

08 a 11 de Outubro de 2018
Instituto Federal Fluminense
Búzios - RJ

MODELAGEM COMPUTACIONAL DA EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO ENTRE ÁGUA E ÓLEO EM UM HIDROCICLONE

Cleber de Almeida Corrêa Junior¹ – cleberacj@id.uff.br
Rosilene Abreu Portella Corrêa¹ – rosileneportella@id.uff.br
Marco Van Hombeeck² – hombeeck@iprj.uerj.br
Erick Fabrizio Quintella³ – erick.quintella@petrobras.com.br
Giovani Cavalcanti Nunes³ – giovanicn@petrobras.com.br

¹ Universidade Federal Fluminense – Instituto do Noroeste Fluminense de Educação Superior – Santo Antônio de Pádua, RJ, Brasil

² Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico – Nova Friburgo, RJ, Brasil

³ Petróleo Brasileiro S/A – Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Resumo. *O presente trabalho aborda aspectos sobre o tratamento de águas oleosas, por meio de hidrociclones, Apresenta o hidrociclone, sua utilização pela indústria do petróleo e os fenômenos de escoamento que ocorrem no seu interior. A partir das equações da conservação de massa e da quantidade de movimento linear, fazendo-se diversas considerações simplificadoras, chega-se a uma equação diferencial para a função corrente que, após ser trabalhada, possibilita a obtenção do conjunto de equações utilizadas como modelo para o cálculo da eficiência de separação do hidrociclone. Desenvolve-se ainda um modelo simplificado para a representação do fenômeno da quebra de gotas e é calculada uma nova eficiência de separação, levando-se em conta este fenômeno.*

Palavras-chave: *Águas Oleosas; Hidrociclones; Modelagem Computacional; Quebra de Gotas*

1. INTRODUÇÃO

Originalmente os hidrociclones foram desenvolvidos para a separação de sólidos em líquidos e, após vários estudos, modificações foram feitas para alcançar um equipamento semelhante para a separação eficiente entre dois líquidos. Trata-se de um equipamento composto por trechos cilíndricos e cônicos justapostos, que possui uma ou mais entradas laterais tangenciais por onde é feita a alimentação da mistura a ser separada (“feed”) e duas saídas, uma inferior (“underflow”) e outra superior (“overflow”), orientadas no eixo central. A entrada de um meio contínuo fluido, contendo uma fase dispersa de diferente massa

específica, é feita tangencialmente à seção transversal, fazendo com que o fluido tenha, além do escoamento axial, um movimento de rotação ao redor do eixo. O tipo de hidrociclone abordado neste trabalho é o de-oiling (água com baixos teores de óleo), responsável pela separação do óleo disperso na água. Daqui em diante, o termo hidrociclone neste trabalho está sendo referido a esta aplicação.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA DO ESCOAMENTO NO INTERIOR DO HIDROCICLONE

O desenvolvimento do modelo segue a abordagem utilizada por Moraes (1994), baseada na análise do escoamento a partir da equação de Navier – Stokes, na forma vetorial, para viscosidade constante, fluido incompressível e regime permanente.

$$\nabla \left[\frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} q^2 + \kappa \right] - \vec{q} \wedge \vec{w} = \nu (\nabla \wedge \vec{w}) \quad (1)$$

Da equação da continuidade, para fluido incompressível:

$$\nabla \cdot \vec{q} = 0 \quad (2)$$

E da equação da velocidade terminal de decantação de Stokes, Eq. (1):

$$U_d = \frac{1}{18\mu} (\rho_d - \rho_c) d^2 a_c \quad (3)$$

Onde:

\vec{q} = vetor velocidade do fluido (de módulo q); κ = potencial gravitacional; \vec{w} = vetor vorticidade ($= \nabla \wedge \vec{q}$); p = pressão; ν = viscosidade cinemática do fluido; U_d = velocidade terminal de decantação de Stokes; μ_c = viscosidade da fase contínua; ρ_o = massa específica do óleo; ρ_a = massa específica da água; d = diâmetro da gotícula de óleo; a_c = aceleração centrífuga.

