



PROGRAMA EQ-ANP

**Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria
do Petróleo e Gás Natural**



Influência dos Diâmetros de Saída de um Hidrociclone na Eficiência de Recuperação da Água Produzida em Poços de Petróleo

Rafael da Silva Oliveira

Projeto de Final de Curso

Orientadores

Prof. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.

Prof. Cristiano Agenor Oliveira de Araújo, M.Sc.

Junho de 2013

INFLUÊNCIA DOS DIÂMETROS DE SÍDA DE UM HIDROCICLONE NA EFIÊNCIA DE RECUPERAÇÃO DA ÁGUA PRODUZIDA EM POÇOS DE PETRÓLEO

Rafael da Silva Oliveira

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente do Programa Escola de Química/Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria de Petróleo e Gás Natural, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenharia Química com ênfase na área de Petróleo e Gás Natural – Tratamento de Resíduos e Meio Ambiente.

Aprovado por:

Amaro Gomes Barreto Jr, D.sc.

Eduardo Rangel Braga, M.Sc

Fábio Vieira de Queiroz, M.Sc.

Orientado por:

Ricardo de Andrade Medronho Ph.D.

Cristiano Agenor Oliveira de Araújo, M.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Junho de 2013

Oliveira, Rafael da Silva

Influência dos Diâmetros de Saída de um Hidrociclone na Eficiência de Recuperação da
Água Produzida em Poços de Petróleo. / Rafael da Silva Oliveira. Rio de
Janeiro: UFRJ/EQ, 2013.

xii, 58 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química,
2012.

Orientadores: Ricardo de Andrade Medronho e Cristiano Agenor de Oliveira
Araujo.

1. CFD. 2. Hidrociclones. 3. Altos teores de óleo. 4. Monografia. (Graduação –
UFRJ/EQ). 5. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D e Cristiano Agenor de Oliveira
Araujo, M.Sc.

Dedicatória

Dedico esta monografia a minha família, amigos e a todos que de alguma forma estiveram presentes ao longo dessa jornada.

Citação

“Forward, forward, I am not turning back!”

Sentenced

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais pelo apoio fornecido e pela confiança que sempre tiveram em mim, fatores que foram imprescindíveis para chegar até aqui.

Agradeço a meus amigos, que foram de extrema importância em todos os momentos dessa longa jornada.

Agradeço aos amigos do LabCFD e aos agregados pelos conhecimentos técnicos e filosóficos compartilhados, pela ajuda nas horas mais difíceis e pelos momentos de descontração na sexta-feira, quando expediente sempre acabava mais cedo.

Agradeço ao pessoal (Daniel, Gustavo, Léo) do Antigo AP 203 que se tornou agora o AP 104, pelas conversas, pelas partidas de W.E (atualmente FIFA), pela cerveja compartilhada nas dificuldades e nas alegrias, pelo entendimento que caminhar de um lado para outro às vésperas de prova e falar sozinho é algo normal, dentre outros.

Agradeço aos meus orientadores, Medronho e Cristiano pela paciência, entusiasmo e conhecimentos transmitidos ao longo desse período.

Ao apoio financeiro da **Agência Nacional do Petróleo – ANP** – e da **Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP** – por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT, em particular ao **PRH 13**, da Escola de Química - Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria do Petróleo e Gás Natural.

Resumo do Projeto Final apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico com ênfase na área de Petróleo e Gás Natural – Tratamento de Resíduos e Meio Ambiente.

Influência dos Diâmetros de Saída de um Hidrociclone na Eficiência de Recuperação da Água Produzida em Poços de Petróleo

Rafael da Silva Oliveira
Junho, 2013

Orientadores: Prof. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.
Prof. Cristiano Agenor de Oliveira Araújo, M.Sc.

No ambiente *offshore*, o principal equipamento utilizado para a separação óleo/água é o separador gravitacional. Como este separador requer longos tempos de residência para efetuar uma separação satisfatória, ele ocupa uma grande área em uma plataforma, onde o espaço é um fator crítico. Desta forma há uma necessidade do estudo de equipamentos compactos para este fim. Os hidrociclones têm sido largamente utilizados no ambiente *offshore* para o tratamento de águas com baixo teor de óleo e o grande sucesso destes equipamentos se deve ao fato de serem compactos, possuírem elevada eficiência de separação e, ao mesmo tempo, serem baratos e de fácil construção. Neste trabalho, foi estudada a influência dos diâmetros de saída (*overflow* e *underflow*) de um hidrociclone na separação óleo/água com altos teores de óleo como fase dispersa (40% v/v). O objetivo deste trabalho foi, assim, maximizar a recuperação de óleo no *overflow*, gerando uma corrente mais limpa de água saindo do equipamento pelo *underflow*, o que minimizaria custos no posterior tratamento desta corrente. Os estudos foram conduzidos utilizando a Fluidodinâmica Computacional e foi realizado um planejamento de experimentos do tipo delineamento composto central rotacional (DCCR) com o modelo de superfície de resposta. De posse dos resultados, foi realizada uma otimização e foi construída a curva de eficiência granulométrica para esse hidrociclone. Foi calculado o desempenho deste para a separação de duas distribuições de tamanhos de gotas presentes na literatura (Colman e Thew, 1980) e a distribuição grossa utilizada por Alves (2012.), onde foram alcançadas eficiências totais de separação do óleo de 53,6% e 88,2%, respectivamente.

Abstract of a Final Project presented to Escola de Química/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Chemical Engineer with emphasis on Petroleum and Natural Gas – Environment and Waste Treatment.

**Influence of the Hydrocyclone Outlet Diameters on the Recovery Efficiency of
Produced Water in Oil Wells**

Rafael da Silva Oliveira
June, 2013

Supervisors: Prof. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.
Prof. Cristiano Agenor de Oliveira Araújo, M.Sc

At offshore environment, the main device used for oil/water separation is the gravitational separator. As this requires long residence times to perform a satisfactory separation, it occupies a huge area at the platform, and in offshore platforms space is a critical factor. Thus it is necessary to study compact equipment for this purpose. Hydrocyclones have been widely used at the offshore environment for treatment of water with low oil content and the great success of these apparatuses is because they are compact, they give high separation efficiencies and at the same time they are cheap and easy to construct. This study analyzed the influence of the outlet diameters (overflow and underflow) of a hydrocyclone being applied to separation of oil/water dispersions with high oil content (40% v/v). The objective of this study was maximize the recovery of oil in the overflow, obtaining water with low oil content in the underflow. This would minimize costs in subsequent treatment of this water. The studies were performed using Computational Fluid Dynamics and design of experiments for accessing the influence of the outlet diameters in oil separation efficiency. Thus, a planning using central composite rotational design with a response surface model was used. After simulating all geometries, an outlet optimization was performed and the grade efficiency curve was obtained. The hydrocyclone performance was evaluated for two droplet size distributions, a coarse and a fine distribution, and the total separation efficiencies of oil achieved was 53.6% and 88,2%, respectively.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Objetivos	6
1.2. Justificativa e Relevância do Tema	6
2. Revisão bibliográfica	8
2.1. Hidrociclones.....	8
2.2. Utilizações na indústria do petróleo	10
2.3. Separação Líquido-Líquido em Hidrociclones.....	12
2.3.1. Quebra e Coalescência	12
2.3.2. Eficiência de Separação	13
2.3.3. Perfis de velocidade nos hidrociclones.....	19
2.4. Utilização de simulação numérica em projeto e análise de desempenho de Hidrociclones	22
3. Modelos matemáticos	26
3.1. Equação da Continuidade	26
3.2. Equação do Movimento.....	27
3.3. Abordagem Euleriana-Lagrangeana	27
3.4. Abordagem Euleriana-Euleriana	28
4. Fluidodinâmica Computacional	30
4.1. Introdução	30
4.2. Etapas de uma simulação utilizando CFD.....	31
4.2.1. Malha.....	32
4.3. Turbulência	34
4.3.1. Modelo dos Tensores de Reynolds	36
5. Planejamento de Experimentos	38

6.	Materiais e métodos:	40
6.1.	Software e Hardware.....	40
6.2.	Geometria base.....	40
6.3.	Teste de malha	41
6.4.	Configuração das simulações	42
6.5.	Planejamento de experimentos.....	43
6.6.	Curvas de eficiência do Equipamento	44
7.	Resultados e discussão	45
7.1.	Geometria e Malha para o ponto central	45
7.2.	Resultados para a simulação do ponto central	46
7.3.	Planejamento de experimentos.....	51
7.3.1.	Otimização.....	52
7.4.	Eficiência de separação para o hidrociclone selecionado	53
8.	Conclusões	56
9.	Sugestões para Trabalhos Futuros	57
10.	Bibliografia.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Relações espaciais entre rochas geradoras, reservatórios e selantes (Thomas et al. 2001)	2
Figura 1-2 Reservatório típico de óleo e gás (http://dougaspinto.blogspot.com.br/2010/09/blog-post.html , acessado em 21/05/2013).....	2
Figura 1-3 Fluxograma do processamento primário de Fluidos (Thomas et al. 2001).....	3
Figura 2-1 Princípio de funcionamento de um hidrociclone (adaptado de Husveg, 2007)	9
Figura 2-2 Esquema do hidrociclone de-oiling empregado por Colman-Thew com as respectivas dimensões (Young et al., 1994)	11
Figura 2-3 Dados experimentais da influência da vazão sobre a eficiência de remoção. Adaptado de Bennett & Willians (2004).....	13
Figura 2-4 Exemplo de curva de eficiência granulométrica, com $R_f = 0,35$ (Alves, 2012).....	15
Figura 2-5 Exemplo de curva de eficiência granulométrica reduzida e do diâmetro de corte reduzido $d'50$ (Alves, 2012)	177
Figura 2-6 Componentes da velocidade global do hidrociclone (Coelho, 2011)	199
Figura 2-7 Perfil típico de velocidade tangencial em um hidrociclone (Svarovsky, 1990).....	20
Figura 2-8 Perfil típico de velocidade axial em um hidrociclone (Svarovsky, 1990).....	211
Figura 2-9 Perfil típico de velocidade radial em um hidrociclone (Svarovsky, 1990).....	222
Figura 3-1 Volume de controle arbitrário no plano cartesiano (Bird et al., 2002)	266
Figura 4-1 Etapas para obtenção de Solução Numérica para um problema de mecânica dos fluidos (Rego, 2008).	32
Figura 4-2 Malhas bidimensionais não estruturada a direita e Estruturada a esquerda (Maliska, 2004).....	333

Figura 4-3 Velocidade instantânea v , velocidade média V e flutuação v' (Adaptado de Bird, 2002)	355
Figura 6-1 Esquema do hidrociclone para separação óleo-água empregado no estudo em questão com suas respectivas variáveis.....	41
Figura 7-1 Geometria do ponto central do planejamento de experimentos.....	455
Figura 7-2 Detalhe do refino da malha em regiões estratégicas do domínio físico.....	466
Figura 7-3 Linhas onde foram tomadas as velocidades tangenciais do equipamento.....	477
Figura 7-4 Velocidade tangencial na linha 2 variando-se o número de iterações	488
Figura 7-5 Velocidade tangencial nas linhas arbitrárias.....	488
Figura 7-6 Perfil de pressão no hidrociclone do ponto central do planejamento de experimentos.....	499
Figura 7-7 Linhas de corrente para o óleo no hidrociclone.....	50
Figura 7-8 Vetores velocidade da fase contínua no overflow do equipamento	5050
Figura 7-9 Respostas do planejamento de experimentos através da análise das superfícies de resposta de $G'(Do, Du)$ e $Rf(Do, Du)$	5252
Figura 7-10 Curva de eficiência granulométrica reduzida para o hidrociclone otimizado (Hidrociclone 5).....	544
Figura 7-11 Forma linearizada da equação de eficiência granulométrica reduzida para o hidrociclone otimizado.....	544

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4-1 constantes do modelo SSG	37
Tabela 6-1 Dimensões do equipamento do ponto central do planejamento de experimentos	41
Tabela 6-2 Configurações utilizadas nas simulações numéricas	42
Tabela 6-3 Propriedades físicas da carga	43
Tabela 7-1 Número de elementos e nós da malha do Ponto central do planejamento de experimentos e da malha gerada por (Araújo, 2012).....	46
Tabela 7-2 Resultados obtidos para a simulação do ponto central do planejamento de experimentos.	46
Tabela 7-3 Resultados de G' e R_f para os experimentos realizados.....	51
Tabela 7-4 Parâmetros geométricos, G' e R_f para o hidrociclone otimizado.....	52
Tabela 7-5 Dados do hidrociclone Otimizado e do hidrociclone 5 do planejamento de experimento	53
Tabela 7-6 Parâmetro n e d'_{50} do hidrociclone 5.....	55
Tabela 7-7 Eficiência do equipamento e parâmetros RRB para as duas distribuições analisadas.....	55

1.Introdução

O petróleo é formado pela decomposição de matéria orgânica, tanto vegetal quanto animal. Esta matéria é depositada junto com sedimentos que sob a ação de condições adversas de temperatura e pressão geram substâncias constituídas, em sua maioria, de moléculas compostas por hidrogênio e carbono, no caso, os hidrocarbonetos. As características do óleo e gás formados dependem, fundamentalmente, das características da matéria orgânica depositada e das condições de pressão, temperatura e tempo de exposição a estas características intrínsecas do meio em questão.

Os sedimentos depositados junto com a matéria orgânica formam uma estrutura classificada como rocha geradora, é nesta formação que ocorre a formação dos hidrocarbonetos pelos motivos supracitados. Após esta geração, os hidrocarbonetos migram, sob a ação de pressão, para outras estruturas, denominadas rochas reservatórios, que possuem como característica principal alta porosidade para poder estocar o material gerado. Este deslocamento inicial do petróleo gerado é chamado de migração primária e o deslocamento ao longo da rocha reservatório é denominado de migração secundária. Apenas a existência dessas duas rochas não garante a formação de um reservatório, também é necessária que esta formação seja cercada por uma rocha impermeável, denominada de rocha selante (ou capeadora), para que o óleo e gás formados fiquem estocados na rocha reservatório. O conjunto desses três elementos e a disposição espacial entre rochas reservatórios e rochas selantes, que formam uma espécie de armadilhas geológicas, garantem a possibilidade da existência de uma reserva de petróleo naquele local. A Figura 1.1 apresenta de maneira esquemática as relações espaciais entre rochas geradoras, reservatórios e selantes e a Figura 1.2 mostra a distribuição de fases no interior de um reservatório típico de petróleo.

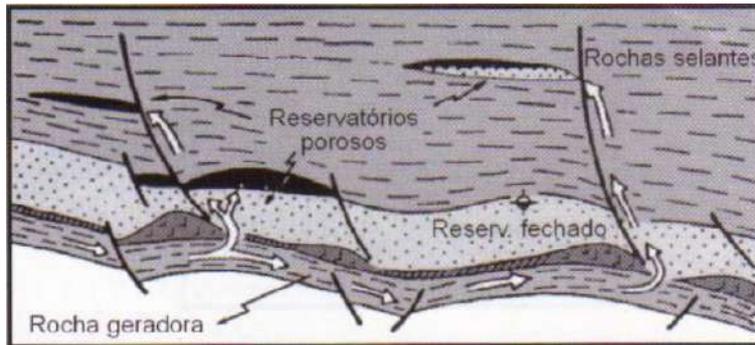


Figura 1.1 - Relações espaciais entre rochas geradoras, reservatórios e selantes (Thomas et al. 2001)



Figura 1.2 - Reservatório típico de óleo e gás
 (<http://douglaspinto.blogspot.com.br/2010/09/blog-post.html>, acessado em 21/05/2013)

Constatada a descoberta de uma reserva de petróleo, através de diversos estudos e testes, dá-se início a exploração deste recurso. Ao longo da vida produtiva de um campo de petróleo ocorre geralmente a produção simultânea de gás, óleo e água, juntamente com impurezas.

Segundo Thomas et al. (2001), como o interesse econômico é somente na produção de hidrocarbonetos (óleo e gás) há necessidade de dotar os campos (marítimos ou terrestres) de "facilidades de produção", que são instalações destinadas a efetuar, sob condições controladas, o "processamento primário de fluidos", ou seja:

- A separação do óleo, do gás e da água com impurezas em suspensão;

- O tratamento e condicionamento dos hidrocarbonetos para que possam ser transferidos para as refinarias onde é efetuado o processamento, propriamente dito, e;
- O tratamento da água para reinjeção e descarte.

Dependendo do tipo de fluidos produzidos e da viabilidade técnico-econômica, uma planta de processamento primário pode ser simples ou complexa. As mais simples efetuam apenas a separação água/óleo/gás, enquanto que as mais complexas incluem o condicionamento e compressão de gás, tratamento e estabilização do óleo e tratamento da água para reinjeção e descarte.

