ótima deste hidrociclone foi obtida por meio de um planejamento fatorial ( $2^{7-3}$ ) que envolveu sete variáveis geométricas. O hidrociclone otimizado por esse planejamento foi construído em acrílico. Os perfis de velocidade axial foram medidos apenas com água por meio do PIV e comparados com os resultados das simulações numéricas.

**Palavras-chave:** Hidrociclones. Separação óleo-água. Fluidodinâmica Computacional. Velocimetria por Imagem de Partículas.

## INTRODUÇÃO

Os hidrociclones são equipamentos compactos originalmente construídos para a separação sólido-líquido. Sua primeira patente foi depositada no final do século XIX (Bretney, 1891) e sua utilização foi intensificada em meados da década de 1940 na indústria de mineração. Trinta anos mais tarde esses equipamentos foram empregados na separação de águas oleosas (Young *et al.* 1994).

Os trabalhos disponíveis na literatura empregando hidrociclones para a separação óleo-água tratam apenas de correntes com baixas composições da fase óleo. Suas aplicações se restringem basicamente ao tratamento de águas com quantidade residual de óleo, e que geralmente não ultrapassam o valor de 1% (p/p ou v/v). Bai *et al.* (2011) estudaram a separação de óleo-água por meio de hidrociclones com concentração de óleo em torno de 0,1% utilizando injeção de bolhas de ar para melhorar a eficiência de separação. Zhou *et al.* (2010) investigaram a distribuição de tamanho de gotas de óleo e o campo de velocidade no interior de um hidrociclone para a separação óleo-água. A concentração de óleo utilizada em seu estudo foi de 0,04%. Almeida *et al.* (2009) simularam numericamente a separação óleo-água no hidrociclone projetado para baixas frações de óleo proposto por Nezhati & Thew (1987). A concentração de óleo foi de 0,1 % (v/v) e os campos de velocidade axial e tangencial foram determinados em várias alturas ao longo do comprimento do equipamento. Os resultados simulados para eficiência do hidrociclone ficaram próximo aos resultados experimentais. Schütz

*et al.* (2009) apresentaram uma modelagem para o comportamento do fluido e das interações das gotas na separação líquido-líquido em hidrociclones. Os efeitos da quebra e coalescência que afetam a eficiência do equipamento foram levados em consideração. A utilização do planejamento de experimentos aplicado ao estudo de variáveis geométricas ou operacionais para separações usando hidrociclones tem sido bastante difundida (Obeng *et al.* 2005 e Alves 2012).

## MATERIAIS E MÉTODOS

### 1. Simulações em CFD

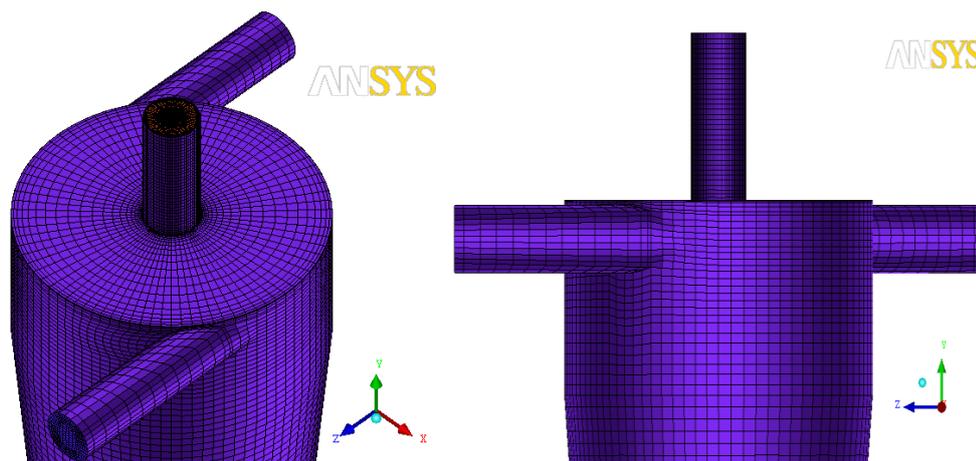
A Tabela 1 mostra as variáveis geométricas do hidrociclone e suas respectivas faixas de estudo.

**Tabela 1:** Faixa de valores para as variáveis geométricas empregadas no planejamento fatorial.

Variáveis	Do (mm)	Du (mm)	Di (mm)	VF (mm)	L <sub>1</sub> (mm)	Θ <sub>1</sub> (grau)	Θ <sub>2</sub> (grau)
Faixa	5 - 20	10 - 25	7,5 – 17,5	4 – 40	25 - 45	10 <sup>0</sup> - 30 <sup>0</sup>	4 <sup>0</sup> - 30 <sup>0</sup>

Do = diâmetro do tubo de *overflow*; Du = diâmetro do *underflow*; Di = diâmetro da entrada (alimentação); VF = comprimento do *vortex finder*; L<sub>1</sub> = comprimento da seção cilíndrica; Θ<sub>1</sub> = ângulo da primeira seção cônica do hidrociclone; Θ<sub>2</sub> = ângulo da segunda seção cônica do hidrociclone.

Foi realizado um planejamento fatorial do tipo  $2^{7-3}$ , 16 experimentos foram sugeridos e mais 1 no ponto central. Como todo o planejamento foi executado por simulações computacionais, não foi necessário realizar repetições do ponto central. Todas as simulações foram realizadas utilizando o *software* ANSYS (12.0). A geometria foi criada no *Design Modeler* (ANSYS) e as malhas hexaédricas foram construídas no ANSYS ICEM. Um teste de malha indicou que uma malha de 600.000 elementos era suficiente para não interferir nos resultados da simulação. Um exemplo da malha hexaédrica construída pode ser vista na Figura 1.



