

## 2 Revisão Bibliográfica.

O presente capítulo apresenta um breve resumo da evolução da modelagem do escoamento no interior de hidrociclones, referenciando também alguns trabalhos experimentais.

Até os anos 90 a maior parte dos estudos com hidrociclones era realizada através de análises experimentais, como no trabalho de Young et al (1994), onde são comparados os desempenhos de hidrociclones desenvolvidos pela Amoco em relação aos tradicionais hidrociclones de Colman-Thew. Estas análises são baseadas na eficiência de separação dos hidrociclones, a qual é medida como a razão entre o volume de óleo removido do efluente em relação ao óleo presente.

Assim, as variações geométricas estudadas, como variação no ângulo do cone, do diâmetro do orifício de rejeito, etc, foram analisadas quanto ao seu impacto na eficiência de separação e na perda de carga.

Os principais parâmetros geométricos do hidrociclone são: a área ou diâmetro da entrada; diâmetro do rejeito, diâmetro do ciclone; comprimento cilíndrico, ângulo do cone forte, comprimento do cone forte; ângulo do cone fraco, comprimento do cone fraco, comprimento do cilindro final. Será importante para a análise dos resultados um conhecimento qualitativo da influência dos mesmos.

O trabalho de Wang e Yu (2006) indica que, quanto menor o diâmetro do ciclone, menor o diâmetro de corte ( $d_{50}$ ), ou seja, menor o tamanho das partículas que podem ser separadas, o que significa melhor eficiência. Simultaneamente, a vazão, para uma mesma perda de carga, diminui. O trabalho de Grady et al (2003) apresenta resultados semelhantes com maior eficiência de separação para um hidrociclone de menor diâmetro, quando são comparados um equipamento de 76 mm contra outro de 10mm de diâmetro.

A intensidade da rotação é determinada pela área das entradas tangenciais. Uma entrada menor, com a mesma vazão, aumenta a velocidade tangencial dentro do ciclone. Isso causa um aumento da perda de carga e da possibilidade de quebra

de gotas em regiões de alto cisalhamento. Young et al. (1994), que estudaram hidrociclones “deoiling”, indicam como valor ótimo do diâmetro da entrada como sendo  $\frac{1}{4}$  do diâmetro do ciclone.

Ainda no trabalho de Young et al. (1994) é citado que a eficiência de separação água óleo é independente do diâmetro do rejeito, contanto que uma vazão mínima de rejeito seja ultrapassada. Essa vazão mínima depende do diâmetro do rejeito, sendo que quanto maior o diâmetro maior a vazão mínima. O aumento do rejeito se justifica quando a concentração de óleo cresce.

A eficiência de separação diminui levemente quando o comprimento cilíndrico aumenta. Isso indica que a separação é concentrada na parte cônica. Uma parte cilíndrica mais longa faria com que o fluido perdesse mais momento angular, de modo que seu comprimento deveria ser apenas o suficiente para comportar a altura da(s) entrada(s) tangenciais. Wang e Yu (2006) constaram que, quando a parte cilíndrica é maior, a perda de carga diminui e a fração pela saída de fundo aumenta. A velocidade tangencial do hidrociclone com cilindro curto foi bem maior que a velocidade tangencial do ciclone com cilindro longo, o que pode explicar as diferenças em perda de carga obtidas por estes autores.

Os parâmetros operacionais podem ser resumidos em três: a vazão, a relação de pressão (perda de carga para o rejeito pela perda de carga para a saída de fundo) e a concentração ou distribuição da fase dispersa.

Na medida em que a vazão aumenta, o campo centrífugo fica mais forte e a eficiência de separação aumenta. Isso ocorre de zero até uma determinada vazão onde o aumento do campo de forças é contrabalançado pela redução do tempo de residência. Continuada a elevação de vazão é esperada uma degradação da eficiência, depois de uma faixa constante, sob a influência, das tensões cisalhantes do escoamento sobre as gotas dispersas e portanto, uma diminuição na sua separação, associada a necessidade de pressões de vácuo no rejeito, como é mostrado por Husveg et al. (2006) em seu trabalho com hidrociclones “deoiling”.

Usualmente o acréscimo da relação de pressão, ou da vazão de rejeito, leva a uma melhora na eficiência de separação, porém tende-se a um patamar de eficiência a partir do qual o rejeito é apenas diluído. Esse comportamento também é descrito no trabalho de Husveg et al (2006).

