

8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

ESTUDO NUMÉRICO DE UM MÓDULO DE SEPARAÇÃO DO TIPO
DUPLO TUBO MUNIDO DE UMA MEMBRANA CERÂMICA:
INFLUÊNCIA DA POROSIDADE

AUTORES:

Helton Gomes Alves¹, Wanessa Raphaella Gomes dos Santos¹, Flávia Daylane Tavares de Luna¹, Morgana de Vasconcellos Araújo¹, Josedita Saraiva de Souza², Antonio Gilson Barbosa de Lima¹, Severino Rodrigues de Farias Neto¹.

INSTITUIÇÃO:

¹Universidade Federal de Campina Grande ²Faculdade Maurício de Nassau.

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 8º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 20 a 22 de outubro de 2015, em Curitiba/PR. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 8º PDPETRO.

ESTUDO NUMÉRICO DE UM MÓDULO DE SEPARAÇÃO DO TIPO DUPLO TUBO MUNIDO DE UMA MEMBRANA CERÂMICA: INFLUÊNCIA DA POROSIDADE

Abstract

In the petrochemical industry during the oil prospecting is common the simultaneous production of oil, gas, water and sand, however, as the economic interest of the process is producing only hydrocarbons (oil and gas), in order to reduce transportation costs and pumping, prevent corrosion and accumulation of sediment in the pipes and equipment, the mixture goes to a separation unit. The water produced in offshore platforms, can be reused in the process or cast into the sea within the specifications set by the environmental authorities of each country. Several studies have been conducted in order to develop devices capable of performing the treatment of water produced with higher separation efficiency and financial viability together with these technologies. Thus, this paper aims to numerically evaluate the process of separating oil / water through a double type device tube fitted with a ceramic membrane with different porosities. The simulations were performed using commercial package ANSYS CFX 12.0® adopting the particle model to describe the flow of the continuous phase (water) and the dispersed phase (oil), and mass conservation and momentum equations are solved together with the turbulence model RNG k- ϵ standard. The results of the oil volumetric fraction profile in the annular space and the membrane in different axial positions along the separation module and the separation efficiency are presented and analyzed.

Introdução

Geralmente, na indústria petroquímica ocorre a produção simultânea de gás associado, óleo, água e impurezas (sais e sedimentos). A presença de gás associado no óleo deve ser removida por motivos de segurança por conter substâncias altamente corrosivas e inflamáveis. A água e as impurezas (salmoura) devem ser retiradas para diminuir além do custo de transporte e bombeamento, evitar corrosão nas tubulações e acúmulos de sedimentos nas tubulações e nos equipamentos (SILVEIRA, 200; MELO, 2007).

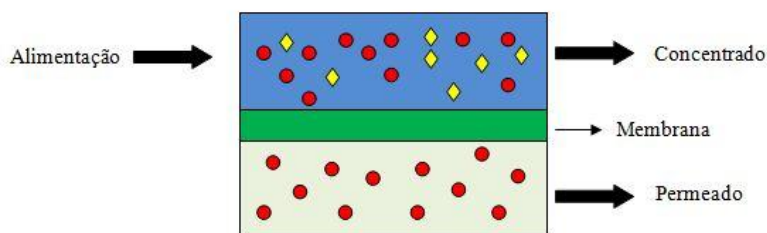
Os processos de separação de água/óleo incluem, de uma maneira geral, os métodos de decantação, coagulação/floculação, filtração, adsorção, centrifugação, ultracentrifugação, tratamentos térmicos, eletroquímicos entre outros. Porém, o processo com membranas é o que tem demonstrado a melhor relação custo/benefício e simplicidade de operação. A tecnologia com membranas tem sido intensamente investigada como técnica alternativa para a separação de emulsões estáveis de hidrocarbonetos, pois apresentam propriedades essenciais para filtração, tais como inércia química, estabilidade biológica e resistência a altas temperaturas contribuindo no processo de remoção de óleos em misturas com água (ROSA *et al.*, 2006; KIM e LEE, 2010; GOMES *et al.*, 2010; RAMAKRISHNAN e SHAILENDHRA, 2011).