A solução destas equações para o caso invíscido, no domínio do hidrociclone, gera os perfis das velocidades radial, axial e tangencial no hidrociclone, e pode-se então calcular, conforme feito por Moraes (1994), a eficiência da separação água – óleo. Na modelagem feita por Moraes, entretanto, a quebra de gotas no interior do hidrociclone não é considerada, resultando em uma curva de eficiência de separação irreal, que tende assintoticamente para 100% com o aumento da vazão. Este trabalho tem como principal motivação a obtenção de uma curva de eficiência mais realista através da introdução de um modelo para representar esta quebra.

A eficiência de separação está relacionada com a capacidade que as gotas tem de alcançar a região central do hidrociclone, que por sua vez depende fortemente do seu diâmetro, como consequência da lei de Stokes.

A Fig. 1 ilustra uma situação em que uma gota de óleo com um diâmetro d , entrando no trecho cônico modelado muito próxima da parede chega ao eixo do equipamento no limite da separação, ou seja, muito próximo do ponto onde a velocidade axial muda de sentido. O diâmetro dessa gota é conhecido como diâmetro de corte, o qual, de certa forma, representa o potencial de separação do hidrociclone, onde gotas com diâmetros superiores ao diâmetro de corte certamente serão separadas (não considerando o fenômeno da quebra), e com diâmetros

menores poderão ser separadas ou não. Quanto menor for o diâmetro de corte, melhor projetado foi o hidrociclone.

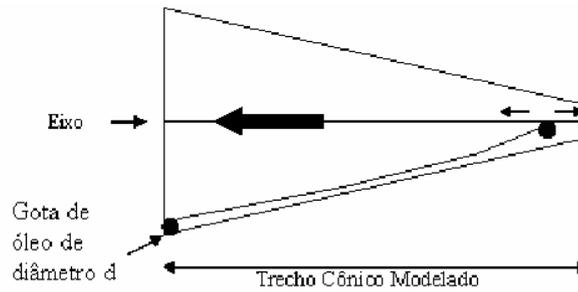


Figura 1 – Diâmetro de corte.

2.1 – Perfis das Velocidades Radial, Axial e Tangencial e Eficiência sem Quebra

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para as três componentes da velocidade, em coordenadas cilíndricas, para dois valores da coordenada axial z , correspondente ao topo do trecho cônico modelado ($z=1,337$ m) e a base do trecho cônico modelado ($z = 0,6685$ m). Também é apresentado o comportamento da curva de eficiência vs vazão sem considerar o fenômeno da quebra de gotas (Fig. 7). As características geométricas do hidrociclone considerado são:

- Raio do orifício de rejeito: 1,5 mm
- Fração de rejeito: 0,03
- Diâmetro nominal do hidrociclone: 35 mm
- Ângulo do trecho cônico modelado: $1,5^\circ$

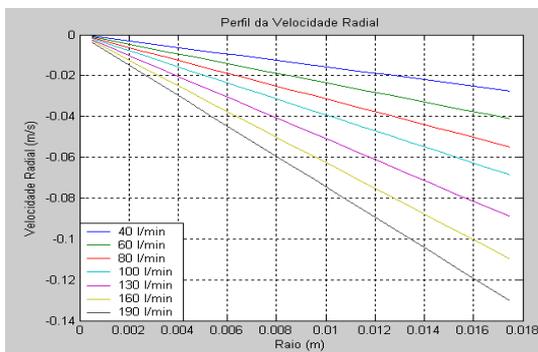


Figura 2 – Perfil da velocidade Radial ($z = 1,337$ m).