Toda planta possui uma capacidade nominal de processamento, projetada em função do estudo de diversos parâmetros do campo produtor. A Figura 1.3 representa um diagrama que mostra os principais componentes de uma unidade deste tipo.

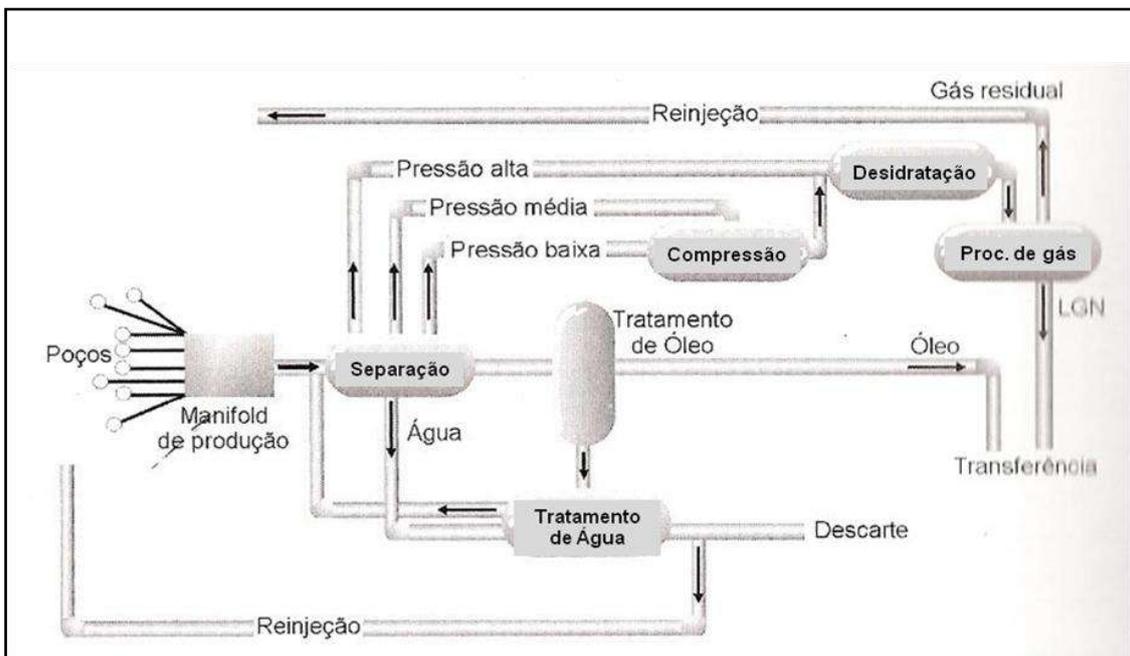


Figura 1.3 - Fluxograma do processamento primário de Fluidos (Thomas et al. 2001)

O sistema é equipado com uma válvula para o controle da vazão de acordo com as recomendações da engenharia de reservatórios. Nesta válvula é onde ocorre a maior perda de carga localizada entre o reservatório e o primeiro separador. Quando dois ou mais poços produzem para a mesma unidade, é necessário o uso de um equipamento, denominado *manifold* de produção para combinar as vazões e pressões dos diversos poços para a entrada da planta de processamento primário.

Para a separação da carga multifásica vinda das linhas de produção, são utilizados grandes separadores gravitacionais (que podem ser projetados tanto para separar cargas bifásicas quando trifásicas) que, segundo Thomas et al. (2001), baseiam-se nos seguintes mecanismos para a separação dos líquidos e gases:

- Ação da gravidade e diferença de densidades, responsável pela decantação do fluido mais pesado, no caso a água;
- Separação inercial - mudanças bruscas de velocidades e de direção de fluxo, permitindo ao gás desprender-se da fase líquida devido a inércia que esta fase possui;
- aglutinação das partículas - contato com as gotículas de óleo dispersas sobre uma superfície o que facilita sua coalescência, aglutinação e conseqüentemente decantação.

Estes separadores são bem eficientes, porém eles apresentam algumas desvantagens, como por exemplo: são equipamentos grandes que operam em ambientes *offshore* onde o espaço é um fator limitante, estes exigem um tempo de residência relativamente alto para proceder a separação de maneira satisfatória.

Os hidrociclones, intitulados *de-oiling*, têm sido largamente utilizados no ambiente *offshore* há mais de três décadas no tratamento de águas oleosas (com teores até 1% de óleo) para a adequação à legislação vigente. O grande sucesso deste equipamento neste segmento deve-se ao fato de serem equipamentos compactos, possuírem elevada eficiência de separação em função da força centrífuga gerada em seu interior, 2 a 3 ordens de grandeza

superior à força gravitacional, serem equipamentos baratos e de fácil construção e não possuírem partes móveis.

Segundo o Boletim Técnico da Petrobras (2008), no período entre 2003 e 2005, em um projeto interno desta empresa, foram avaliados hidrociclones para altos teores de óleo (50%V/V) em testes de campo realizados na plataforma Pampo (PPM-1) e os resultados de desempenho do sistema nessa plataforma mostraram que tal tecnologia era promissora, destacando-se a seguinte conclusão: a tecnologia de separação ciclônica comprovou ser viável, mesmo para óleos pesados, sendo observadas as seguintes diferenças entre as tecnologias convencionais (separadores gravitacionais):

- Menores pesos e dimensões para uma mesma capacidade;
- Menor capacidade de lidar com instabilidades na alimentação;
- Desempenho semelhante ao separador gravitacional, necessitando de pré-aquecimento para lidar com óleos pesados;
- Em geral, melhor qualidade da água efluente.

Atualmente, essa compactação de equipamentos se tornou ainda mais necessária, devido ao novo cenário de plantas de tratamento submersas, a chamada separação submarina. A separação submarina vem ganhando espaço nos centros de pesquisa e desenvolvimento das empresas de petróleo, pois permite a drenagem de áreas marginais dos reservatórios e de poços distantes das unidades de superfície, minimizando o volume de fluidos a serem transportados para a superfície. Nos equipamentos submersos, menores dimensões significam menores espessuras de parede para resistir à pressão externa, resultando em menor investimento (Raposo, 2008).

Segundo Queiroz e Medronho (2012), a evolução da produção brasileira de petróleo se deu sempre a partir de novas descobertas em campos de petróleo em águas cada vez mais profundas e distantes da costa, o que obriga a procura e desenvolvimento de novas tecnologias compactas que viabilizem o processamento do óleo em grandes volumes, com a redução de peso e espaço dos equipamentos em função das restrições impostas tanto por este tipo de ambiente quanto por fatores logísticos. E neste âmbito, equipamentos

ciclônicos surgem como uma opção expressiva para projetos de separadores compactos.

1.1. Objetivos

O objetivo deste trabalho é estudar a influência dos diâmetros de saída de um hidrociclone (*overflow* e *underflow*) na separação óleo/água com altos teores de óleo como fase dispersa (40%V/V), a fim de otimizar a recuperação de óleo no *overflow*, gerando uma corrente mais limpa de água saindo do equipamento pelo *underflow*, o que minimizaria custos para o posterior tratamento desta corrente. Este estudo foi realizado por meio de um planejamento de experimentos (Delineamento Composto Central Rotacional - DCCR) com o modelo de superfície de resposta, no qual os diâmetros de *underflow* e *overflow* foram variados dentre 20 mm e 30 mm e com o auxílio da Fluidodinâmica Computacional (CFD). Para o hidrociclone ótimo gerado por este estudo, foi construída a curva de eficiência granulométrica deste equipamento e foi analisado o desempenho deste para a separação de duas distribuições de tamanhos presentes na literatura, (Colman e Thew, 1980) e a distribuição grossa utilizada por Alves (2012.).

1.2. Justificativa e Relevância do Tema

Após a revisão bibliográfica, foi constatado que existe pouco conteúdo na literatura sobre a separação de dispersões com altos teores de óleo disperso em água realizada por hidrociclones. Este estudo visa utilizar este equipamento em conjunto com, ou até mesmo em substituição aos grandes separadores gravitacionais. Nos separadores gravitacionais, longos tempos de residência são necessários para obtenção de uma eficiência de separação satisfatória, uma vez que o processo de separação é realizado pelo campo

gravitacional e pela diferença de densidades das fases, o que exige um equipamento com grande volume.

Analisando do ponto de vista do meio ambiente, é importante otimizar esse equipamento de forma que a água oriunda deste tenha o menor teor de óleo possível, facilitando operações posteriores que visam adequar esta água a legislação ambiental vigente, CONAMA 393, 2007, para que possa ser descartada.

2.Revisão bibliográfica

2.1.Hidrociclones

A primeira patente depositada deste tipo de separador ocorreu no final do século XIX (Bretney, 1891), mas seu uso apenas se intensificou após a segunda Guerra Mundial, onde começaram a ser empregados principalmente na indústria de mineração, mas em pouco tempo começou a ser utilizado em diversos outros segmentos da indústria, como petroquímica, geração de energia, têxtil, dentre outros (Castilho e Medronho, 2000).

Os hidrociclones têm sido empregados em um número crescente de aplicações em várias indústrias, devido às suas vantagens. Com uma estrutura simples, de baixo custo e com alta capacidade de separação, os hidrociclones têm se tornado indispensável em projetos que envolvem a engenharia ambiental, petroquímica, de alimentos, bioengenharia, etc. (Chu et al.,2000).

De uma forma geral, os hidrociclones são constituídos de uma parte cilíndrica, onde a carga a ser processada entrará no equipamento através de uma ou mais entradas tangenciais a ela e de uma parte cônica logo abaixo, como mostrado na Figura 2.1. Neste equipamento, o fluido descreve uma trajetória descendente em espiral na direção da saída inferior do equipamento (*underflow*), mas por existir uma restrição a este fluxo, nem toda carga deixa o equipamento por este orifício, gerando um gradiente de pressão reverso que forma um vórtice ascendente no interior do hidrociclone que sairá deste por uma saída superior (*overflow*). O escoamento no interior do hidrociclone gera um forte campo centrífugo, que em conjunto com a diferença de densidades entre a fase dispersa e a fase contínua, promove a separação no equipamento. No caso em que a fase dispersa é mais densa, as partículas constituintes desta precipitam na presença do forte campo centrífugo, migrando para a parede do hidrociclone, saindo concentrada no *underflow* e quando as partículas são mais leves, elas saem concentradas no *overflow*.

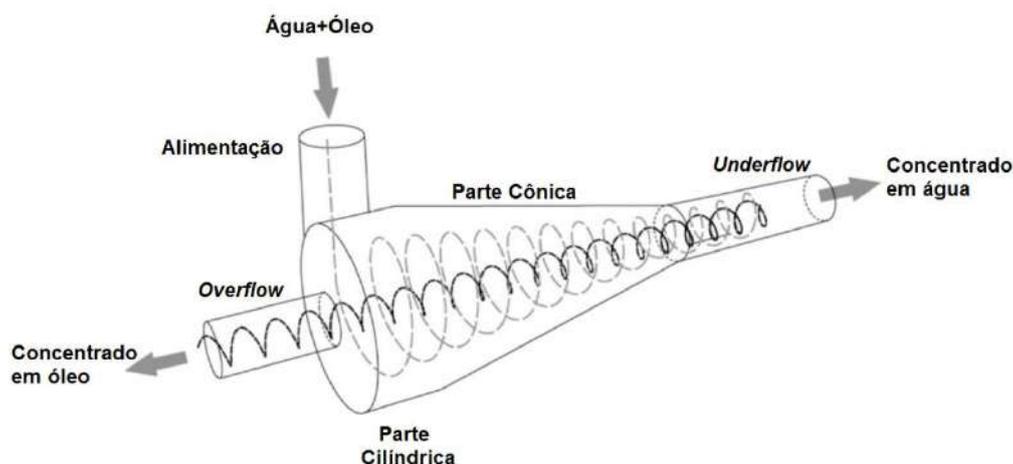


Figura 2.1 - Princípio de funcionamento de um hidrociclone (adaptado de Husveg, 2007)

Os hidrociclones são muito versáteis e como qualquer equipamento ou dispositivo possuem vantagens e desvantagens (Medronho, 1984 e Svarovsky, 1984 *apud* Alves, 2012)

Vantagens:

- São de fácil construção, instalação, manutenção e estrutura de fixação;
- Apresentam baixo custo operacional devido à ausência de partes móveis, sendo necessário apenas o bombeamento do fluido, que em alguns casos nem necessita de bomba dedicada;
- Ocupam pouco espaço quando comparado a outros separadores, sendo ideal para aplicações em plataformas de exploração e de exploração de petróleo;
- Fornecem baixos tempos de residência e com isso, rápidos tempos de resposta em relação a sistemas de controle, ou seja, apresentam baixos tempos mortos;
- Suportam drásticas condições de operação quanto à pressão e vazão;
- Apresentam grande versatilidade quanto às suas aplicações, podendo ser empregados na separação sólido/líquido, sólido/sólido, gás/líquido e líquido/líquido.

Desvantagens:

- Eles são mais susceptíveis a abrasão do que outros equipamentos de separação, tais como sedimentadores, centrífugas e filtros. Devido às altas tensões de cisalhamento;
- Pouca flexibilidade quanto a mudanças de vazão e distribuição na alimentação. Dificultando a utilização de um equipamento projetado para uma condição tenha bom desempenho em outra.

2.2. Utilizações na indústria do petróleo

Na indústria do petróleo são gerados muitos rejeitos, dentre os quais pode-se citar a água produzida que contém óleo disperso e esta apenas pode vir a ser descartada caso respeite a legislação ambiental vigente

Uma das alternativas de tratamento desta água produzida é o emprego de vasos decantadores. Pelo fato desses equipamentos ocuparem muito espaço em uma plataforma de petróleo. Outras alternativas foram surgindo neste cenário, como os hidrociclones para separação líquido-líquido em função de serem compactos e da sua alta eficiência de separação. A primeira patente desse tipo de equipamento foi depositada por Martin Thew e Derek Colman da universidade de Southampton em 1980 (Young et al., 1994). O modelo esquemático deste equipamento é apresentado na Figura 2.1

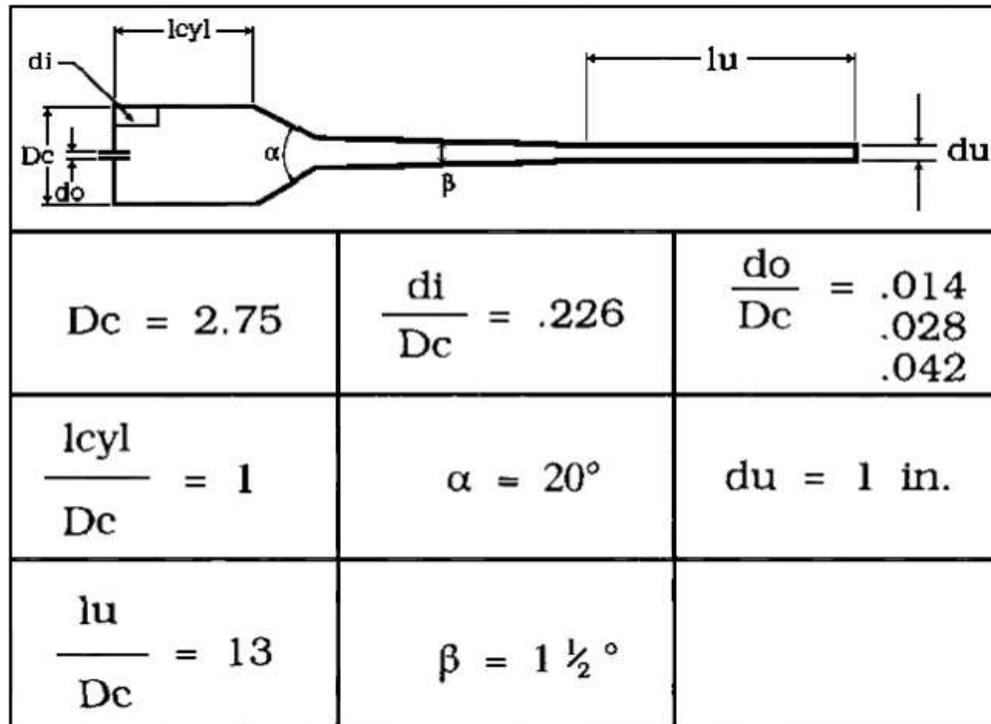


Figura 2.2 - Esquema do hidrociclone de-oiling empregado por Colman-Thew com as respectivas dimensões (Young et al., 1994)

Desde então, diversos projetos e estudos acerca deste equipamento podem ser encontrados na literatura, como por exemplo: otimização de parâmetros geométricos para utilização deste tanto *onshore* quanto *offshore*, análise de parâmetros operacionais e sua influência na eficiência de separação, análise de desempenho e projeto de hidrociclones utilizando alimentações contendo diversos teores de óleo e água, investigação dos perfis de velocidades tangenciais e axiais nestes equipamentos, etc.

