

## 6 Conclusões

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões obtidas pela análise dos resultados frente aos dados experimentais e numéricos disponíveis na literatura, do escoamento em um hidrociclone. As conclusões englobam os aspectos da geometria, geração de malha, condições de contorno e modelos de turbulência. Finalmente, recomendações de trabalhos futuros são apresentadas.

No presente trabalho realizou-se uma modelagem do hidrociclone utilizado por Marins (2007), com simplificações na sua geometria de entrada. A esta geometria foi aplicada um malha de volumes finitos para simulação, com dois modelos de turbulência, das condições experimentais e da variação: da vazão de entrada, da rugosidade das paredes, e do comprimento cilíndrico final do hidrociclone. A modelagem e simulações foram realizadas com os “softwares” comerciais Gambit e Fluent, respectivamente. Embora o hidrociclone em questão seja projetado para o uso com cargas de alto teor de óleo (maior que 10%) todas as simulações foram monofásicas, utilizando-se água a 25°C como fluido, da mesma maneira em que foram levantados os dados experimentais.

Conforme discutido no Capítulo 4 os resultados numéricos se mostraram sensíveis a escolha de uma malha não regular e hexaédrica, pois na malha gerada com prismas foi observada uma descontinuidade entre a malha regular, externa a projeção do rejeito, e a malha da projeção do rejeito com prismas entre os hexaedros. O uso de um cilindro irreal central, para a montagem de uma malha mais regular, apenas com hexaedros, corrigiu a solução numérica. A atenuação das oscilações normais causada por esse cilindro (oscilações radiais) possivelmente tem pouca influência no resultado da velocidade média (que é o desejado para a comparação com dados experimentais). O uso deste cilindro central pode vir a ser interessante quando na montagem de equipamentos novos, a menos de dificuldades construtivas, de forma a estabilizar o cone reverso na região central, como sugerido por Sripriya et al, 2007.

As simplificações empregadas para representar a entrada de fluido no

hidrociclone também são utilizadas em diversas referências. Mostrou-se que as mesmas não afetam significativamente os resultados. Por outro lado a solução se mostrou sensível ao método utilizado para discretização da equação de conservação de quantidade de movimento linear. Dois esquemas de discretização de segunda ordem foram utilizados: *Upwind* de segunda ordem e QUICK. Apesar de ambos serem de segunda ordem e os dois esquemas apresentarem um peso maior para as grandezas a montante (*upwind*), o primeiro esquema apresentou gradientes de velocidade tangenciais mais intensos na região do cone reverso. Na comparação dos diferentes modelos de turbulência com os dados experimentais apresentada no Capítulo 5 observou-se que todos os modelos apresentaram o mesmo comportamento qualitativo. Todos apresentaram um componente tangencial de velocidade aproximado de um misto de rotação de corpo rígido e de vórtice livre, com aproximadamente a mesma inclinação da velocidade em relação ao centro, mas em todos os casos a componente tangencial foi superestimada. Uma maior discrepância entre os resultados foi obtida na região central do cone reverso. Apesar dos modelos de turbulência LES e RSM com o esquema QUICK terem apresentado uma boa concordância em grande parte do escoamento, o modelo LES superestimou muito o extremo de velocidade. O trabalho de Delgadillo e Rajamani (2005) também indicou que os componentes tangenciais com LES foram super estimados em relação a outros modelos. O mesmo trabalho ainda indica que as previsões com LES são mais fracas junto às paredes, onde a viscosidade molecular tem um efeito mais significativo.

O modelo RSM (com QUICK) apresentou um gradiente de velocidade muito suave na região do cone reverso, superestimando levemente a largura do mesmo. Já o modelo RSM com o esquema de segunda ordem *Upwind*, além de superestimar a componente tangencial, também superestimou o gradiente de velocidade junto ao eixo central, ou seja, prevê um cone reverso levemente mais fino. Observou-se ainda que, quanto maior o valor tangencial da velocidade e mais intensos os gradientes maior a queda de pressão (ou dissipação no escoamento). A redução da vazão de entrada causou uma redução nos valores do componente tangencial de velocidade e no máximo do componente axial para os resultados com LES e RSM. Com a redução de 6,2 para 5,5 m<sup>3</sup>/h houve uma boa aproximação do perfil tangencial com RSM aos resultados experimentais. A redução no perfil tangencial com LES não foi tão expressiva.