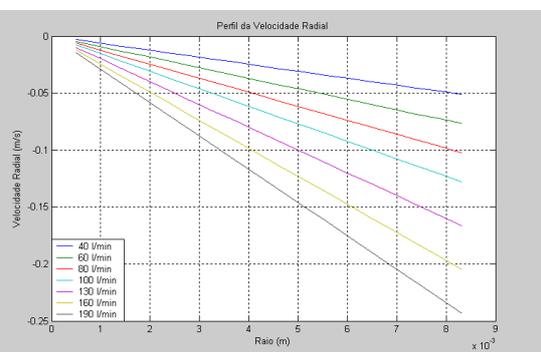


Figura 3 – Perfil da velocidade Radial ($z = 0,6685$ m).

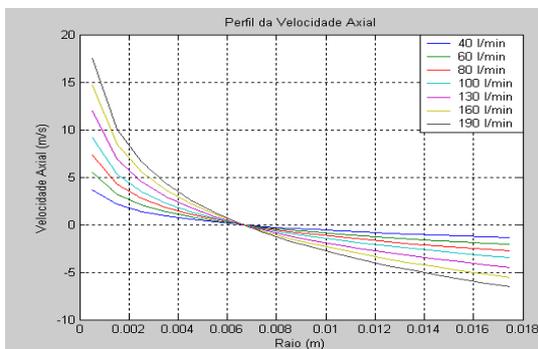


Figura 4 – Perfil da velocidade Axial ($z = 1,337$ m).

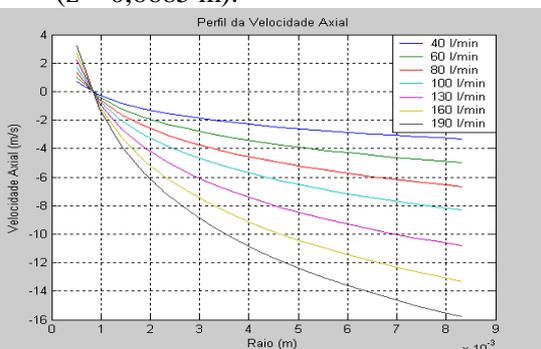


Figura 5 – Perfil da velocidade Axial ($z = 0,6685$ m).

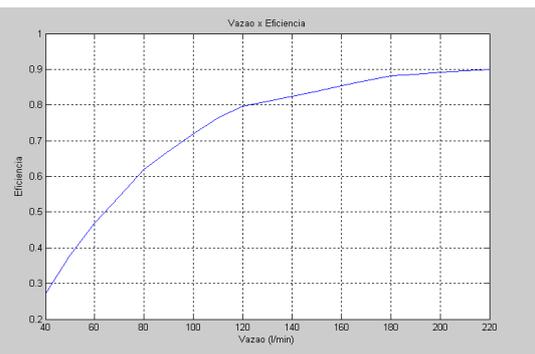
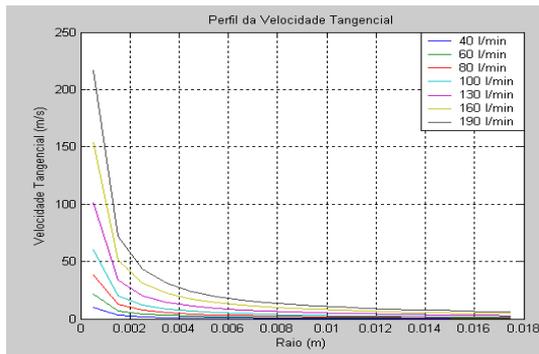


Figura 6 – Perfil da velocidade Tangencial. Figura 7 – Eficiência de separação sem quebra de gotas.

Conforme se pode observar, a curva de eficiência obtida nesta abordagem não apresenta um valor máximo, sugerindo que aumentará assintoticamente para 100% com vazões crescentes. Na prática este fato não ocorre, pois com o aumento da turbulência no escoamento certamente haverá uma quebra nas gotas, especialmente as maiores, dificultando a separação e reduzindo a eficiência. É, portanto, necessário alterar este modelo, incorporando um critério para representar este fenômeno.