Os processos de separação por membranas ocorrem, normalmente, sem que haja mudança de fase, economizando energia, e as propriedades das

membranas podem ser ajustadas de acordo com a aplicação em questão (THOMAS *et al.*, 2001).

Durante o processo de separação as membranas dividem os componentes das suspensões baseando-se no tamanho, carga, forma e interações moleculares entre soluto e sua superfície. Nesses processos, uma corrente de alimentação é fracionada em duas, o concentrado, corrente que contém os contaminantes inicialmente presentes na corrente de alimentação, e o permeado, fração de líquido que passou através da membrana, conforme pode ser observada na Figura 1.

Figura 1 – Correntes do processo de separação por membranas



Metodologia

Descrição do Problema

O domínio de estudo corresponde a um módulo do tipo duplo tubo, sendo o tubo externo o meio poroso (membrana cerâmica) de espessura de 3,5 cm, que funciona como barreira a passagem das gotículas de óleo e o tubo interno impermeável. O fluido é injetado tangencialmente por um duto retangular situado na base do módulo de separação de 2 cm² de área de seção transversal e, em seguida, passa pelo espaço anular entre os dois tubos do módulo de separação.

Na Figura 2 está representada a geometria do domínio de estudo e suas respectivas dimensões. Foi utilizado o ICEM CFD para criar o domínio de estudo a partir de criação de pontos, curvas e superfície que delimitam e compõem as dimensões do módulo. A malha estruturada foi confeccionada utilizando a estratégia de blocagem predefinida empregando elementos hexaédricos. Na Figura 3 encontra-se a malha utilizada para realizar as simulações, obtida após diferentes refinamentos foi obtida uma malha estruturada formada por 87403 elementos hexaédricos.

Figura 2 – Representação do módulo de separação munido com uma membrana cerâmica.

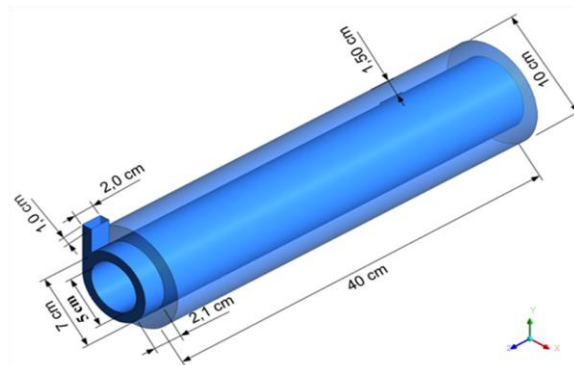
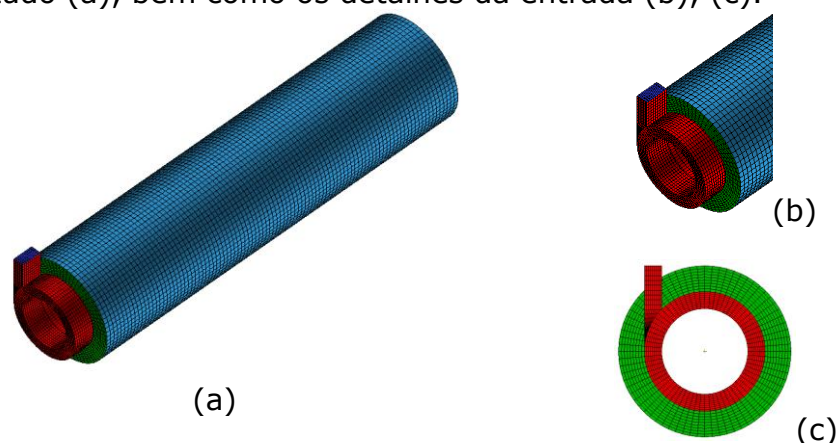


Figura 3 – Representação da malha numérica do módulo de separação em estudo (a), bem como os detalhes da entrada (b), (c).