**Figura 1:** Exemplo de malha hexaédrica gerada no Icem (ANSYS) para os hidrociclones do planejamento.

Para todas as simulações a concentração de óleo na entrada foi mantida em 40% (v/v). As condições de contorno para as simulações foram: velocidade na alimentação de 4 m/s, e pressão de saída no *overflow* e no *underflow* igual a 1 bar. O modelo de turbulência adotado foi o *Reynolds Stress Model* (RSM). O esquema para o acoplamento entre a pressão-velocidade usado foi o *Phase Coupled SIMPLE*. Os resíduos utilizados como o critério de convergência foram de  $10^{-5}$ . O número de iterações utilizadas foi suficiente para atingir doze segundos de simulação em regime transiente.

Os computadores que executaram as simulações possuíam processadores quad-core Intel® Core i7, com 2.8 GHz e memória RAM de 4,00 GB. As propriedades físicas para a água e o óleo podem ser vistas na Tabela 2.

**Tabela 2:** Propriedades físicas da água e do óleo.

Material	Densidade ( $\text{kg m}^{-3}$ )	Viscosidade ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ )
Água	996,5	$0,855 \cdot 10^{-3}$
Óleo	840	$13,2 \cdot 10^{-3}$

As variáveis respostas analisadas pelo planejamento fatorial foram: eficiência granulométrica Reduzida ( $G'$ ) e razão de fluido ( $R_F$ ). A razão de fluido é definida por:

$$R_F = \frac{W_{ac}}{W_a} \quad (1)$$

onde,  $W_{ac}$  é a vazão mássica de água no concentrado (overflow) e  $W_a$  é a vazão mássica de água na corrente de alimentação. A razão de fluido é igual ao quociente entre a vazão mássica de água que sai pelo tubo de overflow, e a vazão mássica da água na corrente de alimentação.

Há também a razão de fluido total  $R_{FT}$  que é baseada nas vazões totais de líquidos nas correntes de entrada e saída do equipamento, definida por:

$$R_{FT} = \frac{(Q_A + Q_O)_{overflow}}{(Q_A + Q_O)_{entrada}} \quad (2)$$

onde  $Q_A$  é a vazão volumétrica de água e  $Q_O$  é a vazão volumétrica de óleo.

A eficiência granulométrica reduzida  $G'$  pode ser obtida a partir da seguinte expressão:

$$G' = \frac{G - R_F}{1 - R_F} \quad (3)$$

onde,  $G$  é a eficiência granulométrica:

$$G = \frac{W_{dc}}{W_d} \quad (4)$$

onde,  $W_{dc}$  é a vazão mássica de partículas de tamanho  $d$  no concentrado e  $W_d$  é a vazão mássica de partículas de tamanho  $d$  na alimentação. A mesma definição apresentada para a eficiência total  $G$  e  $G'$  é aplicada a eficiência total (ET) e eficiência total reduzida (ET'), respectivamente. A diferença é que as eficiências granulométricas correspondem a um único tamanho de partícula, enquanto que as eficiências totais dizem respeito a uma distribuição de tamanho de gotas ou partículas.

As equações de conservação de massa e momento para simulações multifásicas são:

- Equação da continuidade

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \underline{u}_q) = 0 \quad (5)$$

- Equação do movimento

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \underline{u}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \underline{u}_q \underline{u}_q) = & -\alpha_q \nabla P + \nabla \cdot \overline{\overline{\tau}}_q + \alpha_q \rho_q \underline{g} + \sum_{p=1}^n K_{pq} (\underline{u}_p - \underline{u}_q) \\ & + \alpha_q \rho_q (\underline{F}_q + \underline{F}_{lift,q} \underline{F}_{vm,q}) \end{aligned} \quad (6)$$

onde  $\alpha_q$  é a fração volumétrica da fase q, e as variáveis  $\rho_q$  e  $\underline{u}_q$  representam a densidade e a velocidade da fase q, respectivamente.

Os termos da equação dos tensores de Reynolds que efetivamente foram calculados em cada simulação foram:

$$\begin{aligned} \underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho u'_i u'_j})}_{Derivada\_Local} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho U_k \overline{u'_i u'_j})}_{(C_{ij})} = & - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k}[\overline{\rho u'_i u'_j u'_k} + p(\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j)]}_{(D_{ij}^T)} \\ & - \underbrace{\rho \left( \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \right)}_{(P_{ij})} + \underbrace{p \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right)}_{(\phi_{ij})} - \underbrace{2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}}_{(\varepsilon_{ij})} \\ & - \underbrace{2\rho \Omega_k (\overline{u'_j u'_m} \varepsilon_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} \varepsilon_{jkm})}_{(F_{ij})} \end{aligned} \quad (7)$$

Os termos  $C_{ij}$ ,  $D_{L,ij}$ ,  $P_{ij}$  e  $F_{ij}$ , representam, respectivamente, a adição de momento devido a: convecção, difusão viscosa, termo de produção (tensor de Reynolds) e produção por rotação, e não necessitam de modelagem. O mesmo não acontece para os termos de difusão turbulenta ( $D_{T,ij}$ ), produção por empuxo ( $G_{ij}$ ), redistribuição (*pressure strain*) ( $\phi_{ij}$ ) e tensores de dissipação viscosa ( $\varepsilon_{ij}$ ), que precisam ser modelados para fechar a equação. O termo de Difusão Turbulenta ( $D_{ij}^T$

) é modelado com base no trabalho de Lien & Leschziner (1994), com  $\sigma_k = 0,82$ . A viscosidade turbulenta,  $\mu_t$ , é computada similarmente ao modelo  $k-\epsilon$ . O termo de redistribuição pode ser modelado a partir de várias propostas. Uma delas é a redistribuição linear de acordo com os trabalhos de Gibson e Launder (1978), Fu *et al.* (1987) e Launder (1989a e 1989b). O termo de reflexão de parede,  $\phi_{ij,w}$ , é responsável pela redistribuição dos tensores normais próximos a parede. Ele tende a amortecer os tensores normais perpendiculares à parede, enquanto melhora os tensores paralelos a mesma. A taxa de dissipação viscosa da energia cinética turbulenta,  $\epsilon$ , é computada de acordo com uma equação de transporte similar à usada no modelo  $k-\epsilon$  padrão.