3. QUEBRA DAS GOTÍCULAS DE ÓLEO

Um dos primeiros trabalhos sistemáticos no estudo das emulsões foi feito por Taylor (1934), que sugeriu que a quebra das gotas se dá pela competição entre a ação local do campo de tensões do escoamento externo, aplicado à superfície da gota, e o campo de tensões interfaciais, que tendem a preservar a integridade da superfície da gota. Esta hipótese suplantou a hipótese corrente na época, que supunha ser o fenômeno de quebra decorrente de instabilidades internas da gota.

Bentley e Leal (1986) apresentam um estudo teórico-experimental dos efeitos de deformação e quebra de gotas em diferentes tipos de escoamento de características permanente, linear e bidimensional. Analisa-se o comportamento de uma gota livremente suspensa em um fluido viscoso e imiscível que sofre a influência de um escoamento linear bidimensional. Neste trabalho, os autores aprimoraram o banco de testes proposto por Taylor (1934), o qual consistia em um recipiente que contém quatro rolos. Utilizando um sistema de controle comandado por um computador é possível o controle da rotação de cada um dos quatro rolos de forma que uma gota colocada no centro geométrico dos quatro cilindros possa ser exposta a uma grande variedade de esforços, sem, contudo, se mover, de forma a ser possível fotografar sua deformação e também sua quebra.

Desta forma, este equipamento permite desenvolver uma variedade de tipos de condições através de combinações entre as rotações dos rolos. Os escoamentos gerados pelo dispositivo e a forma do tensor gradiente de velocidade podem ser caracterizados por um parâmetro β , o qual especifica a relação entre a intensidade de tensão e vorticidade no escoamento. Relação esta expressa por:

$$\frac{1 + \beta}{1 - \beta} = \frac{\text{Magnitude da tensão}}{\text{Magnitude da vorticidade}} \quad (4)$$

Segundo Bentley e Leal, em misturas com a fase contínua mais viscosa e com baixo número de Reynolds para o escoamento, a evolução do formato da gota depende:

- da relação de viscosidade p ;

Onde,

p = (viscosidade da fase dispersa / viscosidade da fase contínua)

- do número capilar, Cap (quociente entre as forças viscosas e as forças interfaciais), onde:

$$Cap = \frac{G\mu_c d}{2\gamma}; \quad (5)$$

Com,

G = Tensor gradiente de velocidade [s^{-1}];

μ_c = Viscosidade da fase contínua [$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$];

γ = Tensão interfacial [N/m];

d = Diâmetro da gota sem deformação [m].

- e da natureza do escoamento.

De uma forma geral, a quebra das gotas nesse tipo de mistura ocorre quando as forças viscosas resultantes do escoamento são superiores às resultantes dos efeitos da tensão interfacial γ (força de coesão), desde que aplicadas durante um tempo suficiente. Esta situação é caracterizada pelo número capilar crítico (Cap_{crit}) que, além do tipo de escoamento, depende também da razão entre as viscosidades p . O gráfico proposto por Grace (1982), reproduzido na Fig. 3.2 e que correlaciona Cap_{crit} com p , mostra que é necessário menos esforço para quebrar gotas sujeitas a um escoamento extensional do que a um escoamento cisalhante, caso este em que a quebra de gotas não foi verificada em laboratório para razão de viscosidades p superior a 4 (Stone, 1994). Para calcular (Cap_{crit}), pode-se usar a aproximação de Stegeman (2002) às curvas de Grace (ver Fig. 8).

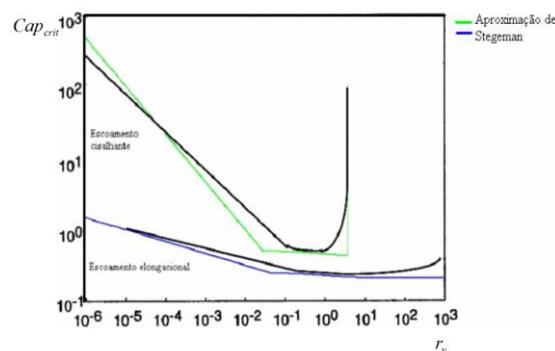


Figura 8 – Curva de Grace e aproximação de Stegeman. (N. Domingues et al. (2004)).

