



ESTRATÉGIAS DE APLICAÇÃO DE MICRO-ONDAS EM UNIDADES MULTIMODO E MONOMODO PARA QUEBRA DE EMULSÕES DE PETRÓLEO

Denisson Santos¹, Robson L. M. Santos¹, Eloá C. L. da Rocha¹, Cláudio Dariva¹, Alexandre F. Santos¹

¹Universidade Tiradentes, NUESC/ITP – Instituto de Tecnologia e Pesquisa, Av. Murilo Dantas 300, 49032-490, Aracaju-SE, Brasil

RESUMO

Durante a produção e refino de petróleo emulsões água em óleo são formadas. Contudo, por razões econômicas e operacionais é necessário separar a água do óleo. Devido à ineficiência das técnicas atualmente disponíveis em algumas aplicações tem-se estudado a utilização de radiação micro-ondas. Assim, este trabalho tem como objetivo analisar a influência dos distintos modos de aplicação de energia micro-ondas na separação das emulsões. Para tanto, foram realizados testes de quebra com emulsões sintetizadas em laboratório. Essas emulsões foram caracterizadas quanto à distribuição do tamanho de gotas e teor de água. Em seguida, as amostras de emulsão foram processadas em reatores micro-ondas. Após o processamento, foram caracterizadas quanto ao teor de água a fim de constatar a eficiência do processo. O tempo de processamento não provocou alterações consideráveis na eficiência de separação via aquecimento monomodo, diferente do aquecimento multimodo. O sistema em fluxo contínuo, por sua vez, requer o estudo da influência de outras variáveis sobre a eficiência de separação. Em ambos os modos de aquecimento, verificou-se que o teor de água, a temperatura e, sobretudo, a energia total aplicada são parâmetros preponderantes ao se almejar maiores eficiências de processamento. O aquecimento monomodo necessitou de menores quantidades de energia que o aquecimento multimodo para atingir a mesma temperatura e/ou eficiência de separação. A presença de aditivos tende a minimizar os eventuais efeitos do modo de irradiação sobre a eficiência de separação, indicando que o uso combinado de micro-ondas e aditivos químicos constitui estratégia adequada no processamento de emulsões altamente estáveis.

Palavras-chave: petróleo, emulsão, micro-ondas.

1. INTRODUÇÃO

A radiação micro-ondas tem sido empregada no desenvolvimento de tecnologias das mais diversas áreas, tornando-se largamente utilizada na produção de materiais nano-metálicos (Nyutu et al., 2008; Jin et al., 2011; Siddiquey et al., 2011), indústria de

alimentos (Lü e Zhou, 2011; Satpathy et al., 2011; Botha et al., 2012; Heredia et al., 2012), síntese orgânica (Perin et al., 2011; Fidalgo et al., 2011), tratamento de biomassa (Budarin et al., 2011; Chen et al., 2011) e indústria petrolífera (Fortuny et al., 2007; Fortuny et al., 2008; Guzmán-Lucero et al., 2010). Nesta última há possibilidade de aplicações nas etapas de processamento e refino do petróleo.



As características inerentes à interação das micro-ondas com a matéria é o que a torna comum a áreas tão distintas. O mecanismo de aquecimento a nível molecular gerado por tal interação produz um aquecimento volumétrico e seletivo singular. Assim, permitindo-se atingir temperaturas mais altas em tempos menores e de forma mais eficiente quando comparada ao aquecimento convencional. Isto permite a redução no tempo de reações de síntese orgânica e inorgânica, com aumento de rendimento e pureza dos produtos; secagem de alimentos e decomposição de biomassa a menores tempo e temperatura; e aquecimento localizado nas gotículas de sistemas emulsionados.

Por possuir tensoativos naturais e ser produzido juntamente com a água presente no subsolo, o petróleo pode formar emulsões altamente estáveis. Tais emulsões geram problemas para a indústria, uma vez que devido a sua elevada viscosidade, elas prejudicam o sistema de bombeio e transferência, comprometem certas operações nas refinarias, representam volume ocioso na transferência e tancagem do petróleo e geram problemas de incrustação e corrosão nos oleodutos de exportação (Borges et al., 2009).