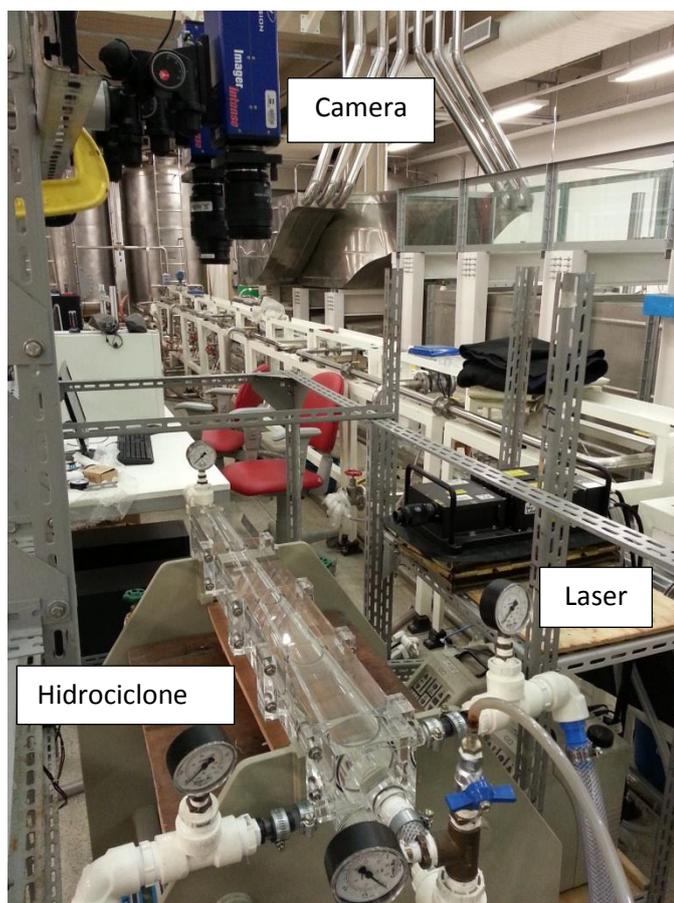
## 2. Hidrociclone

O hidrociclone obtido com base no planejamento experimental foi construído em acrílico (Figura 6) para permitir que os perfis de velocidade pudessem ser medidos em seu interior. As pressões nas entradas, no *overflow* e no *underflow* foram medidas por manômetros de Bourdon. Válvulas foram utilizadas para controlar as vazões com o objetivo de regular a razão de fluido. Uma bomba centrífuga CAM-W10 de (2 cv) da marca DANCOR foi utilizada para alimentar o hidrociclone. Para a circulação apenas de água, como no caso do PIV, três medidores de vazão digitais PRO 1000 (Incontrol) foram utilizados nas duas entradas e no *underflow*. A vazão de líquido no *overflow* foi obtida por diferença e o sistema operava de maneira fechada, havendo retorno de fluido para o tanque e posteriormente bombeado novamente.

## 3. O sistema PIV

O sistema PIV é composto por partículas traçadoras, câmeras e lentes, sistema de iluminação a laser e computadores para o processamento das imagens. As partículas traçadoras utilizadas nesse trabalho foram de Poli(metil metacrilato), com densidade igual a  $1190 \text{ kg/m}^3$ , revestidas com Rodamina B que resulta em um índice de refração igual 1,48. A câmera CCD de 12 Bit utilizada tem resolução de  $1376 \times 1040$  pixel e tamanho de pixel  $6,45 \mu\text{m} \times 6,45 \mu\text{m}$ , com lentes AF Micro-Nikkor

105 mm f/2.8D. O Laser empregado foi do tipo Nd:YAG do fabricante BigSky com comprimento de onda  $\lambda = 532\text{nm}$  e energia por pulso de 120 mJ. O Software Davis 7.1 foi empregado para processamento das imagens. A Figura 2 mostra o aparato experimental formado pelo sistema PIV e hidrociclone para as medidas experimentais dos perfis de velocidade.



**Figura 2:** Aparato experimental equipado com o sistema PIV destacando a câmera, o *laser* e o hidrociclone.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 1. Simulação

A Tabela 3 mostra os valores das variáveis geométricas para as dezessete simulações. Os valores de eficiência granulométrica reduzida ( $G'$ ) e de razão de fluido ( $R_F$ ) obtidos por meio de simulações em regime permanente também são

mostrados. Para todas as simulações do planejamento, o diâmetro das gotas de óleo foi fixado em 250  $\mu\text{m}$ .

**Tabela 3:** Dimensões geométricas e valores de  $G'$  e  $R_f$  para o planejamento fatorial reduzido  $2^{7-3}$ , obtido por meio de simulações numéricas com partículas de 250  $\mu\text{m}$  de diâmetro, em regime permanente.