- Em escoamento cisalhante:

- Em escoamento extensional (elongacional):

$$Cap_{crit} = \begin{cases} 0.05 p^{-2/3} & se\ p < 0.032 \\ \frac{8(p+1)}{19p+16} & se\ 0.032 \leq p < 4 \end{cases}$$

$$Cap_{crit} = \begin{cases} 0.15 p^{-1/6} & se\ p < 0.049 \\ \frac{4(p+1)}{19p+16} & se\ p \geq 0.049 \end{cases}$$

Segundo Briscoe (1999), para valores de Cap ligeiramente superiores ao valor de Cap_{crit} o mecanismo da quebra é denominado de quebra binária, com cada gota dividindo-se noutras duas gotas e assim sucessivamente, até deixar de haver condições para que a quebra continue (forças interfaciais > forças viscosas).

Um segundo processo ocorre quando o valor do número capilar aumenta significativamente além do Cap_{crit} . Neste caso o mecanismo da quebra recebe o nome de quebra capilar, e se caracteriza por forte alongamento da gota, a qual se parte em diversos pedaços por ação das chamadas ondas capilares.

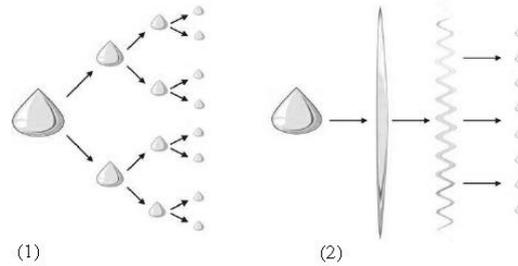


Figura 9 – Mecanismos de quebra binária (1) e quebra capilar (2).

Em escoamentos turbulentos surgem grandes vórtices, os quais são responsáveis pela geração de uma sucessão de vórtices de tamanho decrescente e rotação crescente. Os menores vórtices são conhecidos como vórtices de Kolmogorov e a sua dimensão característica pode ser obtida aproximadamente pela seguinte relação:

$$\lambda_k = \left(\frac{v^3}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

Onde,

λ_k = Comprimento característico do vórtice de Kolmogorov [m];

ε = Taxa de dissipação de energia por unidade de massa [W/kg];

Segundo Risso e Fabre (1998), em escoamentos turbulentos existem basicamente dois mecanismos de quebra:

- Quando o número de Reynolds da gota é menor que a unidade e o tamanho da gota é pequeno quando comparado com λ_k , a quebra é dominada por forças viscosas;
- Quando o número de Reynolds da gota é maior que a unidade e o tamanho da gota é maior que λ_k , a quebra das gotas é dominada pelas forças de inércia.

Com o número de Reynolds da gota definido como sendo:

$$Re_G = \frac{\rho_c d U_d}{\mu_c} \quad (7)$$

Ainda de acordo com estes autores, em escoamentos com Reynolds mais elevados, as forças de inércia predominam no processo de quebra de gotas, e o número adimensional pertinente a este fenômeno, equivalente ao Cap , é o número de Weber, We , que relaciona forças de inércia e as forças devido à tensão interfacial, dado por:

$$We = \frac{\rho_c u'^2 d}{2\gamma} \quad (8)$$

Onde,

u' = Flutuação da velocidade do escoamento gerada pelo vórtice [m/s];

Assim, como visto para o escoamento dominado por forças viscosas, a quebra da gota deverá ocorrer se o número de Weber associado ao escoamento for maior que um número de Weber crítico (We_{crit}), o qual pode ser obtido pela Eq. (9).

$$We_{crit} = \frac{\rho_c u'^2 d_{max}}{2\gamma} \quad (9)$$

Com, d_{\max} = Diâmetro máximo da gota, abaixo do qual não há quebra de gotas [m].