Para minimizar estes efeitos, as companhias produtoras dispõem de processos de desestabilização e separação daquelas emulsões. Dentre tais processos destacam-se a separação gravitacional, tratamento térmico, tratamento químico (adição de agentes desemulsificantes e/ou ajuste de pH) e aplicação de campos de alta voltagem. Contudo, em alguns casos eles são ineficientes ou requerem equipamentos de grande porte que não podem ser facilmente instalados em plataformas marítimas (Fortuny et al., 2008). Mais comumente utilizadas, juntas ou separadamente, essas técnicas apresentam alta demanda energética e tempos de residência longos. Isto também

inviabiliza os métodos de processamento convencionais, principalmente quando se trata de produção marítima. Com isso, surge o desafio tecnológico no tocante ao desenvolvimento de novas técnicas de processamento de emulsões com vistas a superar as limitações citadas.

Neste cenário, o processamento *via* aquecimento por radiação micro-ondas surge como alternativa promissora. Uma vez que se dá de maneira localizada, a amostra é aquecida do seu seio para fora, em contraposição ao aquecimento superficial gerado pelo método convencional. Além da redução na demanda energética, há ali também a diminuição no tempo de processamento com maior eficiência de desestabilização das emulsões. Todavia, a aplicação do aquecimento dielétrico gerado pelas micro-ondas não aparece como técnica substituta àquelas já estabelecidas, mas auxiliar.

Assim, é de extrema importância para a indústria compreender as melhores maneiras de se aplicar o aquecimento micro-ondas a fim de encontrar solução para os problemas típicos encontrados durante as etapas de desemulsificação. Essa demanda é oriunda tanto nas plantas de processamento primário de petróleo quanto nos sistemas de dessalgação dispostos nas refinarias. Mas não só nestes casos, já que além do processamento de emulsões, em outros segmentos de interesse da indústria petrolífera a literatura reporta vantagens na aplicação de radiação micro-ondas (Wolf, 1978; Fang e Lai, 1994; Fortuny et al., 2007; Leadbeater e Khan, 2008; Hascakir et al., 2009; Fortuny et al., 2010; Guzmán-Lucero et al., 2010), Kingman et al., (2010), Nour et al., (2010), Nour et al., (2010), Shang et al., (2011), Ferreira et al., (2013).

No entanto, a maioria dos estudos acerca do emprego de radiação micro-ondas nas diversas áreas até hoje publicados foram desenvolvidos em



fornos domésticos ou em reatores multimodo. São raros os relatos que tratem da aplicação de micro-ondas por meio de reatores monomodo. Sobretudo, inexistem trabalhos com vistas a comparar os distintos modos de aplicação da radiação no tocante à eficiência de aquecimento e demanda energética. A literatura carece ainda de relatos que tratem do processamento de emulsões *via* micro-ondas em processo contínuo. Essa constatação retrata a relevância do presente trabalho, pioneiro em tal abordagem.

2. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho foi selecionado um petróleo oriundo da Bacia de Campos, Rio de Janeiro, aqui denominado óleo BR. Apesar de serem provenientes do mesmo campo produtor, as amostras do petróleo BR foram coletadas de pontos distintos na corrente de produção. Assim, têm-se os lotes de óleo BR1, BR2 e BR3. Os dois primeiros provieram de tanques de armazenamento e continham aditivos químicos. No entanto, o BR1 consiste de um *blend* entre óleos produzidos das camadas geológicas de pré-sal e pós-sal, enquanto o óleo BR2 provém apenas desta última. O terceiro, por sua vez, foi captado diretamente da cabeça do poço e estava isento daqueles aditivos. Todos os lotes foram caracterizados em laboratório a fim de avaliar alguns parâmetros básicos relacionados à sua composição química e propriedades físicas, e confirmar dados de caracterização. Estas informações são indispensáveis a um melhor conhecimento acerca do comportamento do petróleo estudado e estão apresentadas no trabalho de Santos (2013).