De modo geral, a eficiência de separação aumenta com a concentração de óleo, desde que se mantenha a água como fase contínua. O trabalho de Young et al. (1994) mostra essa correlação.

A partir dos anos 90 vem se buscando intensamente otimizar o processo de desenvolvimento de hidrociclones com um equacionamento cada vez mais preciso, isto é, com menos hipóteses simplificadoras. Em alguns casos, o hidrociclone é analisado analiticamente através da utilização de hipóteses simplificadoras. No entanto, na maioria das situações, o mesmo é analisado através da resolução numérica das equações que governam o fenômeno.

Moraes (1994) desenvolveu um modelo analítico para o escoamento no plano axial de um hidrociclone de Bloor-Ingham (hidrociclone para sólidos). O modelo trata o escoamento na seção cônica do hidrociclone através do conceito de função de corrente, tratando o fluido como invíscido e supondo simetria axial. Desta forma, com base em uma distribuição granulométrica da fase dispersa na corrente de alimentação, foi possível estimar a eficiência de separação do hidrociclone.

Em virtude das claras limitações das soluções analíticas (como escoamentos invíscidos, em 2D, etc...), as modelagens numéricas, impulsionadas pelos avanços na computação e informática, vêm sendo usadas nas mais diferentes aplicações. Nesse caminho, a busca por modelos de turbulência que caracterizem bem o escoamento, limitados pela disponibilidade de processamento computacional, tem sido uma constante fonte de pesquisa e publicações.

O trabalho de Nowakowski et al. (2004) traz uma revisão da evolução da modelagem numérica de hidrociclones relacionando trabalhos baseados em modelos de turbulência algébricos em duas dimensões (2D) e em três dimensões (3D), com modelos de turbulência mais complexos partindo dos modelos baseados na média de Reynolds, como o modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  (energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação), passando pelos modelos de tensão de Reynolds (RSM – Reynolds Stress Model) até os modelos de Simulação de Grandes Escalas (LES – Large Eddy Simulation).

Como exemplo de trabalhos em 3D, que supre as falhas da abordagem bidimensional em capturar as assimetrias axiais associadas à entrada de fluido, por exemplo, tem-se o trabalho de Daí el al. (1999), que aplica o modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  para a modelagem configuração 3-D de hidrociclones para sólidos. Neste caso, foram

modificadas as constantes usuais do modelo como objetivo de capturar a característica anisotrópica da turbulência viscosa em hidrociclones.

Os modelos  $\kappa$ - $\epsilon$  (Hinze, 1975) são baseados na aproximação de Boussinesq, a qual consiste em considerar a tensão de Reynolds diretamente proporcional a taxa de deformação média do escoamento, possuindo a premissa de turbulência isotrópica em seu desenvolvimento. No entanto, diversos trabalhos, como o de Delgadillo e Rajamani (2005), têm mostrado que estes modelos não são os mais adequados para prever com precisão os perfis de velocidade tangencial e axial. Porém, mediante ajustes e correções parâmetros, estes modelos, de processamento menos custoso, podem levar a resultados satisfatórios como os apresentados por Bhaskar et al (2007). Estes autores recomendam o uso do modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  RNG (Speziale et al., 1991), o qual possui as constantes modificadas de acordo com a teoria do Grupo de Renormalização, além modificar a equação da dissipação de energia turbulenta ( $\epsilon$ ), pela a adição de um termo baseado na taxa de deformação do escoamento médio e um termo para levar em conta a invariância do sistema de coordenadas devido a presença do escoamento espiralado. Os autores indicam que bons resultados são obtidos para hidrociclones de pequeno diâmetro, com raio inferior a 44mm, e ressaltam que a correção devido a rotação do escoamento é fundamental.

Chen e Chang (1995) utilizaram o modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  com correções para levar em consideração efeitos anisotrópicos, modificando a equação de dissipação de energia cinética turbulenta, para levar em consideração as variações de massa específica da mistura óleo/água. Ressaltam, no entanto, que esse tipo de abordagem é muito específica pois as constantes das equações devem ser otimizadas caso a caso. Murphy et al. (2007) realizaram uma comparação das predições dos “softwares” comerciais FLUENT e CFX, com o modelo RSM, para prever o escoamento em um hidrociclone. As soluções obtidas divergiram entre si, tendo a diferença sido atribuída à modelagem da difusão turbulenta e ao termo rápido de pressão-deformação da equação da dissipação.