3.1 – Quebra de Gotas no Hidrociclone

Como no hidrociclone aqui estudado a fase contínua é água (baixa viscosidade), com elevado número de Reynolds para o escoamento, e o número de Reynolds das gotas, com os diâmetros utilizados neste trabalho, é superior a 1, considera-se então que a quebra das gotas seja dominada pelas forças de inércia.

Analisando as possíveis causas que poderiam levar uma gotícula de óleo a se quebrar no interior de um hidrociclone, observa-se que todas estas causas podem ser consideradas como dependentes da energia cinética e, portanto, do quadrado da vazão, ou ainda, da variação global da pressão no hidrociclone. Neste trabalho será empregado o quadrado da vazão como parâmetro para a quebra de gotas.

3.1.1 – Desenvolvimento do Modelo Matemático

Nesta seção é apresentado um modelo que considera o fenômeno da quebra de gotículas de óleo no interior do hidrociclone, bem como as eficiências de separação obtidas com o uso de cada modelo.

A hipótese adotada é que toda a quebra de gotas ocorre logo na entrada do hidrociclone, assim a distribuição de tamanho de gotas- DTG- da mistura na entrada é alterada de forma a representar uma quebra nas gotas, como função de parâmetros relacionados à vazão, bem como de constantes a serem determinadas experimentalmente. O modelo de cálculo da eficiência de separação é assim alimentado com esta nova DTG, com menores diâmetros de gotas.

3.1.1.1 – Modelo de Quebra

Apresenta-se uma abordagem simplificada do fenômeno da quebra de gotas no hidrociclone, onde a mistura de água oleosa tem a sua distribuição de tamanho de gotas discretizada em um número adequado de valores para o diâmetro $d(i)$. Buscou-se um modelo, ta que considerasse explicitamente as forças responsáveis pelo mecanismo físico da quebra de gotas (vide Corrêa Junior (2008) para maiores detalhes). Sendo assim, propôs-se a forma:

$$Fv_{\text{nov}}(i) = Fv(i)(1 - m We_{\text{mod}}^n(i)), \quad (10)$$

Onde m e n são constantes adimensionais de ajuste empírico e $We_{\text{mod}}(i)$ é um número de Weber modificado, obtido ao se considerar a relação de proporcionalidade:

$$u' \propto \left(\frac{Q}{A}\right), \quad (11)$$

Sendo A uma área característica, adotada como sendo πRc^2 (área transversal nominal do hidrociclone). Tendo assim que:

$$We_{\text{mod}}(i) = \frac{\rho_c d(i)}{2\gamma} \left(\frac{Q}{\pi Rc^2}\right)^2, \quad (12)$$

Onde, γ = Tensão interfacial [N/m].

Para i variando de 1 até o número de diâmetros discretizados, tem-se que $Fv(i)$ e $Fv_{\text{nov}}(i)$ são as frações volumétricas de óleo de uma gotícula com diâmetro $d(i)$, antes e

depois de sofrerem a quebra, e $K(i)$ é uma função dependente do diâmetro $d(i)$ e da variação da pressão no interior do hidrociclone ΔP_u , adotado neste trabalho como sendo variação entre a pressão na entrada e a pressão no *underflow*. Então, $K(i)$ define a proporção das gotas de diâmetro $d(i)$ que são quebradas. Após a quebra, os valores de $Fv_{novo}(i)$ são normalizados, para manter a massa de óleo constante.

$$Fv_{norm}(i) = \frac{Fv_{novo}(i)}{Soma} \quad (13)$$

Onde, *Soma* é o somatório dos valores de $Fv_{novo}(i)$.

Os parâmetros m e n conferem flexibilidade ao modelo para ajustar quantitativamente os dados de campo de eficiência de separação.

Nota-se que a utilização deste $We_{mod}(i)$, além de incorporar ao modelo a razão de forças responsável pela quebra das gotas confirma, por inspeção, a intuição original de que o parâmetro de quebra deve ser uma função dependente do diâmetro $d(i)$ e do quadrado da vazão de entrada no hidrociclone.

Concluindo, $mWe_{mod}^n(i)$ define a proporção das gotas de diâmetro $d(i)$ que serão quebradas.