A fim de realizar avaliação da eficiência dos métodos de aquecimento micro-ondas na quebra de emulsões de petróleo, foram sintetizadas emulsões água/óleo estáveis a partir do petróleo

pré-selecionado. Para tanto, foi utilizada fase aquosa isenta de sal com teor variando entre 30, 40 e 50% (m/m). Os testes realizados foram divididos em três grupos, denominados PF (planejamento fatorial), PAQ (perfil de aquecimento) e CST (cinética de separação por variação de temperatura). A metodologia de síntese das emulsões variou conforme o conjunto experimental e está também descrita em Santos (2013).

Após a síntese, as emulsões foram caracterizadas quanto à distribuição de tamanho de gotas (DTG) e teor de água (TA). Na primeira caracterização utilizou-se da técnica de difração a laser por meio do analisador de tamanho de partículas Mastersizer 2000 (Malvern), conforme relatado em Fortuny *et al.* (2007). A segunda, por sua vez, foi desenvolvida através de titulação potenciométrica empregando reagente Karl-Fischer. Para isso utilizou-se do titulador Titrino plus 870 Metrohm equipado com eletrodo duplo de platina, seguindo procedimento ditado pela norma ASTM D4377.

Uma vez adequadas aos parâmetros pré-determinados (DTG e TA), as emulsões foram desestabilizadas em distintos reatores micro-ondas. Em todos os testes a mesma emulsão era processada em concomitância nos modos de desestabilização estudados. Contudo, por almejar objetivos diferentes, foram delineados os três conjuntos experimentais supracitados, os quais possuíam características também distintas. Os parâmetros experimentais estão apresentados nas tabelas a seguir.

Tabela 1: Testes e condições dos conjuntos experimentais PAQ e CST.

| Teste | Temperatura (°C) | Tempo de processamento (min) | Teor de água (%) |
|-------|------------------|------------------------------|------------------|
| PAQ | 80 | 30 | 30 |
| CST1 | 90 | 15 | 30 |
| CST2 | 120 | 15 | 30 |
| CST3 | 150 | 15 | 30 |
| CST4 | 180 | 15 | 30 |



Tabela 2: Planejamento fatorial desenvolvido com o petróleo BR2 – variáveis codificadas.

| Teste | x1 | x2 | x3 |
|-------|----|----|----|
| PF1 | -1 | -1 | -1 |
| PF2 | +1 | -1 | -1 |
| PF3 | -1 | +1 | -1 |
| PF4 | +1 | +1 | -1 |
| PF5 | -1 | -1 | +1 |
| PF6 | +1 | -1 | +1 |
| PF7 | -1 | +1 | +1 |
| PF8 | +1 | +1 | +1 |
| PF9 | 0 | 0 | 0 |
| PF10 | 0 | 0 | 0 |
| PF11 | 0 | 0 | 0 |

Tabela 3: Planejamento fatorial desenvolvido com o petróleo BR2 – variáveis decodificadas.

| Variáveis decodificadas | Parâmetros experimentais decodificados | | |
|----------------------------------|--|-----|-----|
| | -1 | 0 | +1 |
| x1: temperatura (°C) | 120 | 150 | 180 |
| x2: tempo de processamento (min) | 10 | 20 | 30 |
| x3: teor de água (%) | 30 | 40 | 50 |

Os testes PAQ e CST foram desenvolvidos com os três lotes de petróleo estudados. Ambos foram desenvolvidos em reatores micro-ondas monomodo (Discover SP, CEM) e multimodo (Synthos 3000, Anton Paar) operando em batelada. Contudo, nos testes PAQ utilizou-se ainda o aquecimento convencional *via* banho termostático. O óleo BR2 foi o único utilizado nos testes PF. Neste conjunto experimental, além dos reatores em batelada já citados, as emulsões foram também processadas em fluxo contínuo por meio do reator multimodo FlowSYNTH (Milestone).