Simulação	Do (mm)	Du (mm)	VF (mm)	L1 (mm)	$\Theta_1$ (rad)	$\Theta_2$ (rad)	Di (mm)	$G'$ (%)	$R_f$ (%)
1	5	10	4	25	0,0872	0,0349	7,5	33,95	0,40
2	20	10	4	25	0,2618	0,0349	17,5	99,97	62,20
3	5	25	4	25	0,2618	0,2618	7,5	0,00	0,00
4	20	25	4	25	0,0872	0,2618	17,5	49,50	1,80
5	5	10	40	25	0,2618	0,2618	17,5	9,42	8,50
6	20	10	40	25	0,0872	0,2618	7,5	57,92	94,40
7	5	25	40	25	0,0872	0,0349	17,5	0,00	0,00
8	20	25	40	25	0,2618	0,0349	7,5	94,87	1,00
9	5	10	4	45	0,0872	0,2618	17,5	41,36	0,00
10	20	10	4	45	0,2618	0,2618	7,5	(-)	100,00
11	5	25	4	45	0,2618	0,0349	17,5	0,00	0,00
12	20	25	4	45	0,0872	0,0349	7,5	99,70	3,40
13	5	10	40	45	0,2618	0,0349	7,5	16,50	4,60
14	20	10	40	45	0,0872	0,0349	17,5	99,92	58,20
15	5	25	40	45	0,0872	0,2618	7,5	1,67	0,40
16	20	25	40	45	0,2618	0,2618	17,5	32,33	10,32
17 (PC)	12,5	17,5	22	35	0,1745	0,1483	12,5	28,93	0,19

Para cada uma das dezessete simulações do planejamento fatorial realizado na etapa inicial deste estudo, os resultados para  $G'$  e  $R_f$  foram calculados. Depois de realizadas as simulações das dezessete geometrias sugeridas pelo planejamento, cinco hidrociclones (HC 2, HC 8, HC 10, HC 12 e HC 14) produziram resultados para eficiência granulométrica reduzida elevados.

Entretanto, não é interessante que os resultados elevados de  $G'$  estejam acompanhados de valores altos para a razão de fluido, como foi o caso dos hidrociclones HC 2, HC 10 e HC 14. Razão de fluido elevada significa que, apesar das altas eficiências, uma grande quantidade de água está deixando o hidrociclone através do overflow. Os hidrociclones HC 8 e HC 12 foram os hidrociclones que atingiram alto grau de eficiência e valores baixos para razão de fluido. Desses dois

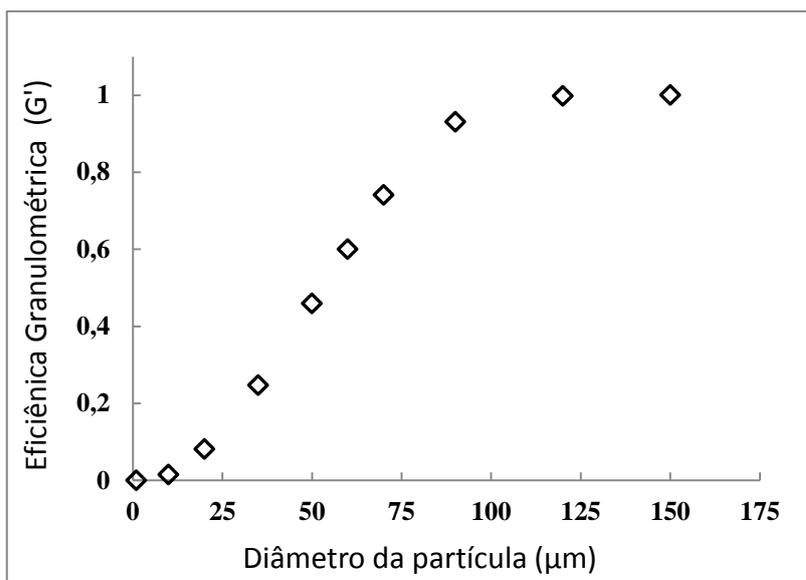
hidrociclones, o hidrociclone HC 12 foi alvo de investigação nesse trabalho. O hidrociclone 8 será alvo de trabalhos posteriores.

As simulações para o HC 12 foram realizadas em regime permanente e transiente. Os valores das razões de fluido e eficiências granulométricas são muito próximos para os dois regimes, como mostra a Tabela 4. Como será visto a seguir, os perfis de velocidade obtidos nos dois regimes também são muito próximos, indicando que o regime permanente é o mais apropriado devido a baixos custos computacionais.

**Tabela 4:** Resultados da simulação do hidrociclone 12 com tamanho de gotas de óleo de 250  $\mu\text{m}$  em regime permanente e transiente.

Regime	Iterações	Tempo	R <sub>f</sub> total	R <sub>f</sub> (%)	G	G'
Permanente	30.000	(-)	41,96	3,51	99,66	99,64
Transiente	(-)	6 s	41,23	2,25	99,77	99,77

Várias simulações em regime permanente foram realizadas com diferentes diâmetros de gotas para o cálculo da eficiência granulométrica reduzida em função do diâmetro da gota (Figura 3).

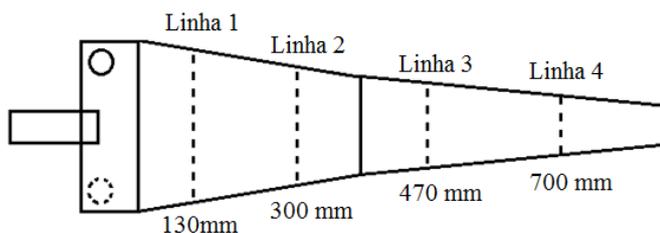


**Figura 3:** Eficiência granulométrica reduzida versus diâmetro de partículas para o HC 12 obtida por simulação em regime permanente.