Com a imposição de uma rugosidade de 50  $\mu\text{m}$  nas paredes do hidrociclone se obteve uma redução do perfil de velocidade tangencial na simulação RSM. Associado a isso houve também uma redução da variação da pressão entre a entrada e saída de fundo do hidrociclone..

Investigou-se o efeito da rugosidade no escoamento, utilizando o esquema QUICK e o modelo RSM. Observou-se que de acordo com o observado na literatura, contrário ao esperado, a rugosidade nas paredes do hidrociclone reduz a queda de pressão ao longo do mesmo. Vale mencionar que os resultados obtidos com uma rugosidade alta são interessantes para destacar que a corrosão ou depósito de incrustações, que podem alterar a característica da parede, e por consequência o escoamento em relação ao acabamento da fabricação.

A partir da análise do escoamento através de um hidrociclone com maior comprimento cilíndrico junto a saída de fundo, observou-se também uma redução da componente tangencial da velocidade com o modelo RSM e desta forma a uma redução da perda de carga de modo semelhante a ação da rugosidade. A simulação com LES praticamente não apresentou alteração no perfil de velocidade.

Analisando os resultados das comparações: liso e rugoso, normal e estendido, se pode concluir que a principal dissipação de energia do escoamento no hidrociclone não ocorre junto a paredes como ocorre em escoamentos em dutos. Esta ocorre sim, na região de maiores gradientes, junto ao cone reverso central como mostrado na Fig. 5.21, de contornos de produção turbulenta. Assim o efeito de aumento da dissipação junto à parede é sobrepujado pela redução na dissipação no centro. Apenas as simulações com o modelo RSM retrataram essa característica.

Um aspecto interessante das diferentes simulações é que o diâmetro do cone reverso se manteve aproximadamente o mesmo, indicando esse parâmetro como mais dependente das características geométricas do que das condições operacionais.

Analisando o detalhe dos resultados pode-se observar que a simulação com LES apresentou uma oscilação do cone reverso central bem mais expressiva do que a observada com o RSM. As flutuações turbulentas também mais intensas com LES, cinco vezes ou mais, do que com RSM.

Um aspecto interessante que a modelagem com LES permite é avaliar o percentual da energia que está sendo dissipada no modelo sub-malha em relação

às escalas resolvidas. Esse parâmetro serve para avaliar a qualidade da malha e os resultados com a malha 1000 ficaram em torno de 5%. Ainda, referente a malha, os resultados de altura adimensional,  $y^+$  indicam encontrar-se na faixa recomendada para utilização da lei de parede tanto para o LES quando RSM.

Para trabalhos futuros recomenda-se realizar dois tipos de investigações: a primeira referente a aspectos numéricos, e a segunda referente a aspectos físicos do problema.

Do ponto de vista numérico, recomenda-se investigar escoamento sem o cilindro irreal central, buscando uma malha mais estruturada e mais uniforme, para verificação da sua influência na precessão. Recomenda-se também investigar outros esquemas de discretização, como por exemplo, o método de diferenças centrais que apesar de sofrer de problemas de estabilidade, é reconhecidamente o mais indicado para se utilizar nas simulações LES. Ainda com relação a malha, recomenda-se utilizar uma malha bem mais fina na região da parede, na direção radial, para ser possível evitar o uso de leis da parede.

Do ponto de vista físico, recomenda-se investigar a influência no escoamento de modelos de sub-malha. Recomenda-se também investigar o tipo de condições de contorno imposta, como diferentes vazões de rejeito, o uso de condições de contorno de pressão, evitando arbitrar a divisão da vazão entre *underflow* e *overflow*. Finalmente, pode-se afirmar que o uso da dinâmica dos fluidos computacional vem agregar conhecimento e agilidade aos trabalhos experimentais, permitindo uma redução no número de experimentos e investigação de parâmetros de difícil medição direta como pressões, tensões e etc.