Nos ensaios em que foi observada a formação de água livre, a fase óleo e/ou emulsão não resolvida foi parcialmente recuperada e caracterizada em termos de teor de água após homogeneização. A partir dos teores de água da emulsão sintetizada (TA_0) e da emulsão não resolvida (TA_f) determinou-se a eficiência da separação (EF) por meio da Equação 1.

$$EF = \frac{TA_0 - TA_f}{TA_0} \times 100\% \quad (1)$$

Foram realizadas ainda medidas de tensão interfacial dos três lotes de petróleo estudados em meio aquoso, utilizando água ultrapura como fase contínua. Para isto foi empregado tensiômetro de gota pendente/ascendente Tracker (Teclis) disposto em mesa com controle de vibração a ar comprimido modelo 63-651 (TMC). A incerteza da medida de tensão pelo método é bastante reduzida e está estimada em 0,2 mN/m. Os detalhes da metodologia de determinação da tensão interfacial através do método da gota ascendente podem ser encontrados em Jennings Jr. e Pallas (1998).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As emulsões sintetizadas neste trabalho apresentavam curvas de DTG bimodais. O tamanho médio de gotas abaixo de 10 μm lhes conferiu estabilidade semelhante àquelas verificadas na indústria, as quais demandam técnicas de desestabilização avançadas (Kunert *et al.*, 2006; Lucas e Oliveira, 2008). Realizou-se monitoramento do nível de estabilidade das emulsões durante quatro horas, tempo total de desenvolvimento dos testes de desestabilização. Esse tempo de envelhecimento permitiu a coalescência e consequente aumento no tamanho de gotas das fases dispersas (Figura 1). Isso se deu provavelmente



devido a adição de determinados agentes químicos à carga do óleo estudado.

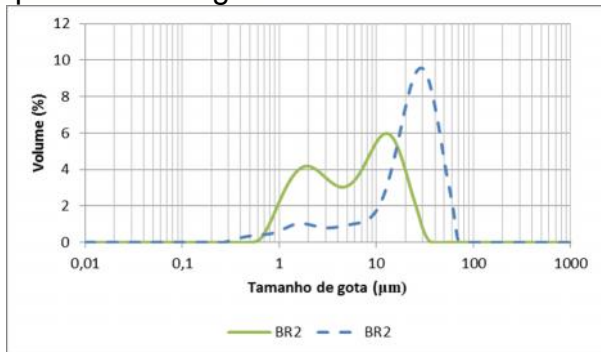


Figura 1: Curvas de distribuição de tamanho de gotas da fase dispersa imediatamente após síntese da emulsão (linha contínua) e após envelhecimento de quatro horas (linha tracejada).

Com os resultados de desestabilização obtidos *via* aquecimento micro-ondas monomodo em batelada construiu-se o modelo abaixo apresentado, no qual y é a eficiência de separação, x_1 representa a variável normalizada relativa à temperatura ($^{\circ}\text{C}$), x_2 representa a variável normalizada relativa ao tempo (minutos) e x_3 representa a variável normalizada relativa ao teor de água (%). Os coeficientes a_i são proporcionais ao efeito de cada variável (metade do efeito) e os coeficientes a_{ij} representam os efeitos de interação entre o par de variáveis i e j . O parâmetro b representa o valor da variável dependente (eficiência da separação) quando todas as demais variáveis estão no seu valor médio. Os coeficientes de regressão estimados são apresentados abaixo, nos quais foi observado erro padrão de 1,28.

$$y = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_{12} \cdot x_1 x_2 + a_{13} \cdot x_1 x_3 + a_{23} \cdot x_2 x_3 + b \quad (2)$$

$$b = 87,21; a_1 = 10,27; a_2 = 1,54; a_3 = 4,87; \\ a_{12} = -1,41; a_{13} = -3,78; a_{23} = -1,85$$

A Figura 2 apresenta um diagrama de dispersão entre os valores preditos pelo modelo e os resultados experimentais observados. Observou-se

coeficiente de correlação (R^2) de 0,88 e média quadrática do erro puro de 26,34. O incremento desse erro ocorreu devido a maior variação na eficiência de separação verificada na combinação dos menores níveis dos parâmetros experimentais.