Estes estudos são conduzidos tanto de maneira experimental, utilizando tecnologias como: velocimetria por imagem de partícula (PIV – *Particle Image Velocimeter*), Anemometria Laser-Doppler (LDA - *Laser Doppler Anemometry*), por exemplo e também através de simulações computacionais utilizando CFD. A fluidodinâmica computacional que vêm ganhando bastante espaço neste cenário, tanto em função da evolução rápida e contínua da capacidade computacional quanto pela evolução de modelos numéricos.

2.3. Separação Líquido-Líquido em Hidrociclones

2.3.1. Quebra e Coalescência

Os hidrociclones para separação líquido-líquido possuem algumas características diferentes em relação aos utilizados para separação sólido-líquido, pois eles estão separando gotas, que podem quebrar ou coalescer e não partículas sólidas onde estes efeitos não são observados.

Os efeitos intrínsecos ao escoamento no interior desses equipamentos podem gerar forças, como a de cisalhamento, que podem alterar a distribuição de tamanho de gotas dentro do hidrociclone. Este efeito pode ser notado sobre a eficiência de separação, onde um aumento na vazão de alimentação, em um primeiro momento, apresenta efeitos benéficos sobre a eficiência de separação em função do aumento da intensidade do campo centrífugo; continuando-se a aumentar a vazão, esta eficiência se mantém constante; porém, a partir de uma determinada vazão, os efeitos de cisalhamento quebram as gotas, diminuindo a eficiência do equipamento. Este tipo de comportamento é apresentado em diversos trabalhos na literatura, como, por exemplo, em Meldrum (1988) e Bennett & Willians (2004). A Figura 2.3 mostra este efeito

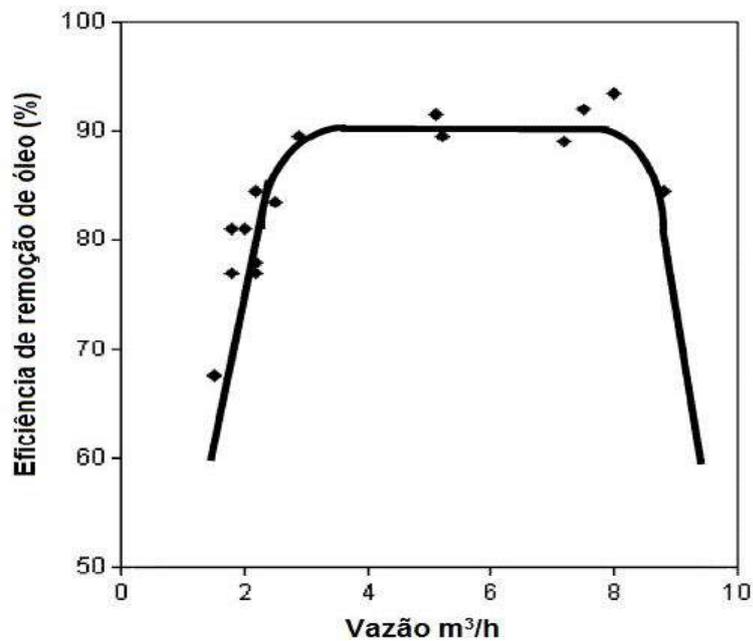


Figura 2.3 - Dados experimentais da influência da vazão sobre a eficiência de remoção. Adaptado de Bennett & Willians (2004)

A quebra e a coalescência de gotas são dois efeitos que contribuem de forma apreciável na eficiência de separação dos hidrociclones, no caso, a quebra irá diminuir o tamanho das partículas e conseqüentemente diminuir a eficiência de separação do equipamento. Em contrapartida, a coalescência tem um efeito benéfico para a separação no hidrociclone, pois aumenta o tamanho destas gotas o que aumentará a eficiência de separação.

2.3.2. Eficiência de Separação

2.3.2.1. Distribuição de tamanho de partículas

A distribuição de tamanho das partículas presentes na corrente de alimentação de um hidrociclone é usualmente representada por uma distribuição cumulativa y , que representa a fração de partículas menor que dado diâmetro. Nos casos estudados, foi utilizada a correlação de Rosin-Rammler (1933), também conhecida por RRB, descrito pela equação 1:

$$y = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d}{k}\right)^m\right] \quad (1)$$

Onde,

y = Distribuição cumulativa menor que dado tamanho

d = Diâmetro da partícula (ou gota, no caso em questão).

m e k = Parâmetros do modelo RRB

Os parâmetros da equação supracitada são obtidos através da linearização da equação 1, obtendo desta forma, a equação 2.

$$\ln(-\ln(1 - y)) = m \ln(d) - m \ln(k) \quad (2)$$

2.3.2.2. Razão de Fluido

Os hidrociclones são equipamentos que possuem duas saídas distintas: o *overflow* e o *underflow*. Como a fase contínua é mais densa que a fase dispersa neste caso, o óleo sairá pelo *overflow*, porém parte da água, inevitavelmente, também irá sair por este orifício do equipamento. Podemos definir então a razão de fluido como a razão entre a quantidade de água que sai pelo *overflow* pela quantidade de água presente na alimentação, e esta variável é definida matematicamente pela equação 3.

$$R_f = \frac{W_{\text{Água O}}}{W_{\text{Água Al}}} \quad (3)$$

Onde,

R_f = Razão de Fluido

$W_{\text{Água O}}$ = Vazão mássica de água no *overflow*

$W_{\text{Água Al}}$ = Vazão mássica de água na alimentação

2.3.2.3. Eficiência Granulométrica

A eficiência granulométrica está associada à capacidade de separar gotículas de óleo de um determinado tamanho presentes na alimentação e recuperá-las no *overflow*. Ela pode ser expressa pela equação 4

$$G(d) = \frac{W(d)_{\acute{o}leo O}}{W(d)_{\acute{o}leo Al}} \quad (4)$$

Onde,

$G(d)$ = Eficiência granulométrica para um determinado diâmetro de partícula

$W(d)_{\acute{o}leo O}$ = Vazão mássica de óleo para um determinado diâmetro de partícula no *overflow*

$W(d)_{\acute{o}leo Al}$ = Vazão mássica de óleo para um determinado diâmetro de partícula na alimentação

A Figura 2.4 apresenta um exemplo de curva de eficiência granulométrica com $R_f = 0,35$.

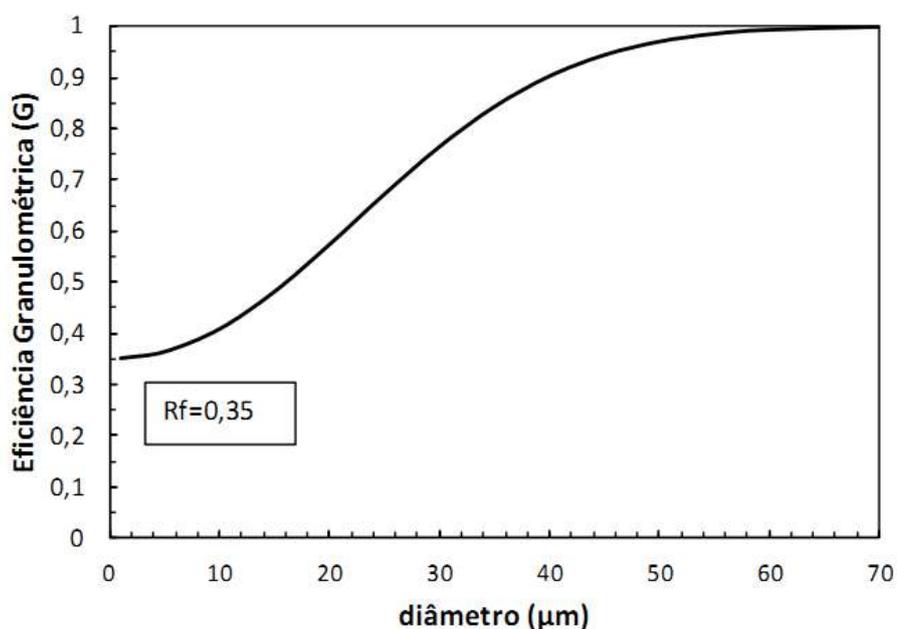


Figura 2.4 - Exemplo de curva de eficiência granulométrica, com $R_f = 0,35$ (Alves, 2012)

2.3.2.4. Eficiência Granulométrica Reduzida

A eficiência granulométrica reduzida leva em consideração apenas a quantidade de óleo que é efetivamente removida da corrente de alimentação pelo hidrociclone, no caso, excluindo a quantidade que é removida pelo efeito de divisão de correntes no equipamento. Esta variável é representada pela equação 5.

$$G' = \frac{G - R_f}{1 - R_f} \quad (5)$$

Onde,

G' = Eficiência granulométrica reduzida

G = Eficiência Granulométrica

R_f = Razão de fluido

A Figura 2.5 apresenta uma curva de eficiência granulométrica reduzida (G'). Neste gráfico é possível reparar que, como apenas o efeito de separação gerado pelo hidrociclone é levado em consideração, este gráfico parte da origem, e pode-se ver marcada uma nova variável denominada $d'50$ que representa o diâmetro de partícula que é separada com 50% de eficiência granulométrica reduzida, também chamada de diâmetro de corte reduzido.

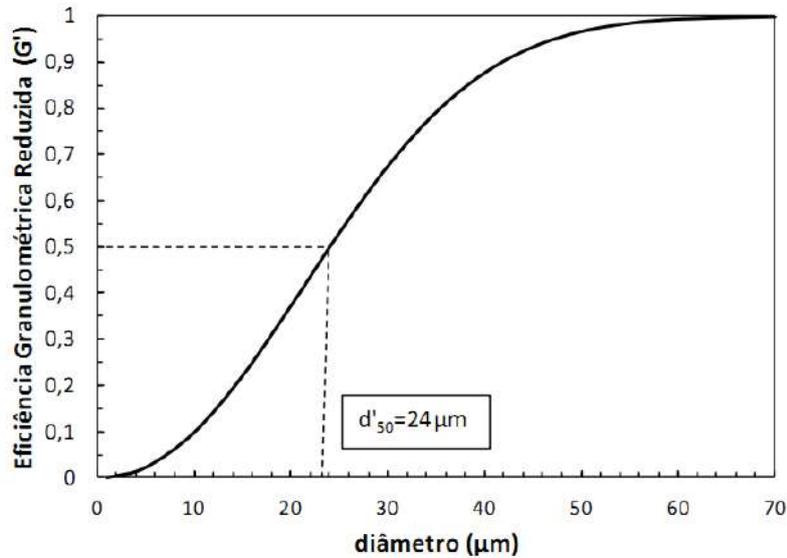


Figura 2.5 - Exemplo de curva de eficiência granulométrica reduzida e do diâmetro de corte reduzido d'50 (Alves, 2012)

Plitt (1971) propôs a equação 6 para descrever o comportamento de G' em função dos diâmetros de partícula e do diâmetro de corte:

$$G' = 1 - \exp \left[-0,639 \left(\frac{d}{d'_{50}} \right)^n \right] \quad (6)$$

Onde,

G' = Eficiência granulométrica reduzida

d'_{50} = Diâmetro de corte reduzido

n = Parâmetro do modelo de eficiência granulométrica reduzida

O parâmetro n pode ser facilmente obtido através da linearização da equação anterior, originando a equação 7

$$\ln(-\ln(1 - G')) = \ln(0,693) + n \ln \left(\frac{d}{d'_{50}} \right) \quad (7)$$

2.3.2.5. Eficiência Total

A eficiência total do equipamento está relacionada à capacidade de separar o óleo da corrente de alimentação e recuperá-lo, no caso em questão, no *overflow*. Esta pode ser definida segundo a equação 8.

$$E_T = \frac{W_{\text{Óleo } O}}{W_{\text{Óleo } Al}} \quad (8)$$

Onde,

E_T = Eficiência Total

$W_{\text{Óleo } O}$ = Vazão mássica de óleo no *overflow*

$W_{\text{Óleo } Al}$ = Vazão mássica de óleo na alimentação

2.3.2.6. Eficiência Total Reduzida

A eficiência total reduzida do equipamento desconsidera o efeito de divisão de correntes intrínseco à operação do hidrociclone, levando apenas em consideração a eficiência de separação real do equipamento, está é descrita pela equação 9.

$$E'_T = \frac{E_T - R_f}{1 - R_f} \quad (9)$$

Onde,

E'_T = Eficiência Total Reduzida

E_T = Eficiência Total

R_f = Razão de fluido

A eficiência total reduzida também pode ser calculada pela integração de G' em y , resultando na equação 10:

$$E'_T = \int_0^1 G' dy \quad (10)$$

A equação de Plitt (1971) exprime G' como função de d e a equação de Rosin-Rammler (1933) representa y como função de d , através de manipulações algébricas das equações 1 e 6, é possível representar a equação 10 como a equação 11 a baixo:

$$E'_T = \int_0^1 \left\{ 1 - \exp \left[-0,693 \left(\frac{k \left(-\ln (1-y)^{\frac{1}{m}} \right)}{d'_{50}} \right)^n \right] \right\} dy \quad (11)$$

2.3.3. Perfis de velocidade nos hidrociclones

Os perfis de velocidades no interior dos hidrociclones são complexos devido às características intrínsecas do escoamento no interior deste equipamento. O vetor velocidade dentro de um hidrociclone pode ser decomposto em três componentes descritas na Figura 2.6:

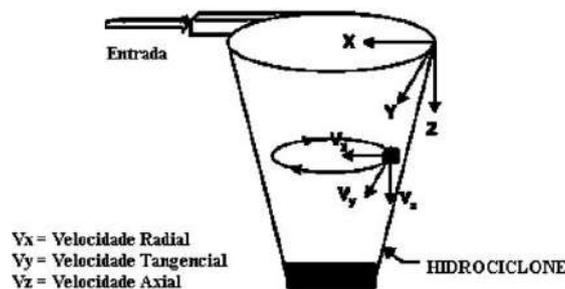


Figura 2.6- Componentes da velocidade global do hidrociclone (Coelho, 2011)

2.3.3.1. Velocidade tangencial

A velocidade tangencial aumenta da parede em direção ao centro do hidrociclone, em uma relação dada pela equação 12, sendo C um valor constante. A velocidade tangencial então passa por um máximo, decrescendo na direção do núcleo central deste equipamento. O perfil de velocidade tangencial é razoavelmente independente da posição vertical, mas sofre os efeitos do núcleo gasoso, parede e do *vortex finder* (Svarovsky, 1990). A

velocidade tangencial é a principal componente do vetor velocidade responsável pela queda total de pressão neste tipo de equipamento.

$$Vr^n = C \quad (0,6 \leq n \leq 0,9) \quad (12)$$

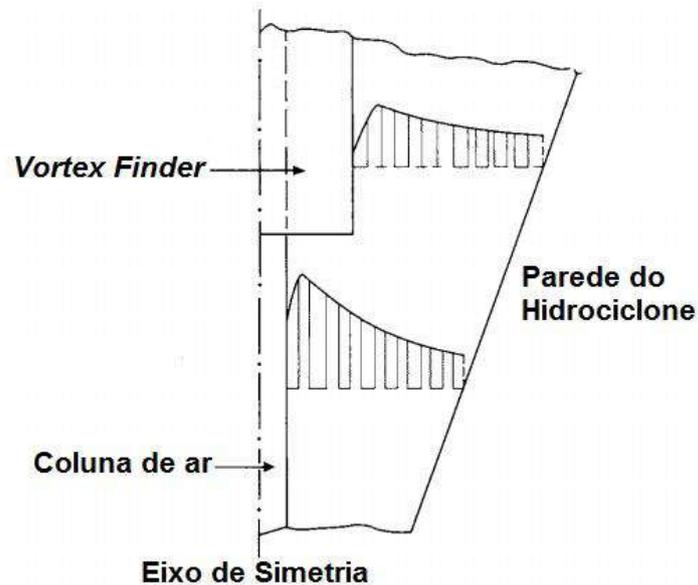


Figura 2.7 - Perfil típico de velocidade tangencial em um hidrociclone (Svarovsky, 1990)

2.3.3.2. Velocidade Axial

Há uma região bem definida com velocidade axial nula (*Locus of Zero Vertical Velocity* - LZVV) que se situa ao longo do perfil do hidrociclone. Tanto na porção cônica quanto na cilíndrica tem-se um fluxo descendente próximo a parede. Já na região central o fluxo é ascendente, então necessariamente haverá uma região onde a velocidade axial é zero. Ao redor do *vortex finder* um forte fluxo descendente é observado. (Svarovsky, 1990).