Supondo $m = 200$ e $n = 1$, a forma final obtida para representar os efeitos da quebra de gotas de óleo no hidrociclone é:

$$Fv_{novo}(i) = Fv(i) \left(1 - 200 \frac{\rho_c d(i)}{2\gamma} \left(\frac{Q}{\pi R c^2} \right)^2 \right) \quad (14)$$

Após ser definido o modelo matemático que representa a previsão da quebra das gotículas de óleo no interior do hidrociclone, este é acoplado no modelo de cálculo da eficiência de separação no ponto imediatamente anterior ao cálculo da trajetória da gotícula, ou seja, antes da obtenção de sua trajetória. Dessa forma, as gotas são redistribuídas com as possíveis frações volumétricas após a quebra. Após a obtenção de tal trajetória, calcula-se a eficiência de separação levando em conta o fenômeno da quebra de gotas.

4. RESULTADOS

Com base em todas as informações citadas anteriormente, apresentam-se os resultados para diferentes vazões de entrada no hidrociclone.

A Fig. (10) apresenta o comportamento do parâmetro de quebra desenvolvido neste trabalho, bem como a eficiência da separação de gotas. A Tab. (1) e Fig. (11), apresentam uma comparação entre os valores obtidos pelo simulador proposto por Moraes (1994) e o proposto neste trabalho, onde se leva em consideração o fenômeno da quebra de gotas.

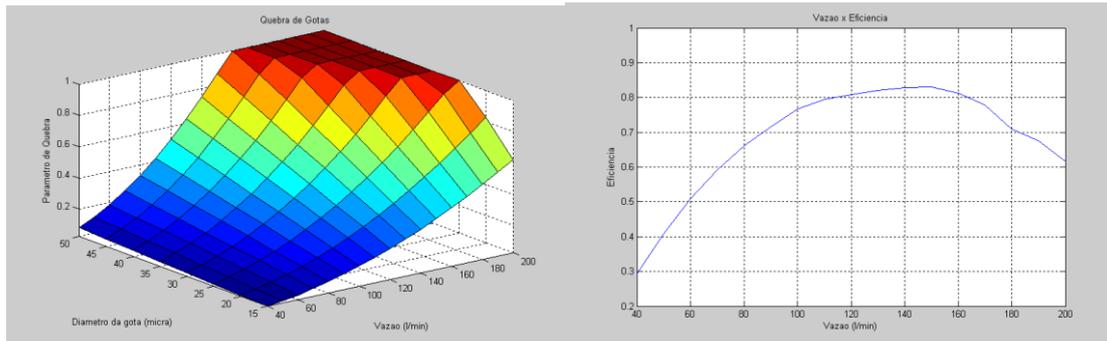


Figura 10 – valores para o parâmetro de quebra mWe_{mod}^n e Curva de eficiência da separação levando em conta a quebra de gotas.

Tabela 1- Estimativa de eficiência

Vazão de Entrada (l/min)	Eficiência sem quebra (%)	Eficiência com quebra (%)
40	29,66	29,37
50	41,30	40,76
60	51,66	50,82
70	60,45	59,27
80	67,79	66,23
90	73,50	71,54
100	79,04	76,63
110	82,28	79,38
120	84,31	80,81
130	86,25	82,00
140	88,11	82,84
150	89,78	83,09
160	90,45	81,26
170	91,09	77,90
180	91,72	70,87
190	92,32	67,45
200	92,91	61,55

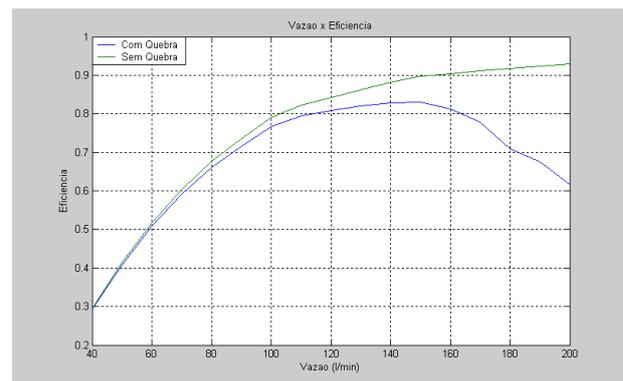


Figura 11 – Eficiência com e sem quebra de gotas.