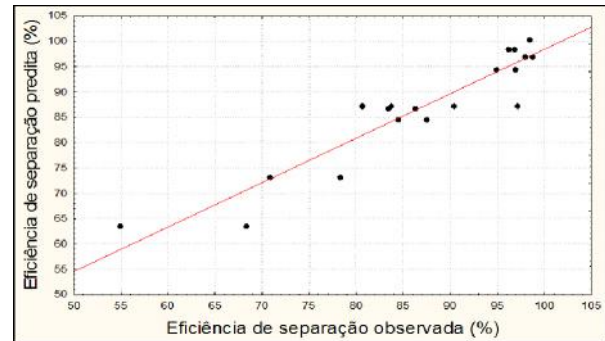


Figura 2: Diagrama de dispersão dos dados de eficiência de separação *via* processamento micro-ondas monomodo em batelada ajustados conforme Equação 4 por regressão linear múltipla.

O diagrama de Pareto (Figura 3) traz uma análise dos efeitos avaliados e suas interações sobre a eficiência de separação dos sistemas emulsionados. Com nível de confiança de 95%, pode-se constatar que a alteração de temperatura foi o parâmetro que mais influenciou no processamento *via* micro-ondas monomodo. Conforme já relatado por Fortuny *et al.* (2007), o aumento de temperatura é um dos fatores aos quais é atribuído o processo de separação de emulsões água/óleo, pois produz redução da viscosidade da fase oleosa e favorece a coalescência e sedimentação de gotas da fase dispersa. Pode-se notar ainda que neste tipo de aquecimento os tempos estudados não provocaram alteração significativa na eficiência de desestabilização.

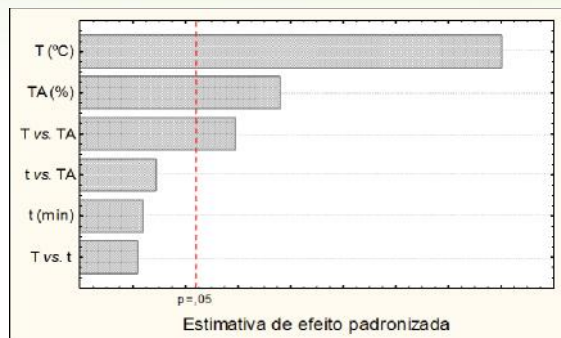


Figura 3: Estimativa de efeito dos parâmetros experimentais analisados no processamento micro-ondas monomodo em batelada representado em diagrama de Pareto com nível de confiança de 95%.

A alteração do volume de fase aquosa do sistema emulsionado apresenta-se como segundo fator a influenciar o processo de quebra. O incremento neste parâmetro pode influenciar diretamente o processo de coalescência das gotas emulsionadas, reduzindo a distância entre elas e aumentando a probabilidade de colisão. Além disso, as propriedades dielétricas do sistema são alteradas com tendência a favorecer o aquecimento dielétrico. Pode-se notar ainda no diagrama de Pareto um sinergismo estatisticamente significativo entre as variáveis temperatura e teor de água.

Na análise dos dados de desestabilização obtidos *via* processamento em batelada multimodo utilizou-se também de um modelo empírico de regressão linear múltipla. Assim como no processamento em batelada monomodo, foram desconsiderados os termos quadráticos do modelo, conforme pode ser verificado na Equação 3. Os coeficientes de regressão estimados são apresentados abaixo, nos quais foi observado erro padrão de 0,45.

$$y = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_{12} \cdot x_1 x_2 + a_{13} \cdot x_1 x_3 + a_{23} \cdot x_2 x_3 + a_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + b \quad (3)$$

$$b = 89,89; a_1 = 6,16; a_2 = 4,89; a_3 = 3,29; a_{12} = -4,72; a_{13} = -2,31; a_{23} = -2,42; a_{123} = 2,17$$

O ajuste do modelo obtido com os resultados experimentais observados apresentou coeficiente de correlação (R^2) de 0,98 e está apresentado na Figura 4. A média quadrática do erro puro foi de 2,47. A tamanha diferença entre as médias dos erros observados denota o maior ajuste dos dados de eficiência obtidos *via* aquecimento micro-ondas multimodo com seu respectivo modelo quando comparado àquele observado *via* aquecimento monomodo.