O gráfico mostrou que o diâmetro da partícula separada com eficiência granulométrica reduzida de 50%, para o equipamento HC 12 por meio da simulação, foi de 53 µm. Foi observado que partículas com diâmetro igual ou acima de 125 µm foram coletadas com 100% de eficiência.

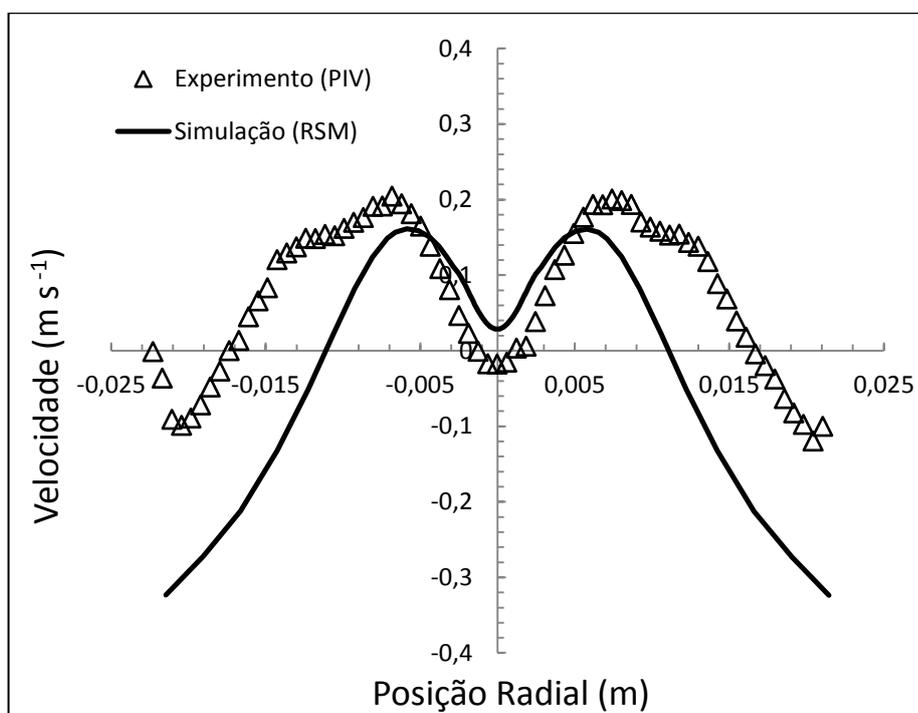
## 2. Medidas experimentais de velocidade usando o PIV

Os perfis de velocidade axial foram medidos em diferentes comprimentos ao longo do corpo do hidrociclone 12. Quatro linhas formadas em diferentes alturas a partir da parte superior da seção cilíndrica tiveram seu campo de velocidade investigado. A Figura 4 mostra as diferentes seções do equipamento onde foram medidos os perfis de velocidade. As velocidades axiais foram medidas em todas as seções (linha 1, 2, 3 e 4).

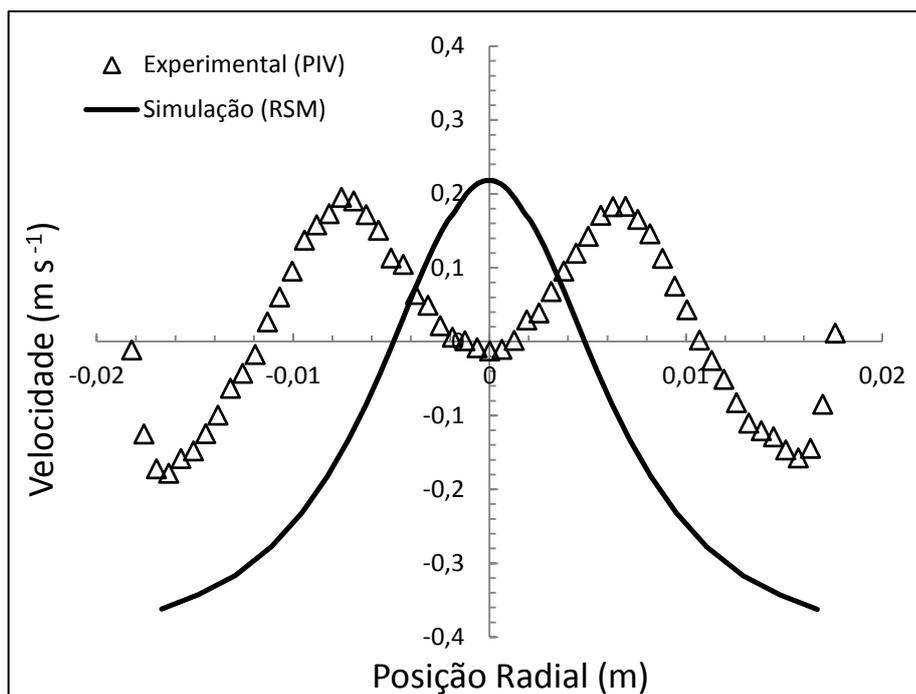


**Figura 4:** Posições onde foram realizadas medidas experimentais das velocidades tangenciais e axiais (linhas 1, 2, 3 e 4).