Modelagem matemática

O modelo matemático definido para descrever o processo de separação água/óleo com auxílio de um meio poroso é baseado na generalização das equações (Navier-Stokes) de conservação de massa e quantidade de movimento adotando a abordagem Euleriana-Euleriana, bem como o modelo de turbulência RNG k-ε. Foram adotadas as seguintes considerações:

- ✓ Fluido Newtoniano incompressível e com propriedades físicas e químicas constantes;
- ✓ Regime permanente;
- ✓ Escoamento isotérmico;
- ✓ A reação química, transferência de massa entre as fases e fonte de massas são desconsiderados;
- ✓ As forças interfaciais de arraste foram consideradas;
- ✓ As gotículas de óleo (0,010 mm de diâmetro) são consideradas esféricas e não deformam;
- ✓ O modelo matemático não prediz o fenômeno de retenção das partículas ou das moléculas em um meio poroso, contudo considera a dificuldade ou a resistência à passagem das fases (óleo e água) em meios porosos;
- ✓ Adotou-se o modelo de turbulência RNG k-ε.

Com base nessas considerações as equações de conservação da massa e momento linear podem ser escritas como:

- Equação de conservação da massa:

- Para o fluido

$$\nabla \cdot (f_{\alpha} \rho_{\alpha} \vec{U}_{\alpha}) = 0 \quad (1)$$

Onde, α representa a fase (água ou óleo), f , ρ e $\vec{U}_{\alpha}$ são respectivamente a fração volumétrica, densidade e o vetor velocidade (U, V e W).

- Para o meio poroso

$$\nabla \cdot (f_{\alpha} \rho_{\alpha} K \vec{U}_{\alpha}) = 0 \quad (2)$$

onde t é o tempo, ϕ é a porosidade volumétrica e $K = (K^{ij})$ é um tensor simétrico de segunda ordem, chamado de tensor permeabilidade..

- Equação de transferência de momento linear para as fases fluidas

$$\nabla \cdot [f_\alpha (\rho_\alpha \vec{U}_\alpha \otimes \vec{U}_\alpha)] = -f_\alpha \nabla \vec{p}_\alpha + \nabla \cdot \left\{ f_\alpha \mu_e \left[\nabla \vec{U}_\alpha + (\nabla \vec{U}_\alpha)^T \right] \right\} + S_{M_\alpha} + \vec{M}_\alpha \quad (3)$$

onde p é a pressão, S_{M_α} representa o termo das forças externas que atuam sobre o sistema por unidade de volume, $\vec{M}_\alpha$ descreve a força total por unidade de volume sobre a fase α devido à interação com a fase β definido por:

$$M_\alpha = M_{\alpha\beta}^D = \frac{3C_D}{4d_p} f_\beta \rho_\alpha |\vec{U}_\alpha - \vec{U}_\beta| (\vec{U}_\alpha - \vec{U}_\beta) \quad (4)$$

onde d_p é o diâmetro da partícula e C_D é o coeficiente de arraste, o qual foi assumido igual a 0,44.

- Equação de Transferência de momento linear para o meio poroso

A equação de conservação de momento linear para meios porosos é definida pela equação:

$$\nabla \cdot [f_\alpha \rho_\alpha (\mathbf{K} \cdot \vec{U}) \otimes \vec{U}] = -\nabla \vec{p} + \nabla \cdot \left\{ f_\alpha \mu_e \mathbf{K} \cdot \left[\nabla \vec{U}_i + (\nabla \vec{U}_i)^T \right] \right\} + S_i^M \quad (5)$$

onde μ_e é a viscosidade efetiva definida pela equação (6) e S_i^M representa a fonte de quantidade de movimento linear dada pela equação (7):

$$\mu_e = \mu_\alpha + \mu_t \quad (6)$$

onde μ_α é a viscosidade dinâmica e μ_t viscosidade turbulenta (Equação 3.15).