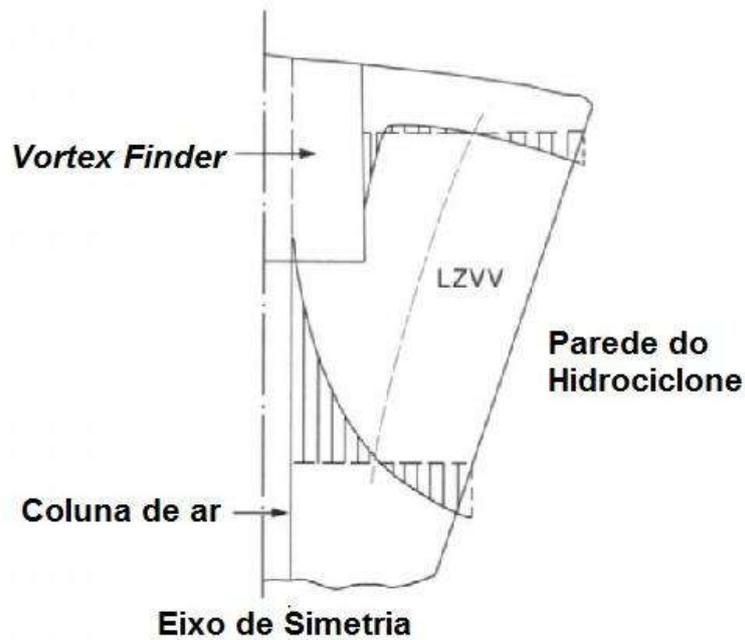


Figura 2.8 - Perfil típico de velocidade axial em um hidrociclone (Svarovsky, 1990)

2.3.3.3. Velocidade Radial

Segundo Svarovsky (1990), a componente radial do vetor velocidade é normalmente muito menor do que as outras duas supracitadas e, dessa forma, é muito difícil de ser medida com acurácia. Como pode ser visto na Figura 2.9 a velocidade radial diminui em direção ao interior do hidrociclone. A posição radial onde o módulo dessa componente é nula não é conhecido.

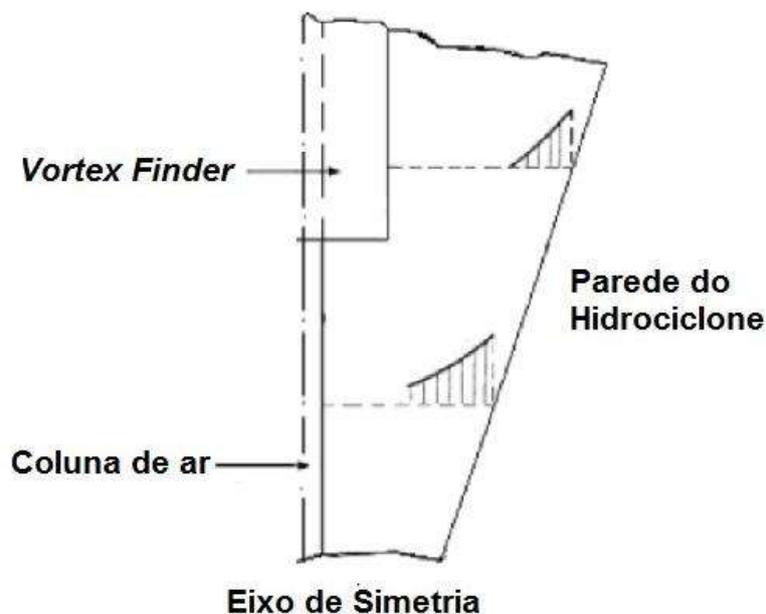


Figura 2.9 - Perfil típico de velocidade radial em um hidrociclone (Svarovsky, 1990)

2.4. Utilização de simulação numérica em projeto e análise de desempenho de Hidrociclones

Muitos trabalhos foram observados na literatura em relação a hidrociclones na separação óleo/água, como por exemplo: estudos experimentais para otimização geométrica (Young et al, 1994), estudo de sistemas de controle de processo de separação óleo/água envolvendo baterias de hidrociclones (Filgueiras, 2005), desempenho destes equipamentos com fluxos variáveis (Husveg, 2010), caracterização experimental do escoamento no interior de hidrociclones (Marins, 2010), porém como o foco do trabalho está na resolução deste problema utilizando a Fluidodinâmica Computacional, é válido salientar alguns dos principais trabalhos pesquisados ao longo do desenvolvimento deste projeto.

Leahy-Dios e Medronho (2003) investigaram os efeitos da variação do ângulo da seção cônica de um hidrociclone de Bradley (18° , 9° , 6°), dos modelos de turbulência (RNG $k-\epsilon$ e *Reynolds Stress Model*), do número de

fases (óleo/água e ar/óleo/água) e do diâmetro de gotas de óleo na alimentação (2,08 μm a 100 μm) para o tratamento de uma carga formada por óleo e água com 1% em volume de óleo. Os dados numéricos obtidos foram comparados com dados experimentais disponíveis na literatura. Com este estudo, concluiu-se que a inserção de uma nova fase, no caso o ar, para a formação do núcleo central gasoso (*air core*) produziu resultados semelhantes às simulações bifásicas água/óleo. Os modelos de turbulência deram resultados semelhantes entre si. O ângulo que apresentou a menor eficiência granulométrica foi o de 18° e os outros dois ângulos apresentaram eficiências semelhantes. As simulações foram conduzidas no CFX 5.5.1.

Rego e Medronho (2008) validaram um hidrociclone cilíndrico constituinte de uma planta piloto de flotação centrífuga no CENPES, obtendo erros menores que 1%. Após a validação do experimento, a geometria deste foi otimizada variando-se os seguintes parâmetros: altura do *vortex finder*, altura do hidrociclone e formato do duto de alimentação. Posteriormente, foi realizado um *scale-up* deste equipamento, e este foi simulado para a previsão do seu desempenho. A carga a ser tratada possuía a seguinte fração volumétrica: 0,443667 de água, 0,556330 de flocos aerados e 0,000004 de óleo. Como resultado do estudo, foi constatado que a modelagem matemática foi satisfatória, pois em relação aos dados experimentais esta apresentou um erro menor do que 1% e que o formato do duto de alimentação não interferiu de forma significativa na eficiência do equipamento, sendo sugerida desta forma a utilização de um duto reto de seção circular para a alimentação tangencial. Para as simulações numéricas foi utilizado o pacote computacional da Ansys versão 10, e estas foram conduzidas no CFX. A malha utilizada foi tetraédrica, a modelagem multifásica utilizada foi Euleriana-Euleriana, o regime temporal adotado foi o estacionário e o modelo de turbulência adotado foi o dos Tensores de Reynolds (SSG).

Freitas, Paixão e Medronho (2009) utilizaram um planejamento fatorial de experimentos, onde foi analisada a influência das seguintes variáveis na eficiência de separação de águas oleosas (99% de água): diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone, diâmetro do *underflow* e *overflow*, altura do duto de alimentação, comprimento do *vortex finder* e comprimento da parte cilíndrica do

hidrociclone. Para avaliar todas estas variáveis com o planejamento fatorial, foram realizados 19 experimentos, os quais 3 foram pontos centrais, mesmo se tratando de uma simulação computacional. O estudo foi conduzido com ferramentas de fluidodinâmica computacional, onde foram utilizados o pacote computacional da Ansys versão 11, e as simulações foram conduzidas com o CFX. O modelo multifásico utilizado foi o euleriano-euleriano, e foi utilizado em um primeiro momento o modelo de turbulência $k-\epsilon$, para tomar estes valores simulados como estimativa inicial para o modelo dos Tensores de Reynolds (SSG). Como principal resultado, conclui-se que dentre todas as variáveis estudadas com o planejamento de experimentos, as que mais afetam a eficiência total de separação são os diâmetros de *underflow* e *overflow*.

Coelho, Medronho e Alves (2012) avaliaram, por intermédio da fluidodinâmica computacional, os perfis de velocidade tangencial e a eficiência de separação de um hidrociclone projetado para separação de óleo-água, com baixos teores de óleo, baseado nos resultados experimentais do hidrociclone utilizado no trabalho de Marins et al.(2010). Os perfis de velocidade tangencial e pressão simulados foram condizentes com os resultados experimentais. Foram utilizadas duas abordagens multifásicas nesse estudo: a euleriana-euleriana e euleriana-lagrangeana, com 3 distribuições de tamanho de gotas de óleo com medianas de $21\mu\text{m}$, $45\mu\text{m}$ e $130\mu\text{m}$. As eficiências obtidas para as três distribuições foram de 32,3%, 80,4% e 96% para o modelo lagrangeano de 35,1%, 80,3% e 96% para o euleriano. Os estudos foram conduzidos com o pacote computacional Ansys 12.1.

Alves e Medronho (2012) otimizaram as proporções geométricas de um hidrociclone afim da utilização deste equipamento para o tratamento de uma carga de água oleosa gerada nas operações de uma refinaria. O estudo foi conduzido com o auxílio da fluidodinâmica computacional e com a utilização e um planejamento de experimentos do tipo DCCR. Os autores validaram sua modelagem matemática do problema físico com a simulação de dois trabalhos experimentais presentes na literatura, Marins et al (2010) e Zhou et al (2010). Eles obtiveram bons resultados para os perfis de velocidade tangencial e para a queda de pressão nesses equipamentos. Malhas hexaédricas foram utilizadas para a resolução do problema, que foi feita no programa Fluent 13

utilizando a abordagem multifásica euleriana-euleriana e euleriana-lagrangeana, sendo que a primeira apresentou melhores resultados. Com o DCCR, foi analisada a influência da variação dos diâmetros de *underflow* e *overflow* nas seguintes variáveis: eficiência granulométrica, eficiência granulométrica reduzida, queda de pressão e razão de fluido. Para o hidrociclone otimizado, a concentração de óleo na saída do equipamento era de 48 ppm para uma alimentação com 5000 ppm e ainda foi testado um arranjo em série de dois equipamentos, que levaram a concentração de saída para 43 ppm, totalizando uma eficiência de separação do óleo de 99,5%.

Queiroz e Medronho (2012) estudaram um hidrociclone para desaguar óleo (*dewatering*) nas condições de produção do Brasil. Este estudo foi conduzido com o auxílio da fluidodinâmica computacional, utilizando o pacote computacional Ansys 13.0, onde foram empregados o ICEM CFD para confecção das malhas e o *solver* utilizado foi o Fluent. A abordagem multifásica utilizada foi a euleriana-euleriana, o regime temporal adotado foi o estacionário, o modelo de turbulência adotado foi o dos Tensores de Reynolds (SSG) e foram utilizadas malhas hexaédricas. Diversas condições de alimentação foram analisadas, como: vazão de entrada quantidade de água dispersa no óleo (75%, 40%, 30%, 20%), tamanho de gotas (300 μ m, 100 μ m, 10 μ m), propriedades físicas dos constituintes da carga, dentre outros. Os autores concluíram que há viabilidade para a utilização de uma bateria destes equipamentos durante a vida útil de um poço, embora mais estudos sejam necessários para tal e que a utilização de equipamentos com duas entradas pode ser aparentemente vantajosa, pois reduz as oscilações do fluxo ao longo do escoamento, principalmente na região central, o que pode acarretar em uma menor quebra de gotas e também beneficiar a coalescência de partículas.

3. Modelos matemáticos

Os modelos matemáticos são uma representação simplificada de algum fenômeno ocorrente na natureza, que podem ser descritos por meio de equações matemáticas teóricas ou empíricas. A modelagem utilizada para a resolução do problema proposto será descrita a seguir.

3.1. Equação da Continuidade

A equação da continuidade, segundo Bird et al (2002), pode ser deduzida escrevendo um balanço de massa em um volume $\Delta x \Delta y \Delta z$, fixo no espaço, no qual o fluido escoou. Esta abordagem pode ser utilizada apenas se a hipótese do contínuo for levada em consideração.

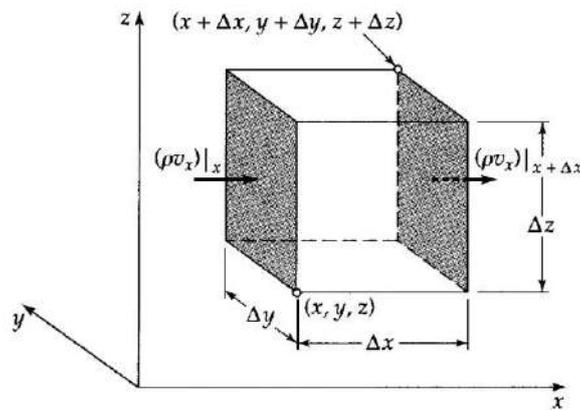


Figura 3.1- Volume de controle arbitrário no plano cartesiano (Bird et al., 2002)

Através do balanço no elemento, considerando que não há geração nem consumo de massa no interior do volume, e também utilizando outros artifícios matemáticos, obtemos a equação 13, que também pode ser escrita na forma vetorial (equação 14)

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v} = 0 \quad (14)$$

3.2. Equação do Movimento

De maneira análoga ao balanço de massa realizado no volume $\Delta x \Delta y \Delta z$, a equação do movimento é deduzida através de uma balanço de forças que atuam neste volume de controle e pode ser expressa pela equação 15, no caso em que o escoamento é incompressível.

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla P - \nabla \vec{\tau} + \rho \vec{g} \quad (15)$$

onde:

$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt}$ = forças de inércia por unidade de volume

$-\nabla P$ = forças de pressão por unidade de volume

$\nabla \vec{\tau}$ = forças viscosas por unidade de volume

$\rho \vec{g}$ = forças de campo por unidade de volume.

3.3. Abordagem Euleriana-Lagrangeana

Nesta abordagem um único conjunto de equações de conservação é resolvido para a fase contínua, e a fase dispersa é representada por partículas pontuais que são acompanhadas ao longo de suas trajetórias, no tempo e no espaço. Segundo Hauke (2008), matematicamente, esta abordagem fornece a posição de cada partícula (x) de fluido a todo instante de tempo. Desde que o

fluido contenha um número finito de partículas, cada uma destas é escolhida especificando sua posição (x_0) no tempo (t) igual a zero, como descrito na equação 16

$$x = x(x_0, t) \quad (16)$$

Nesta abordagem, uma consideração fundamental feita é que a fase dispersa deve ocupar uma baixa concentração volumétrica. A trajetória das partículas é calculada individualmente em determinado intervalo especificado. Isto torna esta abordagem apropriada para a modelagem de *sprays*, por exemplo, e inapropriada para modelagem de mistura de líquidos, leitos fluidizados, ou qualquer outro tipo de aplicação na qual a fração volumétrica da fase secundária não possa ser negligenciada (ANSYS, Fluent Theory Guide, 2010)

3.4. Abordagem Euleriana-Euleriana

Segundo Hauke (2008), na representação euleriana, o domínio do fluido não é acompanhado conforme ele se deforma, na verdade o foco é em um lugar fixo no domínio espacial por onde o fluido escoar. Desta forma é previsto apenas as propriedades volumétricas médias do campo.

Esta formulação consiste em fornecer o campo de velocidade (v) em cada ponto do espaço (x) e o instante de tempo, como descrito pela equação 17.

$$v = v(x, t) \quad (17)$$

Segundo Coelho (2011), esse modelo vem sendo usado em muitas simulações, como por exemplo, em aplicações de leito fluidizado, onde se adequam especialmente bem. No entanto, modelos eulerianos não são capazes de tratar diversos tamanhos de partículas diretamente em uma única fase, mas sim considerando cada classe de tamanho como uma fase distinta. Isso caracteriza uma séria desvantagem em problemas práticos, uma vez que

várias fases seriam necessárias para representar uma ampla faixa de tamanhos de partículas, aumentando significativamente o custo computacional.

4.Fluidodinâmica Computacional

4.1.Introdução

Segundo Versteeg e Malalasekera (1995), a Fluidodinâmica Computacional é a análise de sistemas envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados, como por exemplo, reações químicas por meio de simulações computacionais. Esta técnica é muito poderosa e possui uma faixa extensa de utilização, como exemplo:

- Aerodinâmica de aeronaves e de veículos: sustentação e arraste;
- Hidrodinâmica de navios;
- Combustão em turbinas;
- Escoamento dentro de equipamentos;
- Análise de resfriamento de equipamentos, incluindo microcircuitos;
- Processos de mistura e separação;
- Processos de dispersão de gases;
- Escoamentos em rios e oceanos;
- Previsão do tempo.

Esta técnica vem sendo utilizada desde os anos 60 pela indústria aeroespacial e como a capacidade computacional vem crescendo de uma maneira formidável, as simulações utilizando CFD vêm ganhando um espaço considerável, tornando-se imprescindível na área de pesquisa e projetos em geral. A utilização deste tipo de ferramenta torna-se muito atrativa para resolver problemas onde não existem dados experimentais ou estes são praticamente intangíveis como, por exemplo, em explosões, dispersão de materiais tóxicos, escoamentos reativos, dentre outros.