Os modelos do tensor de Reynolds envolvem a solução das equações de transporte para cada um dos componentes do tensor. Estas equações são obtidas a partir das equações de Navier-Stokes. As equações resultantes necessitam de diversos termos de fechamento. Um dos termos mais críticos é relacionado com o

termo de pressão, associado à redistribuição do tensor de Reynolds (Speziale et al., 1991; Grotjans 1999, Montavon et al., 2000, Murphy et al., 2007). Em geral, este termo é sub-dividido em resposta rápida e lenta da pressão, associadas ao escoamento médio e às flutuações, respectivamente. Para o termo de pressão rápida, utilizam-se correlações da flutuação de pressão e deformação: aproximação linear, como por exemplo, LRR de Launder et al. (1975) ou quadrática SSG de Speziale et al, (1991). A maioria dos modelos considera a hipótese de isotropia para modelar a dissipação.

Speziale et al (1991) apresentam uma abordagem teórica para comparar as aproximações linear (LRR) e quadrática (SSG) do termo de redistribuição do tensor de Reynolds e concluem que o modelo quadrático tem melhor desempenho nos escoamentos examinados, expansões e contrações axissimétricas e um escoamento rotacional. Grotjans (1999) compara resultados experimentais com simulações utilizando ora a aproximação linear, ora a aproximação quadrática, obtendo melhores resultados com esta última e concluindo que a aproximação linear subestima as velocidades tangencias próximas ao eixo de rotação. Murphy et al., 2007 também fazem referência a melhores resultados com a aproximação quadrática em um estudo com um hidrociclone axial.

Montavon et al. (2000) investigaram a aplicação de modelos de duas equações modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  “standard” em comparação com os modelos do tensor de Reynolds (RSM). A melhor concordância entre os resultados dos modelos e os dados experimentais foi obtida para o modelo RSM com o complemento SSG.

Olson e Van Ommen (2004) também lançaram mão da modelagem numérica para otimizar a configuração geométrica de hidrociclones para remoção de sólidos, utilizando o modelo RSM. Melo et al. (2003) analisou técnicas de flotação para o tratamento de água/óleo, enquanto que Matvienko (2004) investigou o desempenho de diferentes modelos de turbulência.

Apesar de ainda envolver altos custos computacionais, os avanços na computação vêm permitindo o uso de LES em um número significativo de aplicações práticas.

Nowakowski et al. (2004) fizeram uma revisão do uso de CFD para modelagem de hidrociclones e incluíram a modelagem com LES como a melhor alternativa para capturar as oscilações dependentes do tempo do vórtice central e o desequilíbrio da turbulência, que tem grande impacto na eficiência de separação.

Porém, ressaltaram que a utilização da modelagem LES incorre em altos custos computacionais.

Narasimha b) et al. (2006) compararam os resultados experimentais obtidos com hidrociclones de 75mm e 101mm de diâmetro com a simulação utilizando RSM e LES, sendo que, esta última técnica levou a melhora na previsão dos campos de pressão e velocidade.

Na maioria das publicações examinadas os estudos comparativos são realizados considerando-se escoamento monofásico. A validade desta aproximação cresce quanto mais diluída estiver a fase dispersa. Algumas publicações envolvendo modelos multifásicos para a separação sólido-líquido foram encontradas (Wang e Yu, 2006, e Wang et al 2006).

Narasimha b) et al (2006) propuseram para a modelagem de hidrociclones uma abordagem conjunta envolvendo RSM e a simulação de grandes escalas (Large Eddy Simulation) na região próxima a linha de centro, de fluxo reverso.

Uma análise numérica de hidrociclones líquido-líquido utilizando a abordagem multifásica foi realizada por Huang (2005). Utilizou-se um modelo RSM para o escoamento turbulento da fase contínua e um modelo Euleriano para a fase dispersa (gotículas), sendo a concentração da fase dispersa de até 10% em volume.