No ANSYS CFX 12.1 a fonte de quantidade de movimento linear é representada por:

$$S_i^M = -C^{R_1} U_i - C^{R_2} |\vec{U}| \vec{U}_i + S_i^{spec} \quad (7)$$

onde C^{R_1} é o coeficiente linear de resistência, C^{R_2} é o coeficiente de resistência quadrático, S_i^{spec} outras fontes de quantidade de movimento relacionadas com as espécies químicas presentes e U e U_i são velocidades superficiais.

$$-\frac{\partial P}{\partial x_i} = \frac{\mu}{k} U_i + k_{loss} \rho |\vec{U}| \vec{U}_i \quad (8)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica, k_{loss} é o coeficiente empírico de perda (no *default* do código comercial ANSYS CFX, $k_{loss} = 0$) e $\frac{\mu}{k}$ não pode ser zero.

Condições de contorno

Para complementar a modelagem matemática foram previamente definidas algumas condições de contorno que podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades físicas e químicas da membrana e dos fluidos

Fronteira	Tipo	Condição de contorno
Filtrado	<i>Outlet</i>	$P = 99000 \text{ Pa}; \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$
Parede interna da membrana	<i>Wall</i>	$U_x = U_y = U_z = 0$
Paredes do dispositivo	<i>Wall</i>	$U_x = U_y = U_z = 0$
Saída	<i>Outlet</i>	$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$

As propriedades da água e do óleo, bem como do meio poroso utilizadas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades físicas e químicas da membrana e dos fluidos

	Propriedade	Valor
Água	Densidade (kg/m ³)	997,700
	Viscosidade (Pa/s)	$8,889 \times 10^{-4}$
Óleo	Densidade (kg/m ³)	0,917
	Viscosidade (Pa/s)	0,985
Membrana cerâmica	Porosidade	0,4403
	Permeabilidade	$2,29 \times 10^{-10}$

A eficiência do módulo de separação munido com a membrana foi avaliada pela Equação 9, a mesma foi utilizada por Husveg *et al.* (2007) e Luna (2014) analisaram a influência de taxa de fluxo de alimentação sobre a eficiência de separação do ciclone.