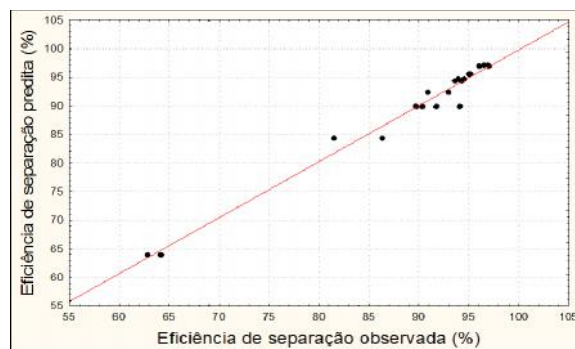


Figura 4: Diagrama de dispersão dos dados de eficiência de separação *via* processamento micro-ondas multimodo em batelada ajustados conforme Equação 3 por regressão linear múltipla.

Conforme Figura 5, todas as variáveis analisadas no aquecimento micro-ondas multimodo apresentaram efeito sobre a eficiência de separação, assim como suas interações binárias e ternária. Neste tipo de aquecimento nota-se claramente a sequência e a inter-relação entre aquelas variáveis.

A redução de viscosidade da fase oleosa provocada pelo aumento de temperatura favorece a colisão e coalescência das gotas emulsionadas. O aumento no teor de água da emulsão aumenta a probabilidade de colisão entre as gotas e facilita o aumento de temperatura. O maior tempo de processamento, por sua vez, auxilia no processo de sedimentação das gotas



coalescidas e a conseqüente separação de fases. Assim, ao promover-se a aplicação deste tipo de aquecimento nas plantas de processamento industriais, deve-se buscar o ponto ótimo entre os três parâmetros estudados.

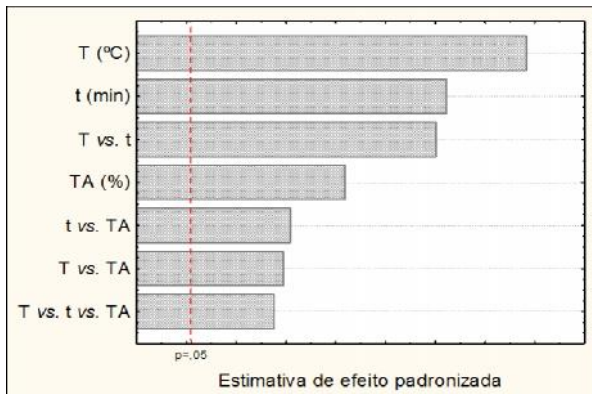


Figura 5: Estimativa de efeito dos parâmetros experimentais analisados no processamento micro-ondas multimodo em batelada representado em diagrama de Pareto com nível de confiança de 95%.

O aumento de temperatura foi um fator comum a ambos os modos de aplicação de radiação estudados quanto a melhorias nas eficiências de quebra das emulsões. Contudo, o processamento de emulsões em escala industrial é incompatível com o processo em batelada. Uma vez que para tal seria necessária a utilização de reatores de potência muito alta, indisponíveis tecnologicamente. Neste cenário, buscou-se analisar maneiras de simular em escala laboratorial o processamento em fluxo contínuo, de modo a explorar a tecnologia micro-ondas em condições mais próximas da realidade industrial.

Nos primeiros minutos de aquecimento em fluxo contínuo a eficiência de separação se manteve entre 50 e 70%. Contudo, verificou-se que no decorrer do processamento a eficiência de separação se manteve em torno de 70% (Figura 6), ainda que independentemente da variação no teor de água emulsionada e temperatura de processamento, em contraposição ao que foi observado no processo em batelada.

Isto sugere que a adição dos parâmetros vazão e regime de fluxo anulam parcialmente os efeitos gerados pela variação de temperatura e teor de água. Contudo, ainda são extremamente necessários estudos mais aprofundados que investiguem a influência de tais parâmetros em conjunto.