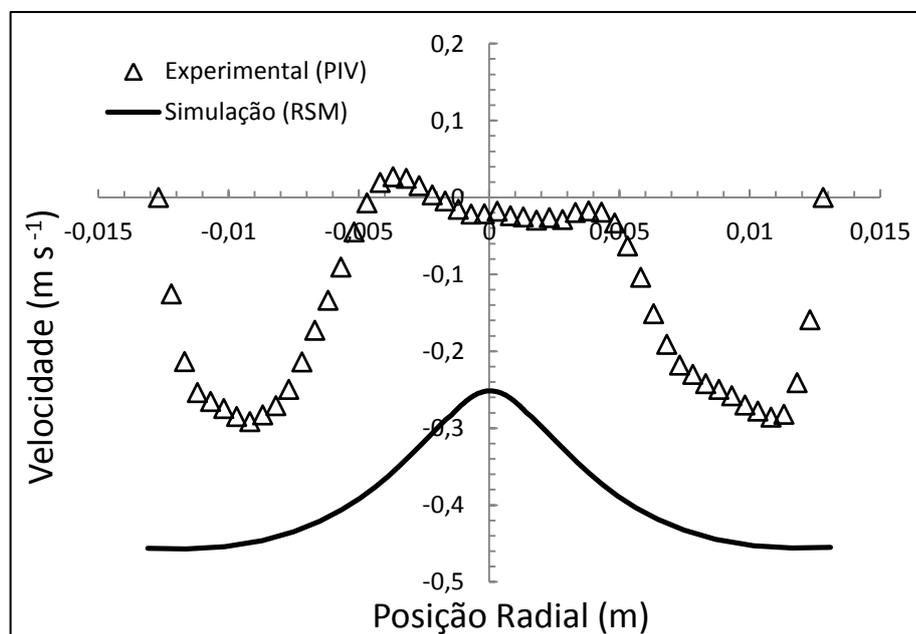
Os perfis de velocidades axiais nas linhas 2, 3 e 4 podem ser vistos na Figura 5.



(a)



(b)



(c)

**Figura 5:** Perfis de velocidade axial experimental e simulado obtidos na (a) linha 2 – 300 mm; (b) linha 3 – 470 mm e (c) linha 4 – 700 mm.

Os perfis simulados nas linhas 2 e 4 concordam qualitativamente com os perfis experimentais. Entretanto, para a linha três, pode-se observar uma discrepância na região em torno do eixo central do hidrociclone. O perfil simulado mostra apenas um pico positivo, o que significa líquido se movendo na direção do *overflow*, enquanto que o perfil experimental apresenta dois picos positivos representando também um movimento descendente, no eixo central, na direção do *underflow*.

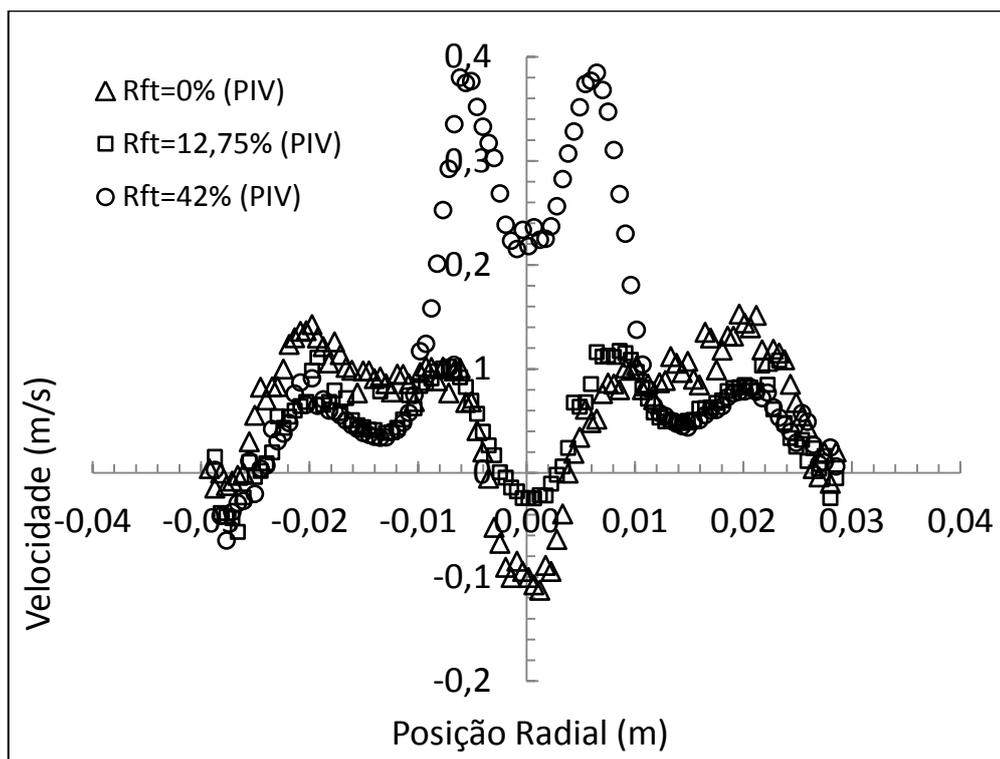
A descrição do campo de velocidade na região central do hidrociclone, tanto por simulação, quanto pelo PIV, revelou um comportamento atípico. Não é comum obter-se valores quase nulos de velocidade axial sobre o eixo central como foi o caso dos resultados apresentados na linha 2. Em geral, a velocidade axial é máxima na linha de centro do equipamento assim como visto no resultado simulado das linhas 2 e 3, e também nos trabalhos de Marins *et al.* (2009), Bhaskar *et al.* (2007), Swain & Mohanty (2012) e Saidi *et al.* (2012). Esses picos de velocidades sobre a linha central do equipamento normalmente são bastante pronunciados e com valores positivos em regiões próximas ao *overflow*, diminuindo sua intensidade a partir do momento que se migra em direção ao orifício de *underflow*. Porém, comportamento semelhante ao encontrado nos perfis de velocidade axial deste trabalho foi também verificado nos trabalhos de Murthy & Bhaskar (2012), Elsayed & Lacor (2010) e Harasek *et al.* (2008). Estes três trabalhos falam sobre o formato “V” ou “W” invertidos dos perfis de velocidade axial encontrados tanto em medidas experimentais quanto em simulações.