Segundo Alves (2012), projetos envolvendo o uso de solução CFD, em momento algum retiram a importância da análise teórica e muito menos da

necessidade de realização de procedimentos experimentais. A análise teórica é importante para saber os modelos que serão adotados, assim como, as hipóteses simplificadoras utilizadas para a resolução do problema numérico. Uma solução analítica simplificada pode ser empregada como condição inicial para a resolução de problemas mais complexos. Já os resultados experimentais servem tanto para avaliar a adequação dos resultados aos modelos numéricos (validação física), quanto para a elaboração de novos modelos. Logo, embora as simulações numéricas apresentem constantes aperfeiçoamentos estas não substituem os estudos experimentais.

4.2. Etapas de uma simulação utilizando CFD

Para efetuar uma simulação utilizando CFD os seguintes passos devem ser realizados:

- Criação da geometria: com o auxílio de alguma ferramenta de computação gráfica, deve-se definir o domínio físico onde serão feitas as análises desejadas.
- Criação da Malha: a discretização do domínio deve ser feita para efetuar-se a resolução numérica das equações pertinentes para a solução do problema em questão.
- Modelagem do problema: deve-se escolher os modelos que melhor descrevem a situação a ser estudada, afim da obtenção de uma resposta satisfatória.
- Resolução do problema: agora a resolução do problema é iniciada, de acordo com os *settings* selecionados na etapa anterior. Nesta etapa acompanha-se a evolução da resposta através dos resíduos, que são intrínsecos a qualquer resolução numérica de equações, e analisamos a convergência do problema de acordo com parâmetros pré-definidos, tais como: fechamento do balanço de massa e energia, imposição de resíduos mínimos, dentre outros.

- Pós-processamento: nesta etapa os resultados são analisados, geralmente com o auxílio de algum software, onde podemos obter várias informações para analisar criticamente os resultados obtidos.

A Figura 4.1 representa de maneira esquemática as etapas de resolução de um problema utilizando CFD.

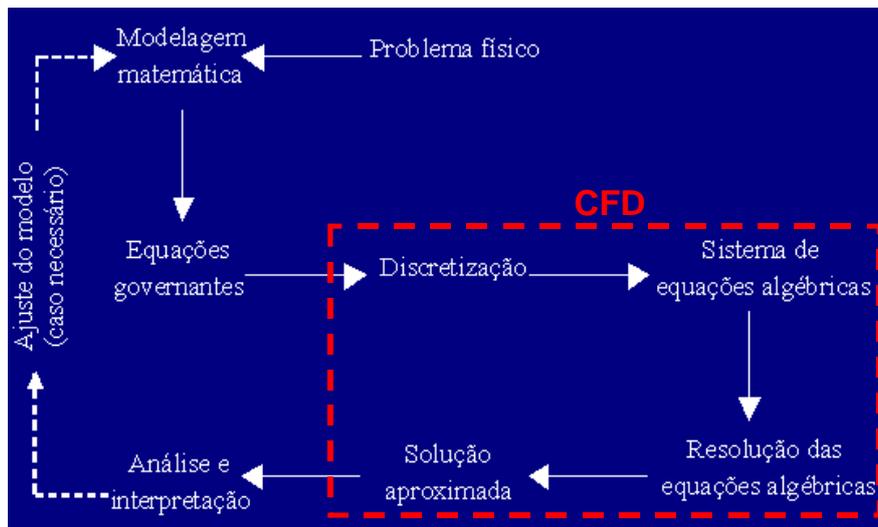


Figura 4.1 - Etapas para obtenção de Solução Numérica para um problema de mecânica dos fluidos (Rego, 2008).

4.2.1. Malha

A geração adequada da malha é de suma importância para a obtenção de resultados satisfatórios nas simulações utilizando CFD, é nesta etapa que ocorre a divisão do domínio em uma quantidade finita de subdomínios, onde as equações que descrevem os fenômenos físicos serão resolvidas em cada um desses novos volumes.

No processo de cálculo, os resultados obtidos em cada célula servem como condição de contorno para os elementos vizinhos, então muito cuidado é exigido na discretização do domínio, sempre se deve atentar para as regiões onde grandes gradientes são observados (gradiente de velocidade próximo à parede de dutos, por exemplo) e nessas regiões o refinamento é imprescindível para a obtenção de respostas mais acuradas.

As malhas podem ser de dois tipos: estruturadas ou não estruturadas e, segundo Nascimento (2008), podem ser descritas da seguinte maneira:

- Malhas estruturadas: as malhas estruturadas são geradas pela subdivisão dos eixos coordenados em pequenos elementos unidimensionais, cujo produto cartesiano gera elementos bidimensionais e tridimensionais que são, geralmente, quadriláteros e hexaédricos, respectivamente. Nessas malhas, cada elemento tem sempre o mesmo número de elementos vizinhos, a não ser quando o mesmo pertence ao contorno.
- Malhas não estruturadas: as malhas não-estruturadas são produzidas de forma automatizada, contendo elementos que podem ter diversas formas, usualmente, usam-se triângulos no caso bidimensional. No caso tridimensional, os tetraedros são os mais utilizados. Essas malhas conseguem representar mais facilmente as geometrias mais complexas, devido à maior flexibilidade de forma que seus elementos podem assumir.

A Figura 4.2 - mostra uma malha estruturada a esquerda e uma malha não estruturada a direita

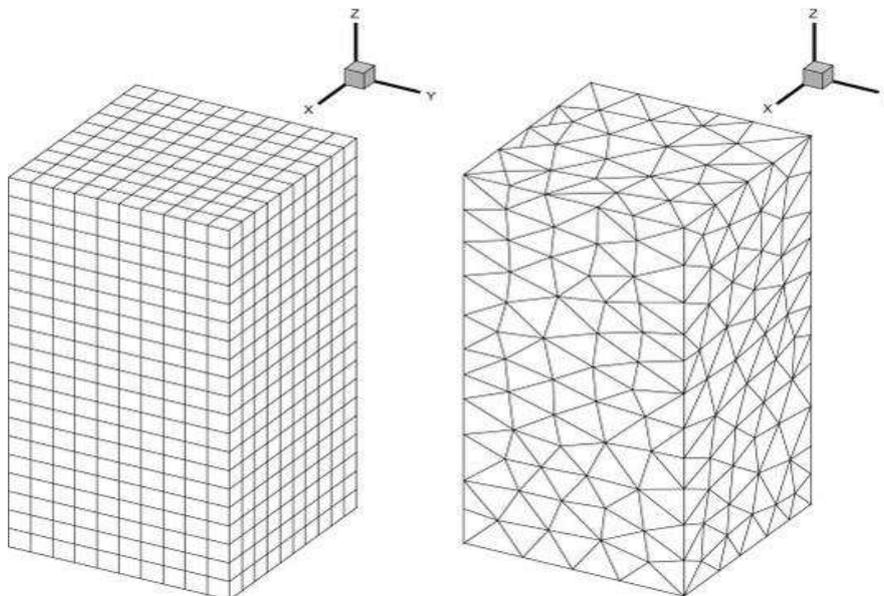


Figura 4.2- Malhas tridimensionais, estruturada a direita e não estruturada esquerda (Capdevila et al, 2010)

4.2.1.1. Teste de malha

Após a etapa de confecção da malha é importante realizar um teste de malha, para avaliar o impacto do refino desta sobre os resultados obtidos. Este estudo é realizado simulando o mesmo caso com malhas cada vez mais refinadas, até que haja convergência de resultados entre eles. Isto é importante tanto para avaliar se a malha utilizada está subdimensionada ou superdimensionada, desta forma é possível garantir a validade das respostas nesse quesito e diminuir o tempo de simulação computacional.

4.3. Turbulência

Grande parte dos escoamentos tratados e de interesse na engenharia são turbulentos, como por exemplo: jatos, escoamento no interior de equipamentos e dutos, escoamentos externos, combustão, etc. Neste regime, o comportamento da velocidade e de todas as outras propriedades do escoamento são caóticas e randômicas (Versteeg e Malalasekera, 1995).

O número de Reynolds (Re) é dado pela razão entre as forças de inércia e forças viscosas em um escoamento. Quando as forças de inércia tornam-se significativamente maiores que as forças viscosas ($Re > 2300$ em tubos, por exemplo. Fox et al., 2011), o escoamento é dito turbulento. A Figura 4.3 mostra um gráfico de velocidade contra o tempo de um escoamento turbulento medido em um ponto, sendo V a média temporal da velocidade do escoamento naquele ponto e $v'(t)$ a velocidade flutuante. Nesta figura é perceptível a característica randômica das flutuações de velocidade neste tipo de escoamento.

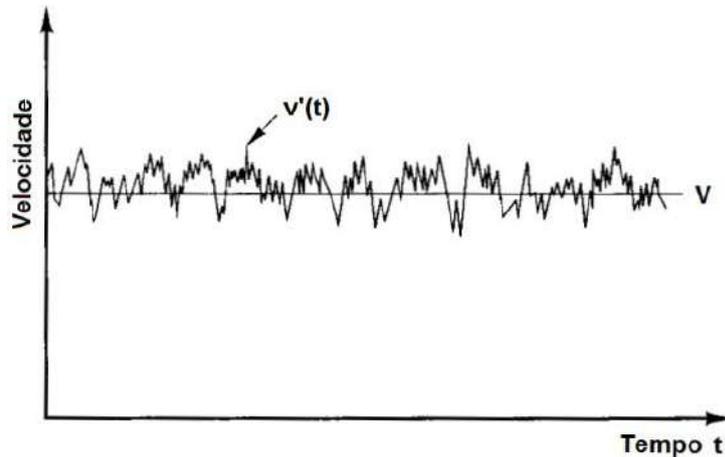


Figura 4.3- Velocidade instantânea v , velocidade média V e flutuação v' (Adaptado de Bird, 2002)

Segundo Hinze (1959) *apud* Leahy-Dios (2003), algumas características importantes do escoamento turbulento são:

- Número de Reynolds elevados;
- Alto grau de vorticidade, formação e dissipação constante de turbilhões;
- A energia de dissipação dos vórtices é convertida irreversivelmente em energia interna do fluido;
- As flutuações turbulentas ocorrem em todas as direções do escoamento, na maioria das vezes de forma anisotrópica;
- As flutuações turbulentas são aparentemente randômicas, sem que haja um perfil determinável das propriedades ao longo do escoamento.

Segundo Freitas (2009), a maioria dos modelos de turbulência disponíveis e empregados para solução dos problemas de engenharia pode ser classificada como:

- Modelos algébricos;
- Modelos diferenciais de duas equações;
- Modelos diferenciais de quatro equações (k - ϵ de múltipla escala);
- Modelos que não utilizam o conceito de viscosidade turbulenta (Modelos dos Tensores de Reynolds).

Existem diversos modelos de turbulência na literatura como, por exemplo: k- ϵ , k- ω , dentre outros. Porém, como averiguado na literatura, o modelo mais conveniente para ser utilizado na simulação numérica de hidrociclones é o Modelo dos Tensores de Reynolds - SSG, que será abordado a seguir.

4.3.1. Modelo dos Tensores de Reynolds

Aplicando o conceito de média temporal na equação de Navier-Stokes (RANS - *Reynolds Averaged Navier-Stokes*) um novo termo surge nesta equação, definida como tensor de Reynolds. Para o fechamento da turbulência, é necessária a modelagem de todos os componentes do tensor de Reynolds, gerando um modelo robusto, porém com a inconveniência de requerer um maior custo computacional. Existem inúmeros modelos com esta abordagem, geralmente estes se diferem pelos valores de suas constantes. O modelo SSG (Speziale-Sarkar-Gatski), segundo Schuenck *et al.* (2006) *apud* Freitas (2009), é recomendado para calcular o escoamento em ciclones e hidrociclones. Esse modelo é capaz de representar mais adequadamente o fluxo reverso que ocorre no núcleo central, capturando as formas dos turbilhões presentes devido ao fato do escoamento apresentar turbulência anisotrópica. As equações diferenciais para o Tensor de Reynolds podem ser conforme as equações 18,19,20,21,22,23,24 e 25 (Queiroz, 2012).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(U_k \rho \overline{u_i u_j}) = P_{ij} + \Phi_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \frac{2}{3} C_s \rho \frac{k^2}{\epsilon} \right) + \frac{\partial \rho \overline{u_i u_j}}{\partial x_k} \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} \epsilon \cdot \rho \quad (18)$$

Onde P_{ij} representa a produção das tensões turbulentas pelo gradiente das velocidades médias, Φ_{ij} é a correlação pressão-deformação e C são as constantes do modelo SSG, descrito pela Tabela 4.1.

$$P_{ij} = -\rho u_i u_k \frac{\partial U_j}{\partial x_k} + u_j u_k \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \quad (19)$$

e

$$\Phi_{ij} = \Phi_{ij1} + \Phi_{ij2} \quad (20)$$

sendo

$$\Phi_{ij1} = -\varepsilon \cdot \rho \left[C_{s1} a_{ij} + C_{s2} \left(a_{ik} a_{kj} - \frac{1}{3} a_{kl} a_{kl} \delta_{ij} \right) \right] \quad (21)$$

e

$$\Phi_{ij1} = -C_{r1} P a_{ij} + C_{r2} P a_{ij} \rho k S_{ij} \sqrt{a_{kl} a_{kl}} + C_{r4} \left(a_{ik} S_{kj} + S_{ik} a_{kj} - \frac{2}{3} a_{kl} S_{kl} \delta_{ij} \right) + C_{r5} \rho k (a_{ik} w_{kl} + w_{ik} a_{kj}) \quad (22)$$

Como a dissipação turbulenta aparece nas equações de tensões individuais, uma equação para ε é requerida:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \cdot \rho) + \frac{d}{dx_k} (\rho U_k \cdot \varepsilon) = \frac{\varepsilon}{k} (C_{e1} P - C_{e2} \varepsilon \cdot \rho) + \frac{d}{dx_k} \left[\frac{1}{\sigma_\varepsilon} \left(\mu + \rho C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \right) + \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right] \quad (23)$$

sendo

$$a_{ij} = \frac{\overline{u_j u_k}}{k} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \quad (24)$$

e

$$w_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (25)$$

Onde a_{ij} representa o Tensor de Reynolds, S_{ij} é o tensor da taxa de deformação e w_{ij} representa a vorticidade.

Tabela 4.1 - Constantes do modelo SSG.

C_μ	$\delta\varepsilon$	C_s	$C_{\varepsilon1}$	$C_{\varepsilon2}$	C_{s1}	C_{s2}	C_{r1}	C_{r2}	C_{r3}	C_{r4}	C_{r5}
0,10	1,36	0,22	1,45	1,83	1,70	-1,05	0,90	0,80	0,65	0,625	0,20

5. Planejamento de Experimentos

Uma das grandes vantagens do uso da técnica de planejamento de experimentos é a diminuição da quantidade de testes experimentais necessários para a pesquisa. Outra vantagem é a redução do empirismo envolvido no processo de modificação das variáveis utilizadas. Quando não se adota uma estratégia experimental, juntamente com a grande quantidade de experimentos adotados com tentativa e erro, encontra-se dificuldades no tratamento dos dados. Sem uma avaliação estatística adequada, se torna difícil saber a influência de cada variável na resposta (Alves, 2012).

Delineamento de Experimentos (DOE) são testes conduzidos de forma planejada, sendo os fatores alterados de modo a avaliar seu impacto sobre uma variável resposta. Com o objetivo da redução do número de pontos experimentais, foi criada a técnica que utiliza os delineamentos compostos. Eles foram desenvolvidos, inicialmente, por Box e Wilson (1951) para estudo de funções polinomiais de resposta na indústria, sendo o erro experimental pequeno, e as condições do experimento são mais facilmente controláveis (RAMOS, 2005 *apud* Moura 2008).

O delineamento do tipo Composto Central Rotacional (DCCR) consiste na parte fatorial, contento as combinações nos níveis escolhidos, e de pontos axiais (nos níveis $-\alpha$ e $+\alpha$). Ele permite a obtenção de uma superfície de resposta e da região dos fatores estudados que otimiza os valores das variáveis de resposta (Guizelini, 2010)

No planejamento de experimentos, onde o principal objetivo é caracterizar a relação entre uma ou mais variáveis de resposta e um conjunto de fatores de interesse, procura-se construir um modelo que descreva a variável de resposta em função dos intervalos estudados desses fatores, então por meio da metodologia de superfície de respostas é possível aproximar um modelo a uma relação entre os fatores e a resposta do processo. Essa função

que relaciona tais variáveis é chamada de superfície de resposta (Mendonça, 2012).