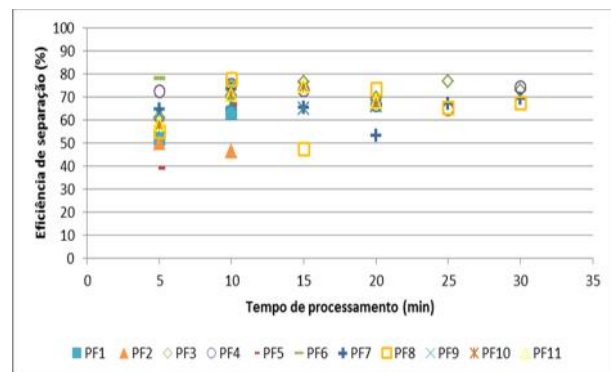


Figura 6: Eficiência de separação de sistemas emulsionados via aquecimento multimodo em processamento contínuo monitorado durante 30 minutos às temperaturas de 120 °C, 150 °C e 180 °C conforme planejamento experimental.

4. CONCLUSÕES

No processamento de petróleos semelhantes ao BR, o aquecimento monomodo apresentará dependência maior com as propriedades pontuais dos sistemas emulsionados. Ademais, teor de água da emulsão e temperatura de processamento serão fatores que produzirão efeito na eficiência final do processo. Para o aquecimento multimodo de emulsões daquele petróleo o tempo de processamento deve ser também um fator considerado. Dessa forma, a eficiência de separação pode ser otimizada buscando-se a melhor combinação entre os parâmetros tempo, temperatura e teor de água inicial.

Quanto ao processamento em fluxo contínuo, a conclusão a que se pode chegar é que a variação dos parâmetros estudados (tempo, temperatura e teor de água) atinge um nível máximo de eficiência de separação. A associação



destes parâmetros com a vazão e regime de fluxo da emulsão deve ser objeto de estudos futuros. Uma vez que o ponto ótimo no qual o aprimoramento no processamento daquelas emulsões em fluxo contínuo deve estar na melhor associação daqueles cinco fatores.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(ASTM), American Society for Testing and Materials. Standard ASTM D4377 - 00. **Standard Test Method for Determination of Water in Crude Oils by Potentiometric Karl Fischer Titration.** ASTM International: West Conshohocken, 2011.

BORGES, B.; RONDÓN, M.; SERENO, O.; ASUAJE, J. **Breaking of Water-in-Crude-Oil Emulsions. 3. Influence of Salinity and Water-Oil Ratio on Demulsifier Action.** *Energy Fuels*, 23 (2009), 1568-1574.

BOTHA, G. E.; OLIVEIRA, J. C.; AHRNÉ, L. **Microwave assisted air drying of osmotically treated pineapple with variable power programmes.** *J. Food Eng.*, 108 (2012), 304-311.

BUDARIN, V. L.; ZHAO, Y.; GRONNOW, M. J.; SHUTTLEWORTH, P. S.; BREEDEN, S. W.; MACQUARRIE, D. J.; CLARK, J. H. **Microwave-mediated pyrolysis of macro-algae.** *Green Chem.*, 13 (2011), 2330-2333.

CHEN, W.-H.; Tu, Y.-J.; SHEEN, H.-K. **Disruption of sugarcane bagasse lignocellulosic structure by means of dilute sulfuric acid pretreatment with microwave-assisted heating.** *Appl. Energy*, 88 (2011), 2726-2734.

FANG, C. S.; LAI, P. M. J. **Microwave Power Electromagnetic.** *Energy Fuels*, 30 (1995), 46-57.

FERREIRA, B. M. S.; RAMALHO, J. B. V. S.; LUCAS, E. F. **Demulsification of Water-in-Crude Oil Emulsions by Microwave Radiation: Effect of Aging, Demulsifier Addition, and Selective Heating.** *Energy Fuels*, 27(2) (2012), 615-621.

FORTUNY, M.; OLIVEIRA, C. B. Z.; MELO, R. L. F. V.; NELE, M.; COUTINHO, R. C. C.; SANTOS, A. F. **Effect of Salinity, Temperature, Water Content, and pH on the Microwave Demulsification of Crude Oil Emulsions.** *Energy Fuels*, 21 (2007), 1358-1364.

FORTUNY, M.; RAMOS, A. L. D.; DARIVA, C.; EGUES, S. M. S.; SANTOS, A. F. **Principais aplicações das microondas na produção e refino de petróleo.** *Quim. Nova*, 31(6) (2008), 1553-1561.