Harasek *et al.* (2008) afirmam que as razões físicas para o desenvolvimento dos formatos “V” e “W” nos perfis de velocidades axiais ainda são desconhecidas. No entanto, seus experimentos mostraram que o diâmetro do *vortex finder* influencia o aparecimento desses formatos, mas não de maneira exclusiva.

As baixas velocidades em torno da linha central do equipamento foram também confirmadas por observação *in loco* no momento da realização dos experimentos. A zona de baixa pressão existente ao longo do eixo central provocava o aparecimento de algumas microbolhas de ar, provavelmente oriundas de ar dissolvido na água. Graças a isso foi possível observar que estas microbolhas

migravam para o tubo de overflow com baixíssimas velocidades, confirmando o perfil experimental.

A fim de se verificar a influência da razão de fluido total no formato (V ou W) do perfil de velocidade axial, foram conduzidos três experimento com  $R_{FT}$  iguais a 0,0%, 12,75% e 42%. A Figura 6 mostra os perfis obtidos na linha 1.



**Figura 6:** Comparação entre os perfis de velocidade axiais obtidos experimentalmente na linha 1 para diferentes valores de razão de fluido total.

O formato “W” para o perfil de velocidade foi observado em todas as curvas para os diferentes valores de  $R_{FT}$ .

## CONCLUSÕES

Um hidrociclone para a separação de misturas óleo-água contendo altos teores de óleo foi desenvolvido através de simulações numéricas com fluidodinâmica

computacional, construído e testado experimentalmente para as medidas dos perfis de velocidade axial.

As simulações foram realizadas em regime permanente e transiente. Os valores das razões de fluido e eficiências granulométricas foram muito próximos para os dois regimes, indicando que o regime permanente é o mais apropriado devido a baixos custos computacionais.

Simulações foram realizadas com diferentes diâmetros de gotas para o cálculo da eficiência granulométrica reduzida em função do diâmetro da gota. O diâmetro da partícula separada com eficiência granulométrica reduzida de 50% para o equipamento HC 12 foi de 53  $\mu\text{m}$ . Partículas com diâmetro igual ou acima de 125  $\mu\text{m}$  foram coletadas com 100% de eficiência.

Os perfis de velocidade axiais simulados nas linhas 2 e 4 concordaram qualitativamente com os perfis experimentais. Valores quase nulos de velocidade axial sobre o eixo central foram identificados na linha 2 e estiveram de acordo com os trabalhos de Murthy & Bhaskar (2012), Elsayed & Lacor (2010) e Harasek *et al.* (2008). As baixas velocidades em torno da linha central do equipamento foram também confirmadas por observação in loco no momento da realização dos experimentos. Os formatos “V” e “W” para o perfil de velocidade axial foi observado em todas as curvas para os diferentes valores de  $R_{FT}$ .

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao Laboratório de Fluidodinâmica Computacional (LabCFD), ao Núcleo Interdisciplinar da Dinâmica de Fluidos (NIDF), ambos situados no campus da UFRJ, e agradecem também ao Laboratório de escoamento de Fluidos Giulio Massarani (LEF), no campus da UFRRJ, pela extensa colaboração neste trabalho.

## NOMENCLATURA

$D_i$  – diâmetro do duto de alimentação;

$D_o$  – diâmetro do *overflow*;

$D_u$  – diâmetro do *underflow*;

$G'$  – eficiência granulométrica reduzida;

$L_1$  – comprimento da parte cilíndrica;

$u_q$  – velocidade da fase  $q$ ;

$VF$  – comprimento do *vortex-finder*;

$W_{ac}$  – vazão mássica de água no concentrado (*overflow*);

$W_a$  – vazão mássica de água na corrente de alimentação;

$d'50$  – diâmetro da partícula que é separada com 50% de eficiência;

$ET$  – eficiência total do hidrociclone;

$ET'$  – eficiência total reduzida do hidrociclone;

$d_p$  – particle diameter;

PIV – Particle Image Velocimetry;

LDA – Laser Doppler Anemometry;

$k$  – parâmetro do modelo RRB;

$m$  – parâmetro do modelo RRB;

$n$  – parâmetro da equação de  $G'$ ;

$Q_o$  – vazão volumétrica de óleo na entrada do hidrociclone;

$Q_a$  – vazão volumétrica de água na entrada do equipamento;

$Q_t$  – vazão volumétrica total (óleo + água);

$R_f$  – razão de fluido (vazão volumétrica de óleo no *overflow* / vazão volumétrica de óleo na entrada);

$R_f$  total – razão de fluido total (vazão volumétrica total do *overflow* / vazão volumétrica total na entrada);

$C_{ij}$  – adição de momento devido à convecção (equação dos tensores de Reynolds);

$D_{L,ij}$  – adição de momento devido à difusão viscosa (equação dos tensores de Reynolds);

$P_{ij}$  – adição de momento devido ao termo de produção (equação dos tensores de Reynolds);

$F_{ij}$  – adição de momento devido ao termo de produção por rotação (equação dos tensores de Reynolds);

$D_{T,ij}$  – difusão turbulenta (equação dos tensores de Reynolds);

$G_{ij}$  – produção por empuxo (equação dos tensores de Reynolds);

$D_{ij}^T$  – termo de Difusão Turbulenta (equação dos tensores de Reynolds);

### **(Letras Gregas)**

$\alpha_q$  – fração volumétrica da fase q;

$\phi_{ij}$  – termo de redistribuição (equação dos tensores de Reynolds);

$\phi_{ij,w}$  – termo de reflexão de parede;

$\varepsilon_{ij}$  - tensores de dissipação viscosa (equação dos tensores de Reynolds);

$\Theta_1$  – ângulo da primeira parte cônica;

$\Theta_2$  – ângulo da segunda parte cônica.