Segundo Rodrigues e Lemma (2009), devido à pequena quantidade de experimentos envolvidos em estudos com 2 ou 3 variáveis, recomenda-se um delineamento composto central rotacional (DCCR).

6. Materiais e métodos:

6.1. Software e Hardware

Foi utilizado o pacote computacional Ansys, em sua versão 13.0, onde constam diversos softwares desta empresa. De forma mais específica, foi utilizado o Design Modeler para a construção dos domínios (geometrias) dos problemas a serem resolvidos. A discretização, no caso a geração das malhas, foi realizada no programa ICEM. A resolução do problema foi feita no Fluent 13.0 e a análise crítica dos resultados foi feita no CFD-Post.

Foram utilizados para as simulações computadores com processador quad-core Intel® Core i7, com 2.8 GHz de frequência e memória RAM de 4,00 GB e um Cluster contendo 20 nós totalizando 40 processadores Intel Xeon quad-core com 2.33 GHz, 4 GB de memória RAM e 250 GB de memória física em cada nó e Storage de 8 TB de memória física.

6.2. Geometria base

A geometria base utilizada para o estudo, o ponto central do planejamento de experimentos, possui duas entradas tangenciais circulares, uma parte cilíndrica, dois ângulos distintos em sua parte cônica e *vortex finder*. As dimensões base deste equipamento estão descritas na Tabela 6.1, sendo que este possui um comprimento de 0,82 metros e um volume de 1,395 litros. A Figura 6.1 representa um modelo esquemático do equipamento, onde estão expressas as variáveis deste hidrociclone-base de maneira a facilitar a visualização.

Tabela 6.1 - Dimensões do equipamento do ponto central do planejamento de experimentos

D(mm)	Dc(mm)	Di(mm)	Do(mm)	Du(mm)	L1(mm)	Vf(mm)	$\theta 1$ (°)	$\theta 2$ (°)
40,0	70,0	7,5	25,0	25,0	45,0	4,0	2,5	1,0

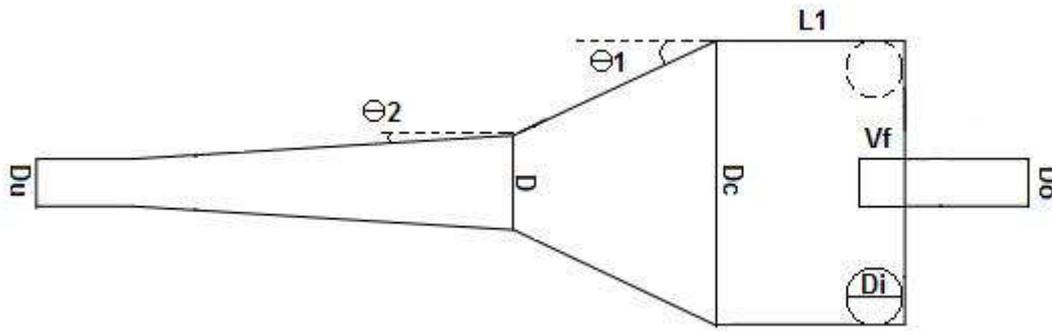


Figura 6.1 - Esquema do hidrociclone para separação óleo-água empregado no estudo em questão com suas respectivas variáveis.

6.3. Teste de malha

Antes de conduzir as simulações para todos os experimentos, é necessário realizar um teste de malha. Porém, a geometria do ponto central empregado neste trabalho é praticamente idêntica à geometria do hidrociclone 12 utilizado por Araújo (2012), salvo o D_o deste que possui o valor de 20 mm enquanto o do ponto central do presente planejamento de experimentos possui o valor de 25 mm. Como Araújo (2012) realizou um extenso teste de malha em seu trabalho, a malha construída para a geometria do ponto central do presente trabalho segue os mesmos parâmetros da utilizada por Araújo (2012).

As malhas geradas neste trabalho possuem refino na zona central, devido ao complexo escoamento rotacional reverso, onde os gradientes de velocidade e pressão são bem acentuados. Nas regiões próximas às paredes, estes gradientes também são elevados, justificando também um refino nesta área. As malhas construídas foram hexaédricas e respeitam os seguintes critérios de qualidade de malha do programa ICEM:

- *Quality*>0,3
- *Max Ratio*<100
- *Min Angle*>30
- *Volume Change*<5

6.4. Configuração das simulações

De acordo com a literatura e com as características físicas do problema em questão, as seguintes configurações foram selecionadas para a execução das simulações (Tabela 6.2):

Tabela 6.2- Configurações utilizadas nas simulações numéricas

Parâmetro	Método
Tipo de <i>solver</i>	<i>pressure based</i>
Modelo multifásico	Euleriano
Modelo de viscosidade	RSM
<i>Reynolds-stress model</i>	<i>Linear Pressure Strain</i>
<i>Reynolds-stress options</i>	<i>Wall Reflection Effects</i>
<i>Near-wall treatment</i>	<i>Standard Wall Function</i>
<i>RSM multiphase model</i>	<i>Mixture</i>
Condições de contorno	
Zona	Tipo
entrada	<i>velocity-inlet</i>
overflow	<i>pressure-outlet</i>
underflow	<i>pressure-outlet</i>
parede	<i>wall (no-slip)</i>
Método de solução	
Acoplamento Pressão Velocidade	
Esquema	<i>Phase Coupled SIMPLE</i>
Discretização Espacial – esquema de interpolação	
Gradiente	<i>Least Square Cell Based</i>
Momento	2ª ordem <i>Upwind</i>
Fração Volumétrica	1ª ordem <i>Upwind</i>
Energia Cinética Turbulenta	2ª ordem <i>Upwind</i>
Taxa de dissipação turbulenta	2ª ordem <i>Upwind</i>

Tensores de Reynolds	1ª ordem <i>Upwind</i>
Critério de convergência	
Resíduos	< 1E-5
Número de Iterações	30.000
Regime	Permanente

Na Tabela 6.3, estão apresentadas as características dos fluidos constituintes da carga e as condições na alimentação. O escoamento no interior do equipamento foi considerado isotérmico e incompressível. As propriedades físicas foram as mesmas adotadas no trabalho de Araújo (2012).

Tabela 6.3- Propriedades físicas da carga

Propriedades Físicas (Araújo, 2012)	
Água	$\rho = 996,5 \text{ kg/m}^3$
	$\mu = 0,855 \times 10^{-3} \text{ kg/(m s)}$
Óleo	$\rho = 840 \text{ kg/m}^3$
	$\mu = 13,2 \times 10^{-3} \text{ kg/(m s)}$
Velocidade de entrada da carga	$v = 4,0 \text{ m/s}$
Fração Volumétrica de óleo	40%(V/V)
Temperatura na alimentação	25°C

O balanço de massa para ambas as fases do problema também foi um parâmetro adotado para a análise de convergência, no caso estes balanços deveriam possuir um erro relativo inferior a 0,5%.

Em função dos *softwares* utilizados para a resolução do problema não possuem modelos de quebra e coalescência razoáveis para descrever o problema físico em questão e da dificuldade de implementação destes algoritmos no *software*, estes efeitos não foram considerados neste estudo.

6.5. Planejamento de experimentos

Para analisar o desempenho dos hidrociclones, foi realizado um DCCR com superfície de resposta, variando os parâmetros geométricos D_o e D_u entre

20 mm e 30 mm e utilizando como parâmetros de resposta a eficiência granulométrica reduzida e a razão de fluido deste equipamento. Como foi realizada a simulação com um único diâmetro de partícula (50 μm) na alimentação para o hidrociclone do ponto central, é razoável que a eficiência granulométrica neste hidrociclone tenha um valor em torno de 50 %, para poder averiguar como a variação dos parâmetros geométricos analisados, no caso D_o e D_u , no planejamento de experimentos irão impactar nas variáveis de resposta.

O planejamento de experimentos foi realizado no *design expert* (6.0.6), e de posse das equações calculadas pelo *software*, será realizada uma otimização da eficiência granulométrica reduzida para o tamanho de partícula simulado, com as restrições de D_o e D_u nas faixas do planejamento de experimentos e com a razão de fluido <33,3%.

6.6. Curvas de eficiência do Equipamento

Após a análise do planejamento de experimentos e da otimização do hidrociclone, este foi simulado com diferentes diâmetros de gota e a sua curva de eficiência granulométrica foi construída para analisar a eficiência de separação neste equipamento para duas distribuições de partículas presentes na literatura (Colman e Thew, 1980) e a distribuição grossa, utilizada por Alves (2012.).

7. Resultados e discussão

7.1. Geometria e Malha para o ponto central

A geometria foi construída no Design Modeler, com as dimensões propostas do item 6.2. A Figura 7.1, representa a geometria do hidrociclone do ponto central do planejamento de experimentos.

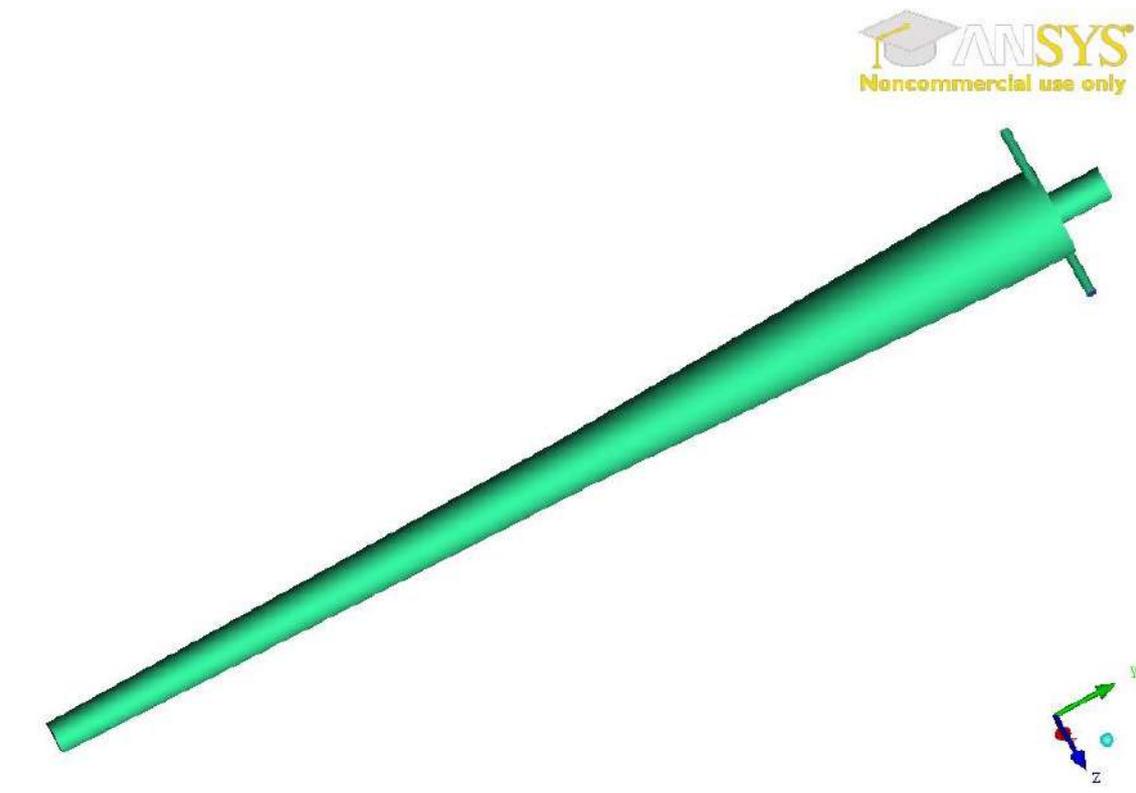


Figura 7.1 - Geometria do ponto central do planejamento de experimentos

A malha foi gerada no programa ICEM, seguindo as características da malha de Araújo (2012). Na Tabela 7.1 estão representados o número de elementos e nós das duas malhas. A diferença entre estes é justificada pelo

aumento do Do , o que exigiu um aumento no número de elementos na região central, onde irá ocorrer a formação da espiral ascendente de fluido.

Tabela 7.1- Número de elementos e nós da malha do Ponto central do planejamento de experimentos e da malha gerada por (Araújo, 2012)

Dados da Malha	Araújo (2012)	Ponto Central
Elementos	457646	558930
Nós	444014	545500

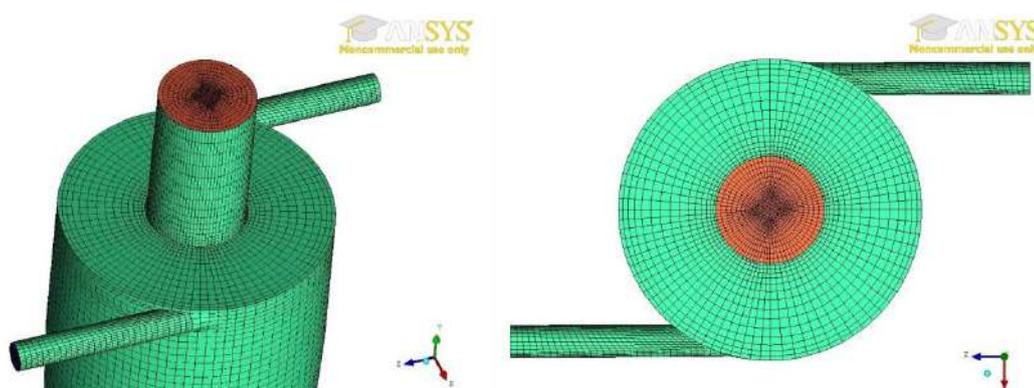


Figura 7.2- Detalhe do refino da malha em regiões estratégicas do domínio físico

7.2. Resultados para a simulação do ponto central

A simulação do ponto central do planejamento de experimentos foi realizada de acordo com as condições especificadas no item 6.4. Os resultados obtidos para a eficiência e razão estão descritos na Tabela 7.2:

Tabela 7.2- Resultados obtidos para a simulação do ponto central do planejamento de experimentos.

Iteração	G	G'	Rf (%)	Balanços de massa para as fases (%)		
				Wagua	Woleo	Wtotal
5000	74.339	36.926	59.316	-31.273	4.691	-0.3143
10000	79.180	48.882	59.270	-0.4527	0.678	-0.0458
15000	80.652	51.355	60.227	0.0085	-0.013	0.0007

20000	81.079	51.698	60.827	0.0355	-0.053	0.0035
25000	81.211	51.713	61.088	0.0189	-0.028	0.0019
30000	81.254	51.698	61.191	0.0080	-0.012	0.0008

Como pode ser observado pela Tabela 7.2, com 30000 iterações foram obtidos resultados satisfatórios para o critério adotado para o fechamento dos balanços de massa ($< 0,5\%$) para as fases em questão.

Foram tomados alguns pontos arbitrários no hidrociclone, onde foram traçadas linhas para se averiguar as velocidades tangenciais no interior do equipamento. A Figura 7.3 mostra estas linhas, traçadas em $y=-0,25\text{m}$, $y=-0,45$ e $y=-0,75\text{m}$, sendo $y=0$ o topo da seção cilíndrica do equipamento. A Figura 7.4 mostra, na linha 2, a evolução da velocidade tangencial com o número de iterações. Mais uma vez fica demonstrado que 30000 iterações é um valor adequado para as simulações. A Figura 7.5 mostra os perfis de velocidades tangenciais nas 3 linhas traçadas.