GUZMÁN-LUCERO, D.; FLORES, P.; ROJO, T.; MARTINEZ-PALOU, R. **Ionic Liquids as Demulsifiers of Water-in-Crude Oil Emulsions: Study of the Microwave Effect.** *Energy Fuels*, 24 (2010), 3610-3615.

HEREDIA, A.; PEINADO, I.; ROSA, E.; ANDRÉS, A.; **Escriche, I. Volatile profile of dehydrated cherry tomato: Influences of osmotic pre-treatment and microwave power.** *Food Chem.*, 130 (2012), 889-895.

JIN, Y.; LI, C.; XU, Z.; CHENG, Z.; WANG, W.; LI, G. LIN, J. **Microwave-assisted hydrothermal synthesis and multicolor tuning luminescence of YP_xV_{1-x}O₄:Ln³⁺ (Ln=Eu, Dy, Sm) nanoparticles.** *Mater. Chem. Phys.*, 129 (2011), 418-423.

LEADBEATER, N. E.; KHAN, M. R. **Microwave-Promoted Desulfurization of Heavy and Sulfur-Containing Crude Oil.** *Energy Fuels*, 22 (2008), 1836-1839.



LEMOS, R. C. B.; DA SILVA, E. B.; DOS SANTOS, A.; GUIMARÃES, R. C. L.; FERREIRA, B. M. S.; GUARNIERI, R. A.; DARIVA, C.; FRANCESCHI, E.; SANTOS, A. F.; FORTUNY, M. **Demulsification of Water-in-Crude Oil Emulsions Using Ionic Liquids and Microwave Irradiation.** *Energy Fuels*, 24 (2010), 4439-4444.

LÜ, J.; ZHOU, P. **Optimization of microwave-assisted FeCl₃ pretreatment conditions of rice straw and utilization of *Trichoderma viride* and *Bacillus pumilus* for production of reducing sugars.** *Bioresour. Technol.*, 102 (2011), 6966-6971.

NOUR, A. H.; PANG, S. F.; OMER, M. S. **Demulsification of Water-in-Crude Oil (W/O) Emulsion by using Microwave Radiation.** *J. Appl. Sci.*, 10 (22) (2010), 2935-2939.

NYUTU, E. K.; CONNER, W. C.; AUERBACH, S. M.; CHEN, C.-H.; SUIB, S. L. **Ultrasonic Nozzle Spray in Situ Mixing and Microwave-Assisted Preparation of Nanocrystalline Spinel Metal Oxides: Nickel Ferrite and Zinc Aluminate.** *J. Phys. Chem. C*, 112 (2008), 1407-1414.

OSPELKAUS, C.; WARRING, U.; COLOMBE, Y.; BROWN, K. R.; AMINI, J. M.; LEIBFRIED, D.; WINELAND, D. J. **Microwave quantum logic gates for trapped ions.** *Nature*, 476 (2011), 181-184.

SANTOS, D. **Estratégias de Aplicação de Micro-ondas em Unidades Monomodo e Multimodo para Quebra de Emulsões de Petróleo.** M.Sc. Thesis (in Portuguese), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Tiradentes, Aracaju-SE, Brasil, 2013.

SATPATHY, G.; TYAGI, Y. K.; GUPTA, K. **A novel optimised and validated**

method for analysis of multi-residues of pesticides in fruits and vegetables by microwave-assisted extraction (MAE)-dispersive solid-phase extraction (d-SPE)-retention time locked (RTL)-gas chromatography-mass spectrometry. *Food Chem.*, 127 (2011), 1300-1308.

SIDDIQUEY, I. A.; FURUSAWA, T.; SATO, M.; BAHADUR, N. M.; UDDIN, M. N.; SUZUKI, N. **A rapid method for the preparation of silica-coated ZrO₂ nanoparticles by microwave irradiation.** *Ceram. Int.*, 37 (2011), 1755-1760.

WOLF, N. O. **Use of microwave radiation in separating emulsions and dispersions of hydrocarbons and water.** 4.582.629, 15 de April de 1978.