5 – CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo principal desenvolver e implementar um modelo empírico (ou híbrido) simplificado que representasse o fenômeno da quebra de gotas de óleo em um hidrociclone, adaptando-o ao modelo de cálculo de eficiência desenvolvido por Moraes (1994).

Conforme esperado, conseguiu-se dar uma representação para o efeito do fenômeno da quebra das gotículas de óleo com o aumento da vazão de entrada no hidrociclone, através dos modelos simplificados criados neste trabalho.

A arbitrariedade na escolha para os valores dos parâmetros de ajuste empírico m e n foi cometida devido à falta de resultados experimentais e/ou numéricos disponíveis na literatura. Dessa forma, estudos experimentais devem ser realizados para que se possa

fundamentar esta escolha. As curvas de eficiência resultantes demonstram uma maior coerência com o que, qualitativamente, pode ser esperado na realidade.

Todas as simulações efetuadas para a elaboração deste trabalho utilizaram distribuições de diâmetros de gotas de óleo próximas às utilizadas no trabalho de Moraes (1994), distribuições estas perfeitamente aceitáveis dentro da faixa dos diâmetros das gotas de óleo dispersas na água que alimenta o hidrociclone nos casos reais.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Petróleo Brasileiro S/A, ao Instituto Politécnico da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, e ao Instituto do Noroeste Fluminense da Universidade Federal Fluminense, pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Corrêa Junior, C.A. – *Desenvolvimento de Modelo Computacional de Previsão de Quebra de Gotas em um Simulador de Separação de Óleo e Água em um Hidrociclone*, Dissertação de Mestrado, IPRJ/UERJ, 2008.
- Bentley, B. J. e Leal, I. G. – *An Experimental Investigations of Drop Deformation and Breakup in Steady, Two-Dimensional Linear Flow*, Journal of Fluid Mechanics, vol 167, pp.241-283, 1986.
- Briscoe, B.J. et al., – *A Review of Immiscible Fluid Mixing* – Advances in Colloid and Interface Science, 81, pp. 1-17, 1999.
- Grace, H. P. – *Dispersion Phenomena in High Viscosity Immiscible Fluid Systems and Application of Static Mixers as Dispersion Devices in Such Systems*, Chemical Engineering Communications, Vol. 14, pp 225-277, 1982.
- Moraes, C. A. C. – *Modelo Fluidodinâmico para Estimativa da Eficiência em Hidrociclone para Águas Oleosas*, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, 1994.
- Risso, F. e Fabre, J. – *Oscillations and breakup of a bubble immersed in a turbulent field*, J. of Fluid Mechanics, pp. 323 – 355, 1998.
- Stone, H. A. – *Dynamics of drop deformation and breakup in viscous fluids*, Annual Review of Fluid Mechanics, January 1994, Vol. 26, Pages 65-102 , 1994.

APÊNDICE A

COMPUTATIONAL MODELING OF THE EFFICIENCY OF SEPARATION BETWEEN WATER AND OIL IN A HYDROCYCLONE

Abstract. *This paper discusses aspects of the treatment of oily water through the hydrocyclone, the hydrocyclone features, their use for the oil industry and the flow phenomena occurring therein. From the equations of mass conservation and the linear momentum, making several simplifying considerations, we arrive at a differential equation for the current function that, after being worked, allows to obtain the set of equations used as model for the calculation of the separation efficiency of the hydrocyclone. A simplified model for the representation of the droplet breaking phenomenon is also developed. A new separation efficiency is calculated taking into account this phenomenon.*

Keywords: *Oily Waters; Hydrocyclones; Computational modeling; Breaking of Drops.*