$$\%E = \left[1 - \left(\frac{w_p}{w_A} \right) \right] \times 10^2 \quad (9)$$

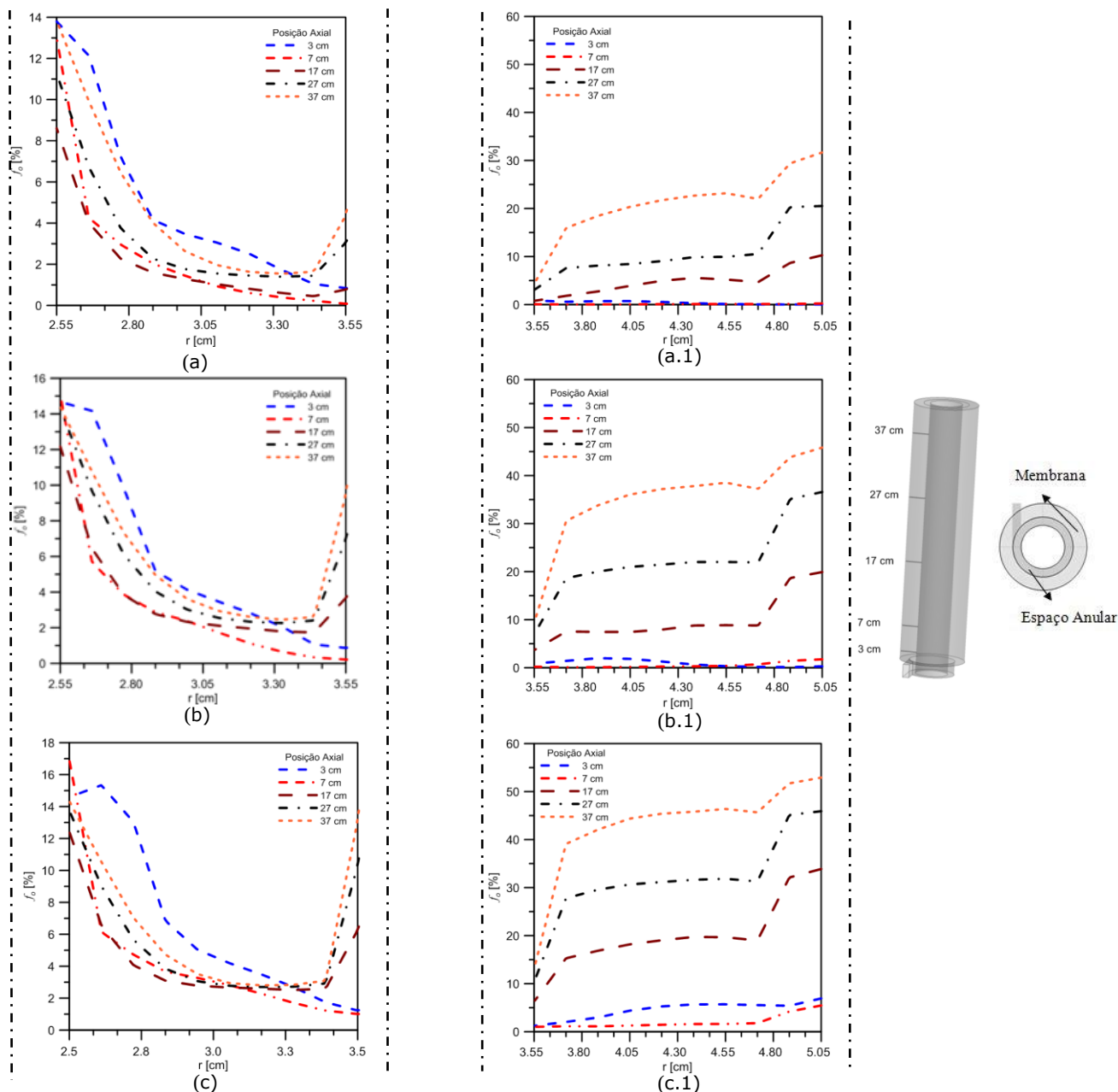
onde, %E é a eficiência de separação em termos de porcentagem, w_p é o fluxo mássico de óleo na corrente do permeado e w_A é o fluxo mássico de óleo na corrente da alimentação.

Resultados e Discussão

A Figura 4 apresenta o perfil da fração volumétrica de óleo no espaço anular e na membrana em diferentes posições axiais com o meio poroso com diferentes porosidades, 0.35, 0.40 e 0.44, respectivamente. Pode-se observar que nas três situações a), b) e c) a medida que se distancia da entrada tangencial há uma redução da concentração de óleo (fração volumétrica de óleo), por outro lado há um aumento da fração de óleo na superfície da membrana na posição radial 3,55cm. Para as situações (a.1), (b.1) e (c.1), pode-se observar que, para as porosidades avaliadas, na superfície interna da membrana ($r=3,55\text{cm}$) a fração volumétrica de óleo é baixa em consequência do movimento angular do fluido no espaço anular, que evita a penetração do óleo no meio poroso, principalmente nas posições longitudinais 3 e 7 cm. Também se pode observar a

proporcionalidade da elevação da concentração da fração volumétrica do óleo na parede externa do meio poroso (posição radial igual a $r=5,05$ cm), ou seja, a membrana com menor porosidade apresentou um filtrado com menor fração volumétrica de óleo para todas as posições axiais.