$\rho$  – densidade do fluido;

$\rho_q$  – densidade da fase q;

$\mu$  – viscosidade do fluido;

$\mu_t$  – viscosidade turbulenta.

## REFERÊNCIAS

Almeida, L.C.; Oliveira Jr., J.A.A.; Medronho, R.A.; “Simulação numérica da separação água-óleo em hidrociclones para baixas frações de óleo”, Anais do 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, Fortaleza – CE, 15 a 22 de outubro de 2009.

Alves, J.V.B.; “Hidrociclone para a Separação do Óleo Residual de Água em Refinarias”, Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2012.

Bai, Zhi-shan; Wang, Hua-lin; Tu, Shan-Tung; “Oil-water separation using hydrocyclones enhanced by air bubbles”, Chemical Engineering Research and Design, 89, 55-59, 2011.

Bhaskar, K.U.; Murthy, Y.R.; Raju, M.R.; Tiwari, S.; Srivastava, J.K.; Ramakrishnam, N.; “ CFD Simulation and Experimental Validation Studies on Hydrocyclone”, Minerals Engineering, 20, 60-71, 2007.

Bretney, E., Water Purifier, US Patent No. 453, 105, 1891.

Elsayed, K. & Lacor, C.; “Application of response surface methodology for modeling and optimization of the cyclone separator for minimum pressure drop”, *V European Conference on Computational Fluid Dynamics*, ECCOMAS CFD, Lisbon, Portugal, 14-17 June 2010.

Flow Manager Software and Introduction to PIV Instrumentation, Software User’s Guide, Denmark September, 2000.

Gibson, M.M.; Launder, B.E.; “Ground Effects on Pressure Fluctuations in the Atmospheric Boundary Layer”. *J. Fluid Mech.*, 86: 491-511, 1978.

Harasek, M.; Horvath, A.; Jordan, C.; “Influence of vortex finder diameter on axial gas flow in simple cyclone”, *Chemical Product and Process Modeling*, 3 (1) (2008) Article 5.

Launder, B. E.; "Second-Moment Closure and Its Use in Modeling Turbulent Industrial Flows", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 9:963–985, 1989 a.

Launder, B. E.; "Second-Moment Closure: Present... and Future?" *Inter. J. Heat Fluid Flow*, 10(4):282–300, 1989 b.

Lien, F. S.; Leschziner, M. A.; "Assessment of Turbulent Transport Models Including Non-Linear RNG Eddy-Viscosity Formulation and Second-Moment Closure", *Computers and Fluids*, 23(8):983–1004, 1994.

Marins, L.P.M., Duarte, D.G., Loureiro, J.B.R., Morais, C.A.C., Silva Freire, A.P.; "LDA and PIV characterization of the flow in a hydrocyclone without an air-core", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 70, 168-176, 2010.

Murthy, Y.R.; Bhaskar, K.U.; "Parametric CFD studies on hydrocyclone", *Powder Technology*, 2012.

Nezhati, K.; Thew, M.T.; "Aspects of the performance and scaling of hydrocyclones for use with light dispersions", *3rd International Conference on Hydrocyclones*, 167-180, September, 1987.

Obeng; D.P., Morrell, S., Napier-Munn, T.J.. "Application of central composite rotatable design to modelling the effect of some operating variables on the performance of the three-product cyclone", *Int. J. Miner. Process.* 76, 181-192, 2005.

Saidi, M.; Maddahian, R.; Farhanieh, B.; Afshin, H.; " Modeling of flow field and separation efficiency of a deoling hydrocyclone using large eddy simulation", *International Journal of Mineral Processing*, 112-113, 84-93, 2012.

Schütz, S.; Gorbach, G.; Piesche, M.; "Modeling fluid behavior and droplet interactions during liquid–liquid separation in hydrocyclones". *Chemical Engineering Science*, v. 64, p. 3935-3952, 2009.

Swain, S.; Mohanty, S.; "A 3-Dimensional Eulerian-Eulerian CFD Simulation of a Hydrocyclone", *Applied Mathematical Modelling*, 2012.

Young, G.A.B; Wakley, W.D.; Taggart, D.L.; Andrews, S.L.; Worrel, J.R.; “Oil water separation using hydrocyclones: an experimental search for optimum dimensions”, Journal Of Petroleum Science and Engineering 11, 37-50, 1994.

Zhou, N.; GAO, Y.; AN, W.; YANG, M.; “Investigation of velocity Field and oil distribution in an oil-water hydrocyclone usin a particle dynamics analyzer”, Chem. Eng. J., n. 157, p. 73-79, 2010.

Texto científico recebido em: 11/02/2015

Processo de Avaliação por Pares: (*Blind Review* - Análise do Texto Anônimo)

Publicado na Revista Vozes dos Vales - [www.ufvjm.edu.br/vozes](http://www.ufvjm.edu.br/vozes) em: 05/05/2015

Revista Científica Vozes dos Vales - UFVJM - Minas Gerais - Brasil

[www.ufvjm.edu.br/vozes](http://www.ufvjm.edu.br/vozes)

[www.facebook.com/revistavozesdosvales](https://www.facebook.com/revistavozesdosvales)

UFVJM: 120.2.095-2011 - QUALIS/CAPES - LATINDEX: 22524 - ISSN: 2238-6424

Periódico Científico Eletrônico divulgado nos programas brasileiros *Stricto Sensu*

(Mestrados e Doutorados) e em universidades de 38 países,

em diversas áreas do conhecimento.