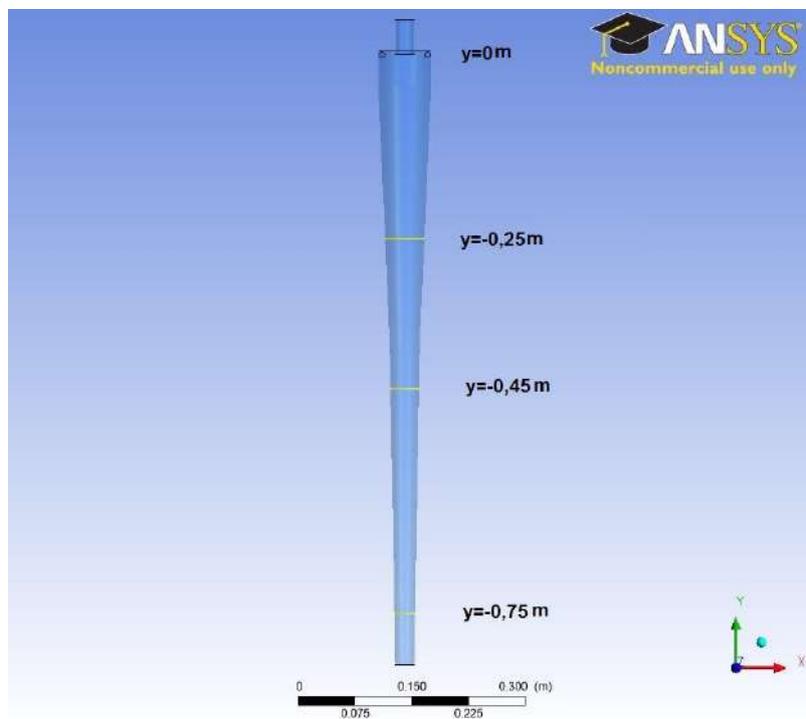


Figura 7.3 - Linhas onde foram tomadas as velocidades tangenciais do equipamento

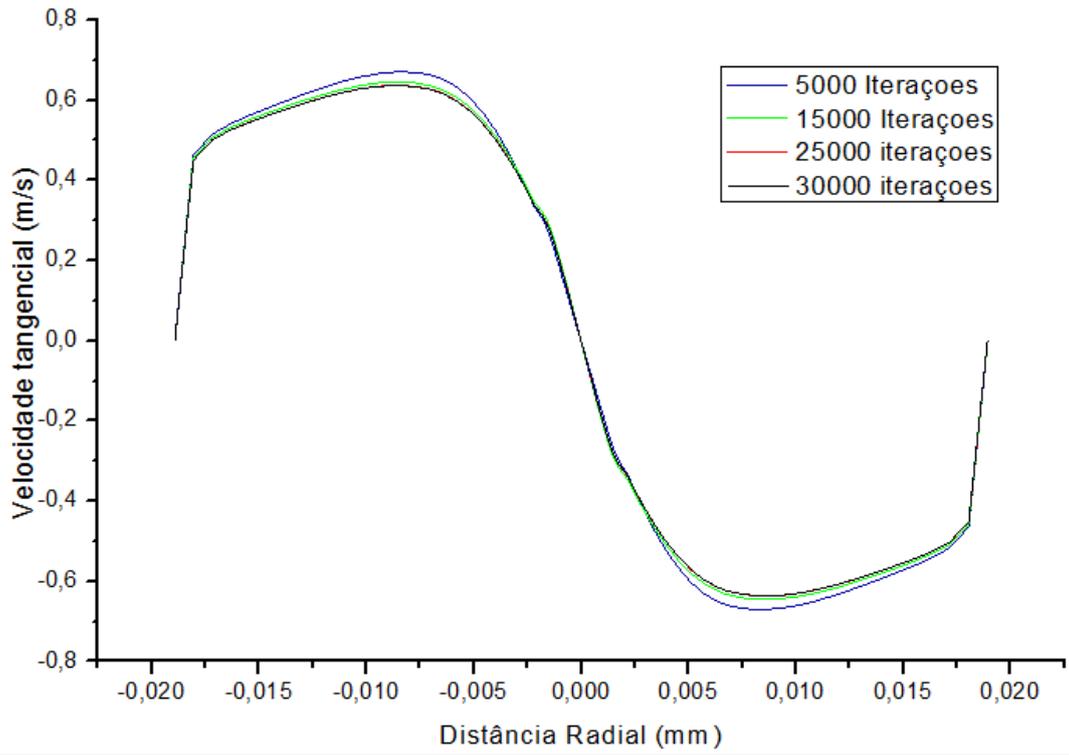


Figura 7.4- Velocidade tangencial na linha 2 variando-se o número de iterações

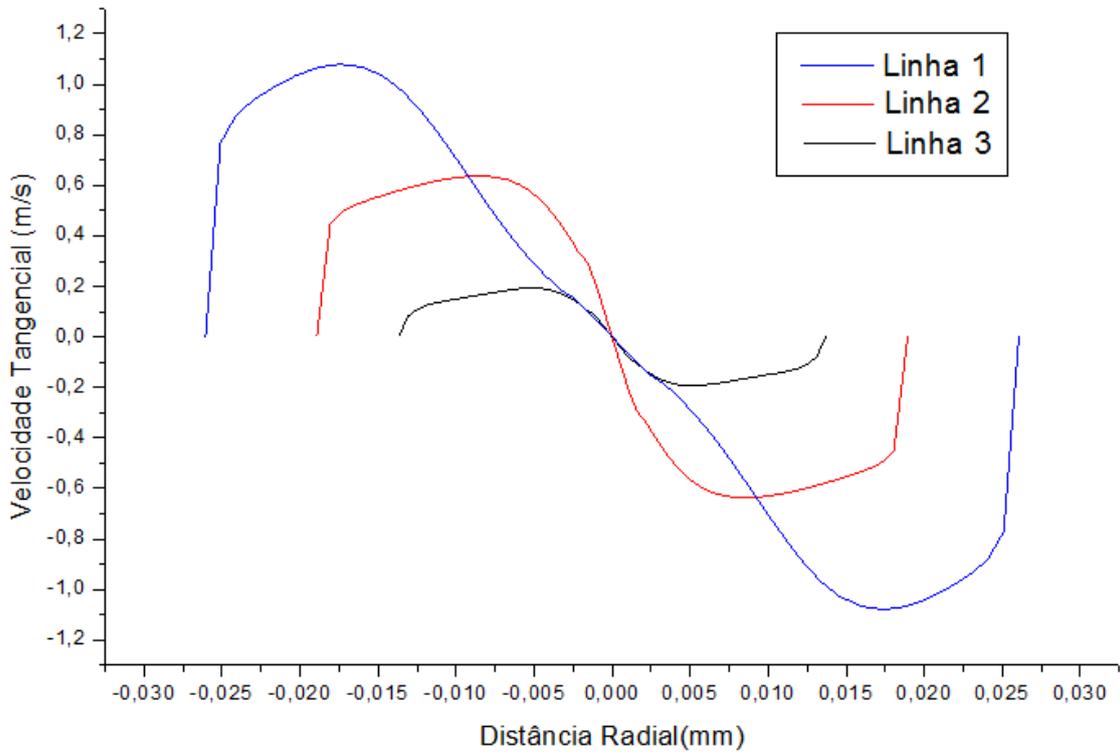


Figura 7.5- Velocidade tangencial nas linhas arbitrárias

As Figuras 7.4 e 7.5 estão de acordo com o perfil típico de velocidade tangencial em um hidrociclone, segundo Svarovsky (1990). A Figura 7.6 mostra o perfil de pressão em um plano vertical paralelo ao comprimento do hidrociclone, sendo clara a região central de baixa pressão, o que condiz com a literatura (Svarovsky, 1990). A perda de carga neste hidrociclone foi de 7,72 kPa

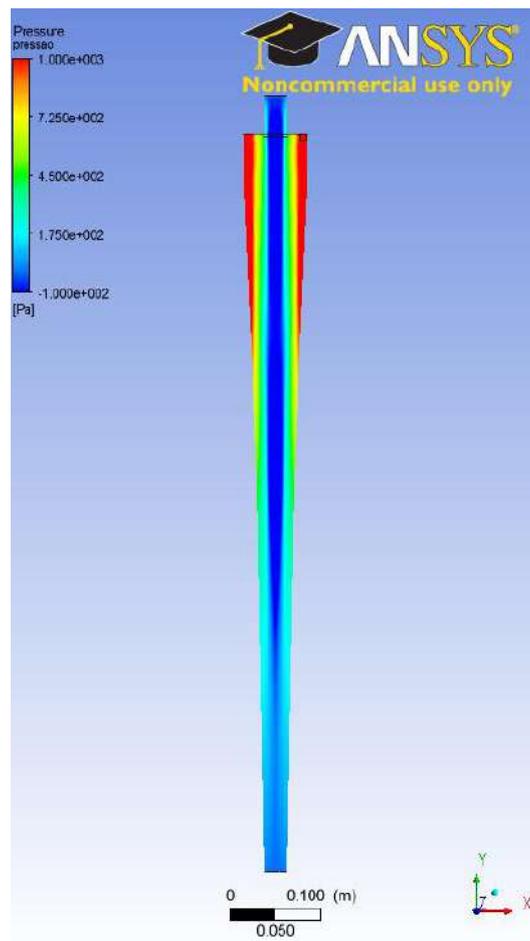


Figura 7.6- Perfil de pressão no hidrociclone do ponto central do planejamento de experimentos

A Figura 7.7 mostra as linhas de corrente da fase contínua, onde pode ser vista a formação da espiral descendente e ascendente de fluido dentro do equipamento.

Na Figura 7.8 são representados os vetores velocidade da fase contínua na saída do tubo de *overflow*. É possível reparar a saída em rotação do fluido.

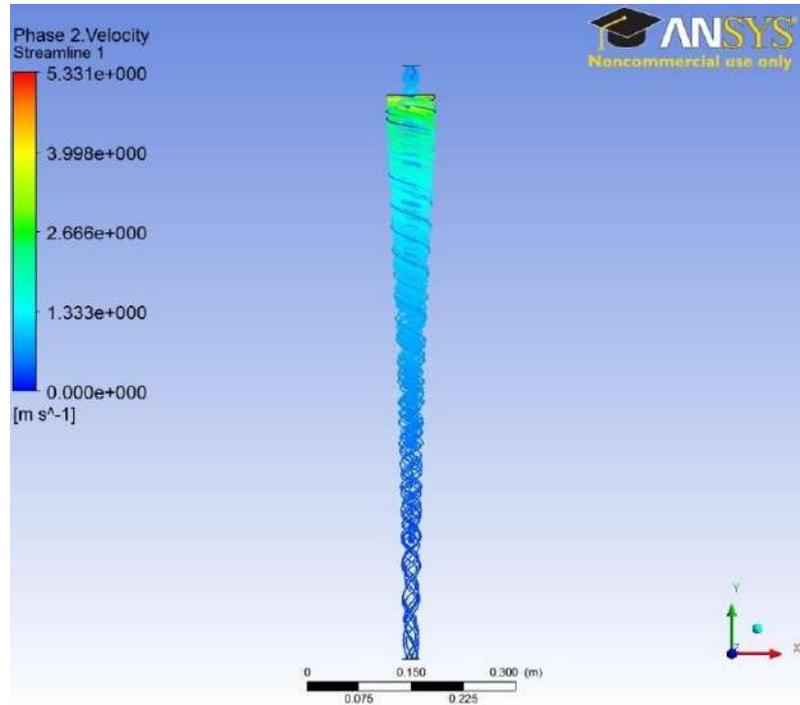


Figura 7.7 - Linhas de corrente para o óleo no hidrociclone

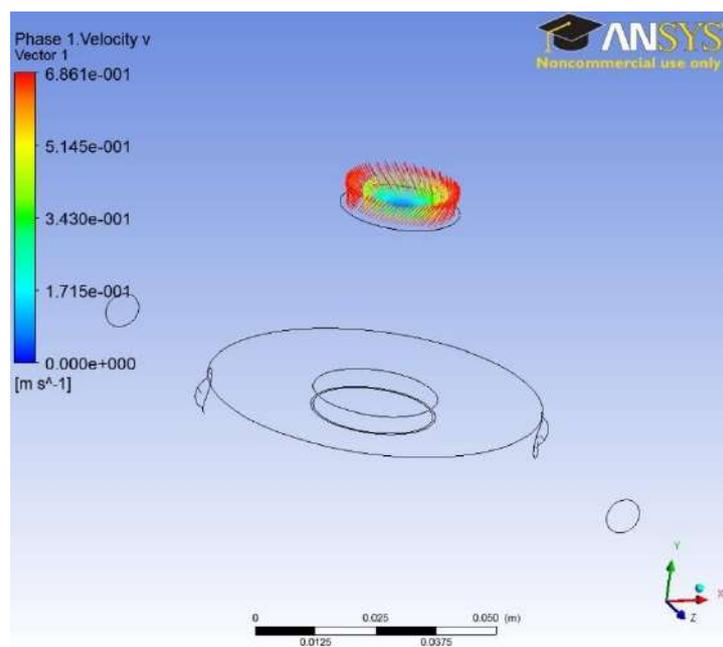


Figura 7.8- Vetores velocidade da fase contínua no overflow do equipamento

Os resultados obtidos com as simulações numéricas representaram bem os fenômenos físicos que ocorrem durante a operação deste equipamento, podendo assim, serem consideradas razoáveis para prosseguir com o planejamento de experimentos, no caso, adotando as condições de simulação para as outras geometrias.

7.3. Planejamento de experimentos

Foram avaliados como parâmetros de resposta para o planejamento de experimentos a eficiência granulométrica reduzida (G') e a razão de fluido (R_f) para um diâmetro de partícula de 50 μm , onde os diâmetros de D_o e D_u foram variados entre 20 mm e 30 mm. A Tabela 7.3 mostra o resultado das variáveis de resposta nas simulações e os valores de D_o e D_u para cada experimento realizado

Tabela 7.3- Resultados de G' e R_f para os experimentos realizados

Experimento	D_o (mm)	D_u (mm)	G' %	R_f (%)
1	20,00	20,00	48,19	49,97
2	30,00	20,00	67,38	94,47
3	20,00	30,00	36,51	29,93
4	30,00	30,00	52,56	74,93
5	17,93	25,00	41,04	31,03
6	32,07	25,00	68,05	94,4
7	25,00	17,93	57,81	77,02
8	25,00	32,07	35,21	47,78
9	25,00	25,00	51,7	61,19

As equações 26 e 27 foram geradas pelo *software design expert 6.0.6* para as variáveis de resposta em função das variações geométricas no equipamento, apresentando R^2 de 0,9999 para o R_f e 0,9869 para G' . Através da análise de variância com um intervalo de confiança de 10% e tomando

apenas os parâmetros com significância estatística foram geradas as equações 26 e 27. Na Figura 7.9 representada as superfícies geradas no planejamento.

$$G'(Do, Du) = -0,1378Du^2 + 5,42865Du + 1,83592Do - 41,48618 \quad (26)$$

$$Rf(Do, Du) = 0,021792Du^2 + 0,028172Do^2 - 3,113Du + 31,05322 \quad (27)$$

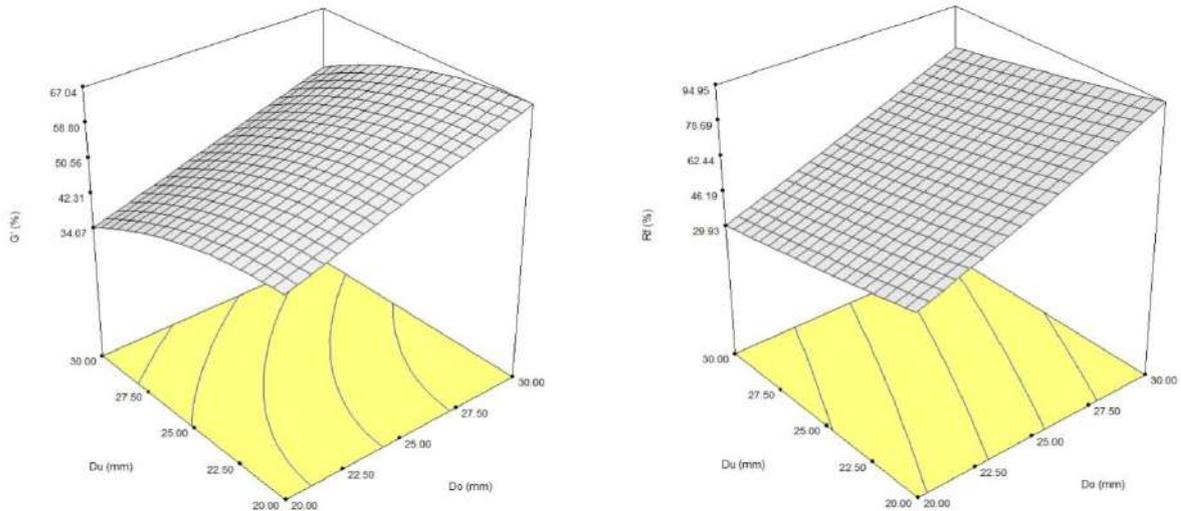


Figura 7.9- Respostas do planejamento de experimentos através da análise das superfícies de resposta de $G'(Do, Du)$ e $Rf(Do, Du)$

7.3.1. Otimização

De posse das equações geradas pelo planejamento de experimentos, foi realizada uma otimização multivariável, tendo a equação 26 como função objetivo com as seguintes restrições: $Rf < 33\%$ (pois com um Rf muito alto, boa parte da água da alimentação sairia pelo *overflow* o que não é desejado, portanto este valor foi fixado), $17,93 < Do < 32,07$ e $17,93 < Du < 32,07$. Este problema foi resolvido no *solver* do programa Excel, retornando os valores da Tabela 7.4:

Tabela 7.4 - Parâmetros geométricos, G' e Rf para o hidrociclone otimizado

G' (%)	Rf (%)	Du (mm)	Do (mm)
42,54	33,33	23,83	17,93

Comparando esses resultados com os resultados obtidos pelo 5º experimento, pode ser observado que a variação entre D_u dos dois hidrociclones é muito pequena, e que o ganho de G' para o hidrociclone otimizado é de 3,66% e o aumento em R_f é de 7,67% em relação ao 5º experimento. Os valores de G' e R_f para os dois equipamentos estão representados na Tabela 7.5. Devido a estes fatores, conclui-se que uma opção razoável seria tomar o hidrociclone 5 para o prosseguimento do trabalho, pois este gera uma eficiência equivalente, porém com um menor R_f .