Figura 4 - – Perfil da fração volumétrica de óleo no espaço anular e na membrana em diferentes posições axiais (3; 7; 17; 27; e 37 cm) com o meio poroso com diferentes porosidades: (a) e (a.1) 0,35 ; (b) e (b.1) 0,40; (c) e (c.1) 0,44.



Foram coletados os fluxos mássicos dos fluidos na alimentação, permeado e rejeito para os casos com diferentes porosidades, em seguida foram calculadas as eficiências de separação e apresentados na Tabela 3. O módulo apresentou uma melhor eficiência com a porosidade 0,35, resultado semelhante ao obtido por Cunha (2014) ao estudar o perfil de velocidade média de permeação em função da porosidade no processo de separação água/óleo usando módulos com uma ou mais membranas cerâmicas tubulares na presença de um escoamento

turbilhonar induzido por uma entrada tangencial. Observou que com o aumento da porosidade há um aumento da velocidade média de permeação, como pode ser observado na Tabela 3 o aumento do fluxo de água no permeado, porém á também o avanço do fluido disperso (óleo).

Tabela 3- Valores de fluxo mássico dos fluidos na alimentação, permeado e rejeito, bem como a eficiência de separação de cada módulo.

Porosidade da membrana no módulo C	$W_{A;\text{óleo}}$ (Kg/s)	$W_{A;\text{água}}$ (Kg/s)	$W_{P;\text{óleo}}$ (Kg/s)	$W_{P;\text{água}}$ (Kg/s)	$W_{R;\text{óleo}}$ (Kg/s)	$W_{R;\text{água}}$ (Kg/s)	Eficiência (%)
0,35	0,34748	7,5772	0,04636	2,92047	0,30104	4,65673	86,65
0,40	0,34748	7,5772	0,12462	3,99073	0,22277	3,58647	64,13
0,44	0,34748	7,5772	0,15995	4,22885	0,18745	3,34835	53,95

Conclusões

A modelagem matemática proposta foi capaz de representar os fenômenos físicos envolvidos no processo de separação de água/óleo via membrana cerâmica. Foi possível observar um comportamento tridimensional do escoamento no interior do módulo de separação com diferentes dimensões de espaço anular. A maior eficiência de separação (86,65%) foi obtida com módulo com menor porosidade.

Agradecimentos



Referências Bibliográficas

- CUNHA, A. L. **Tratamento de efluentes da indústria De petróleo via membranas cerâmicas – Modelagem e simulação**. 2014. 201p Tese de Doutorado (Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina grande, PB, 2014.
- GOMES, M. C. S.; PEREIRA, N. C.; BARROS, S.T.D., Separation of biodiesel and glycerol using ceramic membranes, **Journal of Membrane Science**. 352, 271–276, 2010.
- KIM, A. S.; LEE, Y. T., Laminar Flow with Injection Through A Long Dead-End Cylindrical Porous Tube: Application to a Hollow Fiber Membrane. **AIChE Journal**. Vol.57, 1997-2006, 2011.
- LUNA, F. D. T. **Estudo numérico do Processo de Separação de um sistema bifásico em separador ciclônico**. 2014. 100p Dissertação de Mestrado (Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina grande, PB, 2014.
- MELO, E. M.; **Estabilidade de emulsões de petróleo em sistemas pressurizados**. 2007. 135p Dissertação de Mestrado (Engenharia de Processos), UNIT, Aracaju, SE, 2007.
- RAMAKRISHNAN, K.; SHAILENDHRA, K. **Hydromagnetic flow through uniform channel bounded by porous media**. **Applied Mathematics and Mechanics**, v. 32, n. 7, p. 837-846, 2011. ISSN 0253-4827.
- ROSA, A. J.; CARVALHO, R. S.; XAVIER, J. A. D. **Engenharia de Reservatórios de Petróleo**. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 808p. 2006
- SILVEIRA, M. A. C. R. **Controle de um processo de tratamento primário de petróleo**. 2006. 107p Dissertação de Mestrado (Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2006.