Brenam et al. (2007) destacaram que a incorporação da modelagem LES nos pacotes comerciais de CFD foi também importante para a popularização dessa modelagem. Utilizaram uma modelagem LES multifásica, tendo investigado o tamanho do cone reverso central e a eficiência de separação de sólidos para um hidrociclone de 75mm. Foi apresentada uma boa correspondência com dados experimentais dos perfis de velocidade tangencial e axial

Averous e Fuentes (1997) investigaram a influência da rugosidade das paredes internas do hidrocilone no escoamento, e concluíram que esta modifica a geração turbulenta próxima a parede, afetando assim o perfil de velocidade como um todo.

Cortés e Gil (2007) realizaram uma revisão dos modelos para o escoamento dentro de ciclones, desde modelos algébricos, até modelos diferenciais para uma ou duas fases. Nesta referência é citado que a perda de carga em um hidrociclone não segue o mecanismo usual como no escoamento unidirecional de dutos. Mencionam que a perda de carga diminui com o aumento da fricção com a parede,

com a concentração de sólidos ou com o comprimento do equipamento. A explicação para esses efeitos seria que a dissipação viscosa ocorre principalmente nas regiões de maior gradiente ao redor do vórtice central, assim todos os efeitos que diminuem o valor da velocidade tangencial, por fim, reduzem a perda de carga no equipamento.

Na maioria dos trabalhos analisados, a solução numérica do escoamento foi obtida utilizando o método de Volumes Finitos através da utilização de *softwares* comerciais, em sua maioria Fluent ou CFX.

Estudos do escoamento em hidrociclones através da utilização de técnicas experimentais também foram encontrados. Os dados obtidos são utilizados para a validação das simulações e modelos computacionais. Existem poucas publicações nessa área e menos ainda para hidrociclones líquido-líquido. Hartley (1994) publicou um estudo de medidas de velocidade em hidrociclones utilizando a técnica de Velocimetria Laser-Doppler (LDA). Um exemplo da informação que pode ser obtida por esta técnica é apresentado na Fig. 2.1, onde é apresentada a variação da velocidade com o tempo.

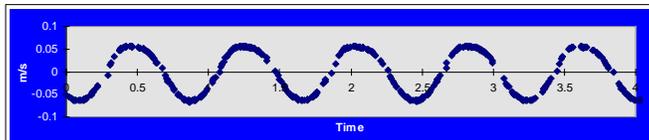


Figura 2.1 – Exemplo de medições obtidas com a técnica de LDA

Outra técnica de medição de escoamentos que vem sendo aplicada para medição em ciclones (Liu et al, 2006) é a Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV), em suas versões planar e estereoscópica. Por meio desta técnica é possível a obtenção da evolução instantânea da velocidade em planos transversais e longitudinais do hidrociclone. Um exemplo dos resultados possíveis é apresentado na Fig. 2.2, com o campo instantâneo de velocidade, colorido com o módulo do vetor velocidade.

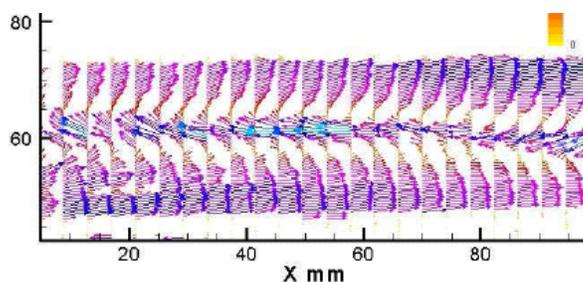


Figura 2.2 – Campo de vetores de velocidade obtidos com PIV

Recentemente, Marins (2007) combinou as técnicas experimentais LDA e PIV para medição do escoamento no interior de um hidrociclone projetado para alto teor de óleos. Os experimentos foram realizados utilizando apenas água. Perfis das componentes tangenciais e axiais da velocidade foram obtidos em diversas alturas do equipamento. Os resultados com LDV foram em média 16% menores que os obtidos com PIV para o componente axial da velocidade nas diferentes alturas axiais medidas. As medidas obtidas com a técnica PIV permitiram observar que o escoamento no interior do hidrociclone não é estacionário, corroborando a informação da literatura onde se tem a oscilação quase periódica do vórtice central ao redor do eixo do equipamento, também chamada de precessão (Dirkzwager, 1996 e Monredon et al, 1992). A técnica LDV foi utilizada para medir perfis de velocidade. Também foram realizadas algumas investigações das flutuações das velocidades tangenciais e axiais.