Tabela 7.5- Dados do hidrociclone otimizado e do hidrociclone 5 do planejamento de experimentos.

	G' (%)	R_f (%)	D_u (mm)	D_o (mm)
Hidrociclone otimizado	42,5	33,3	23,8	17,9
Hidrociclone 5	41,0	31,0	25,0	17,9

7.4. Eficiência de separação para o hidrociclone selecionado

Após a escolha do hidrociclone do 5º experimento, foi construída a sua curva de eficiência granulométrica reduzida alimentando o equipamento com diversos diâmetros de gota, um único diâmetro de cada vez, e assim analisando sua eficiência para cada um desses diâmetros (Figura 7.10). Após essa etapa, esta equação foi linearizada (Figura 7.11). A partir da Figura 7.10, pode-se obter o d'_{50} do equipamento e o valor de n da equação 6 (Tabela 7.6).

A Tabela 7.7 apresenta as eficiências totais reduzidas obtidas para duas distribuições de tamanhos de gotas, uma fina e outra grossa, calculadas a partir da equação 10.

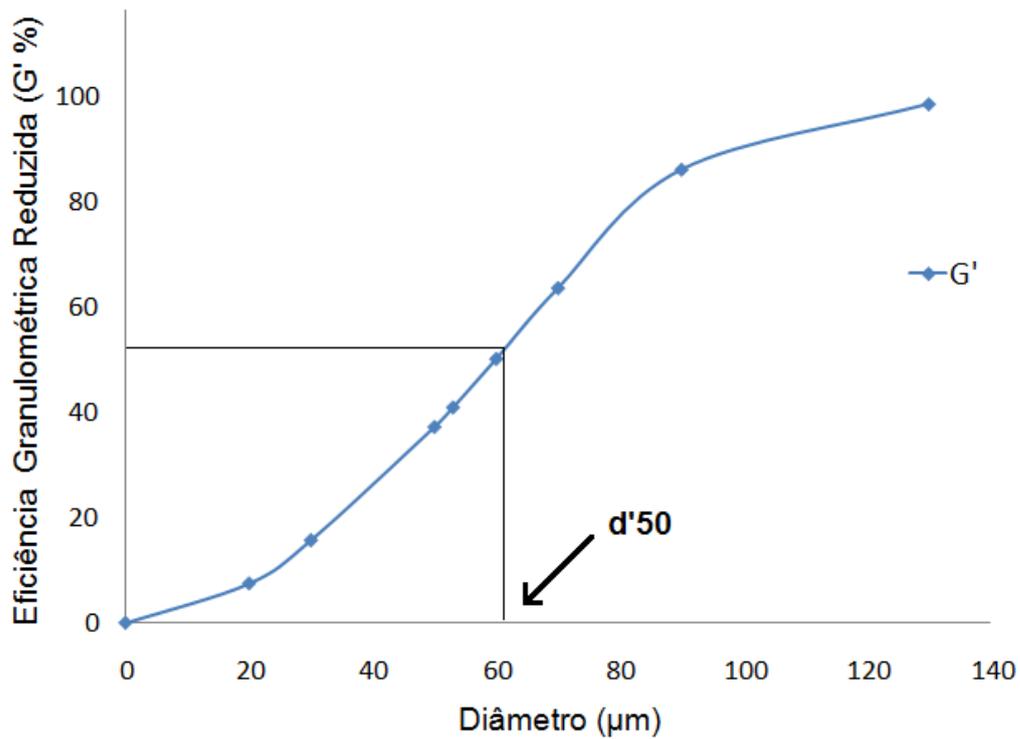


Figura 7.10- Curva de eficiência granulométrica reduzida para o hidrociclone otimizado (Hidrociclone 5)

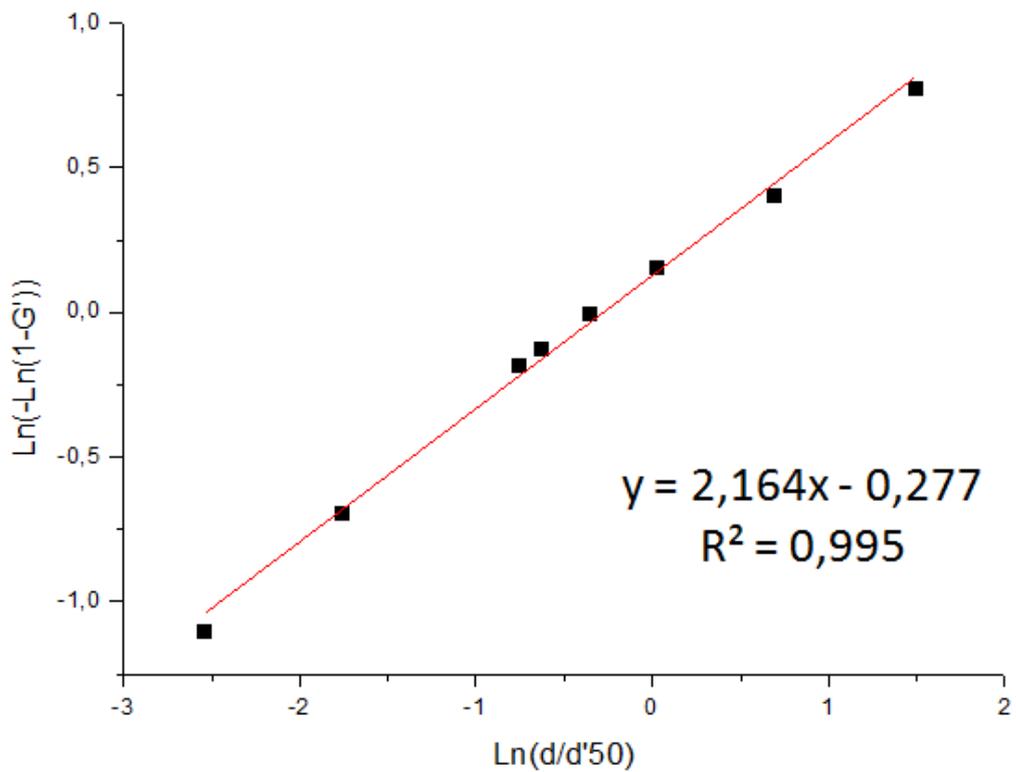


Figura 7.11- Forma linearizada da equação de eficiência granulométrica reduzida para o hidrociclone otimizado

Tabela 7.6 -Parâmetro n da equação 6 e d'50 para o hidrociclone 5.

n	2,164
d'50 (μm)	60

Tabela 7.7- Eficiência do equipamento e parâmetros RRB para as duas distribuições analisadas.

Distribuição	Parâmetros RRB		E'T(%)	ET (%)
	K(μm)	m		
Colman e Thew (1980)	51	2,5	32,8%	53,6
Alves (2012.).	168	1,8	82,9%	88,2

Os valores de eficiência encontrados para a distribuição utilizada por Alves (2012) estão próximos a valores experimentais encontrados em trabalhos na literatura, como por exemplo, Meldrum (1988) e Bennett & Willians (2004), e os valores de eficiência encontrados para a distribuição de Colman e Thew (1980) estão um pouco abaixo desses valores por ser uma distribuição mais fina.

8. Conclusões

Pelos resultados obtidos com o planejamento de experimentos, foi possível concluir que os diâmetros de saída do hidrociclone são fatores que influenciam de forma apreciável a eficiência de separação e a razão de fluido, mesmo estes estando variando em faixas não muito amplas. O limite inferior da variação de D_o foi o ponto ótimo para alcançar uma razão de fluido compatível com a operação destes equipamentos e para obter uma eficiência total reduzida razoável, enquanto o valor de D_u ótimo para estes parâmetros ficou com dimensão em torno do ponto central do planejamento.

Com a curva de eficiência granulométrica reduzida do hidrociclone selecionado (hidrociclone do 5º experimento), pode-se analisar como seria o desempenho deste equipamento com duas distribuições reais de tamanhos de partícula, que para uma distribuição mais grossa (Alves, 2012.) apresentou bons resultados para a eficiência total de separação (88,2%) e para uma distribuição mais fina (Colman e Thew, 1980), apresentou resultados razoáveis (53,6%).

Considerando que o espaço no ambiente *offshore* um fator crítico, é possível concluir que a utilização de hidrociclones no lugar de separadores trifásicos ou mesmo trabalhando em conjunto com estes é factível, pois a eficiência de separação foi elevada para cargas com alto teor de óleo.

9. Sugestões para Trabalhos Futuros

- Modelar e avaliar o efeito da quebra e coalescência de gotas no interior do equipamento, comparando estes resultados com os obtidos sem esta abordagem.
- Variar condições operacionais, como a queda de pressão do hidrociclone, e analisar a influência destes parâmetros na eficiência de separação do equipamento.
- Determinar a vazão crítica deste equipamento, no caso, o ponto onde o aumento desta diminui a eficiência de separação.
- Avaliar a possibilidade da utilização de outro(s) hidrociclone(s) operando em série com o obtido neste trabalho a fim de adequar a água para descarte.
- Construir este hidrociclone para a realização de experimentos, comparando estes resultados com os obtidos nas simulações numéricas neste trabalho, podendo, desta forma, averiguar a validade da modelagem implementada.

10. Bibliografia

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

ALVES, J. V. B., MEDRONHO, R. A.; Hidrociclone para a separação do óleo residual de água em refinarias. Anais do COBEQ 2012 - XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2012, Búzios.

Ansys Fluent12.1, Theory Guide, Ansys, april 2009.

ARAÚJO, C.A.O.de.; “Hidrociclones para a Separação de Misturas de Alto Teor de Óleo Disperso em Água”, Qualificação ao Doutorado, Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2012.

Bennett, M. A., Williams, R. A., Monitoring the operation of an oil/water separator using impedance tomography, Miner. Eng., 17, 605-614, 2004.

BIRD, B. R.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N.; "Transport Phenomena. 2ª Edition", New York: ed John Wiley & Sons, Inc, 2002.

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

CAPEDEVILA, R; PÉREZ-SEGARRA; OLIVA, A; "Development and comparison of different spatial numerical schemes for the radiative transfer equation resolution using three-dimensional unstructured meshes" Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer Volume 111, Issue 2, January 2010, Pages 264–273

CASTILHO, L. R., MEDRONHO, R. A.; A simple procedure for design and performance prediction of Bradley and Rietema hydrocyclones. Minerals Engineering. , v.13, p.183 - 191, 2000.

COELHO, D. B.; "Desempenho de um Hidrociclone para separação de águas oleosas", Projeto final de curso, Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2011.

COELHO, D. B., MEDRONHO, R. A., ALVES, J. V. B.; A eficiência de separação de um hidrociclone para águas oleosas pelas abordagens lagrangeana e euleriana. Anais do COBEQ 2012 - XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2012, Búzios.

COLMAN, D. A., THEW, M. T.; "Hydrocyclone to give a highly concentrated sample of a lighter dispersed phase", Paper presented at an International Conference on Hydrocyclones, p. 209 - 223, Cambridge, U.K., October, 1980.

CHU, Liang-Yin; CHEN, Wen-Mei; LEE, Xiao-Zhong.; "Effect of structural modification on hydrocyclone performance", Separation and Purification Technology, 21, p. 71–86 2000.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T.; "Introduction to Fluid mechanics. 8ª Edition", New York: ed John Wiley & Sons, Inc, 2011.

FILGUEIRAS, N. G. T.; "Modelagem, Análise e Controle de um Processo de Separação Óleo/água", 2005. Tese mestrado - PEQ/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

FREITAS, A. G. B. de.; "Modelagem e simulação do tratamento de água oleosa usando hidrociclone", Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2009.

Freitas, A.G.B., PAIXAO, A. E. A., MEDRONHO, R. A., SILVA, G. F.; Influência de algumas variáveis geométricas do hidrociclone na razão de fluido e eficiência granulométrica reduzida: um estudo com CFD. Anais do ENEMP 2009 - XXXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 2009, Campinas.

GUIZELINI, B P ;"Desenvolvimento de um novo processo de produção de esporos de Geobacillus stearothermophilus e sua utilização em indicador biológico para esterelização a vapor" Dissertação de Mestrado, Paraná: Universidade federal do paraná, 2010.

HAUKE, G.; "An Introduction to Fluid Mechanics and Transport Phenomena", Zaragoza: Springer, 2008.

[Http://douglaspinto.blogspot.com.br/2010/09/blog-post.html](http://douglaspinto.blogspot.com.br/2010/09/blog-post.html),(consultado em 21/05/2013)

HUSVEG, T., RAMBEAU, O., DRENGSTIG, T.; "Performance of a deoiling hydrocyclone during variable flow rates", Minerals Engineering 20 368-379, Norway, 2007.

KHAROUA, N.; KHEZZAR, L.; NEMOUCHI, Z.; "Hydrocyclones for De-oiling applications – A review", Petroleum Science and Technology, 28, 738-755, 2010.

LEAHY-DIOS, A.; "Estudo da Separação Água-Óleo em Hidrociclones Através de Fluidodinâmica Computacional – Influência do Ângulo da Seção Cônica", Projeto final de curso, Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2003.

LEAHY-DIOS, Alana, MEDRONHO, R. A.; Simulação Numérica da Separação Água-Óleo em Hidrociclones. Anais do 2o. Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás, 2003, Rio de Janeiro.

MALISKA, C. R.; "Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional. 2ª ed, Rio de Janeiro: LTC, 2004

MARINS, L. P. M., DUARTE, D. G., LOUREIRO, J. B. R., MORAES, C. A. C.; "LDA and PIV characterization of the flow in hydrocyclone without an air-core", Journal of Petroleum Science and Engineering, Cnpes/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.

MELDRUM, N.; "Hydrocyclones: A solution to produced-water treatment", SPE Prod. Eng., November: 669-676, 1988.

MENDONÇA, L, A ; "Desempenho do delineamento composto central rotacional com alto coeficiente de variação" , Dissertação de Mestrado, Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2012.

MORAES, C. A. C.; "Desenvolvimento de hidrociclones para altos, médios e baixos teores de óleo", Boletim técnico da Produção de Petróleo, Rio de Janeiro - volume 3, nº 2, p. 259-287.

MOURA, K, R, M ; "Otimização do processo de produção de biodiesel metílico do sebo bovino aplicando um delineamento composto central rotacional (DCCR) e a avaliação da estabilidade " Tese de doutorado, Departamento de Química, Universidade Federal da Paraíba, 2008.

NASCIMENTO, J. T.; "Uso de Cfd na Otimização das proporções geométricas de um hidrociclone para a separação de dispersões óleo/água provenientes de refinarias", Projeto final de curso, Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2008.

QUEIROZ, F. V.; "Simulação numérica de hidrociclones para a separação de misturas de alto teor de água em óleo como fase contínua", Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2012.

QUEIROZ, F. V., MEDRONHO, R. A.; Simulação numérica de hidrociclones para a separação de misturas de alto teor de água em óleo como fase contínua. Anais do COBEQ 2012 - XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2012, Búzios.

RAPOSO, G. M.; "Simulação numérica do escoamento em hidrociclone destinado a aplicações de alto teor de óleo", PUC, 2008.

REGO, F. C. D. A.; "Estudo do hidrociclone cilíndrico de uma unidade de flotação centrífuga com auxílio de fluidodinâmica computacional", 2008. Dissertação de Mestrado - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rego, F. C. A., MEDRONHO, R. A.; Estudo do Hidrociclone Cilíndrico de uma Unidade de Flotação Centrífuga com Auxílio de CFD. Anais do ENEMP 2007, XXXIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 2007, Aracaju/SE.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F.; "Planejamento de experimentos e otimização de processos. 2ª Edição", ed. Campinas: Cárita, 2009

ROSIN, P.; RAMMLER, E.; "The laws governing the fineness of powdered coal", P. 33, The Institute of Fuel, Berlin, October, 1933.

SVAROVSKY, L.; " Solid-Liquid Separation. 3rd", Ed., Butterworths, London, 1990.

VERSTEEG, H. K., MALALASEKERA, W.; "An Introduction to computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method", Longman, London, 1995.

YOUNG, G. A. B. et al.; "Oil-water separation using hydrocyclones: an experimental search for optimum dimension". J. Petrol. Sci. Eng., v. 11, p. 37-50, 1994.

THOMAS, J. E., et al.; "Fundamentos de Engenharia de Petróleo. 1ª Edição", Rio de Janeiro: Ed. Interciência: PETROBRAS, 2001.