

# Análise do tempo de mistura empregado na homogeneização de tanques de estocagem de petróleo

Palavras-Chave: Petróleo, tempo de mistura, borra

Autores/as:

Maria Estela Oliveira da Silva, FEQ – Unicamp

Gilberto Ribeiro Pinto Junior (co-orientador), FEQ – Unicamp

Prof. Dr. José Roberto Nunhez (co-orientador), FEQ – Unicamp

Prof. Dr. Guilherme José de Castilho (orientador), FEQ - Unicamp

## INTRODUÇÃO:

Globalmente, a indústria petrolífera é crucial, impactando a economia, a política e o cotidiano. No Brasil, o setor é estrategicamente importante e ganhou destaque após a descoberta do Pré-sal em 2007, reduzindo a dependência de importações e destacando a Petrobras como líder no país com seu centro tecnológico de refinação (COSTA, 2014).

O petróleo, um fluido viscoso composto principalmente por hidrocarbonetos, é gerenciado com foco na otimização de seu processamento, apesar de desafios como a formação de borra nos tanques de armazenamento. A borra, formada por água e resíduos pesados, reduz a capacidade útil dos tanques e a agitação constante necessária para preveni-la é energeticamente cara (CLARK et al., 1977; GUIMARÃES et al., 2016).

Para abordar esse problema, uma pesquisa financiada pela Petrobras visa analisar a homogeneização de uma solução salina em tanques com impelidores laterais, determinando o tempo mínimo necessário para a agitação e

simplificando o sistema de armazenamento. Condutímetro será usado para monitorar a homogeneidade da solução (FREITAS, 2020).

## METODOLOGIA:

Os experimentos são conduzidos em um tanque com capacidade aproximada de 4000 litros, com 2,0 metros de diâmetro e 1,33 metros de altura. Este tanque possui três impelidores laterais do tipo naval, como ilustrado na Figura 1.

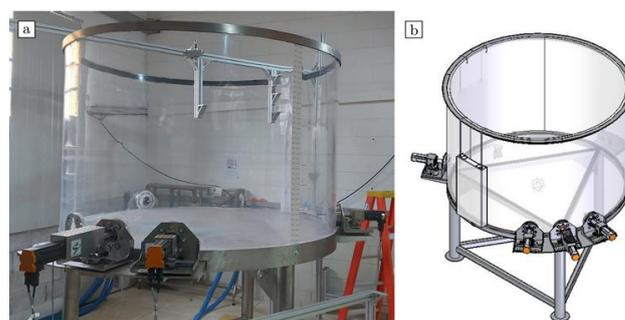


Figura 1 – Tanque piloto: a) Aparato Experimental e b) Representação Esquemática.

Uma solução salina de NaCl a 62,5 g/L é usada como traçador e adicionada ao tanque, que foi previamente preenchido com água, em quantidades conforme os parâmetros da Tabela 1. A condutividade da mistura é medida com

condutivímetros Hanna HI-98192, posicionados nas áreas de interesse.

Para determinar o tempo de mistura, foi escolhido o método de medição da condutividade, considerado o mais adequado para este projeto devido ao seu baixo custo, à possibilidade de reutilização do fluido em análise

e à sua aplicação conforme revisão bibliográfica. Assim, os dados de condutividade foram coletados em seis pontos distintos. Foram avaliados os efeitos das condições operacionais, levando em conta a variação no nível, a angulação e a distribuição do sistema, como detalhado na Tabela 1.

Tabela 1 - Fatores x Nível dos fatores		
Fatores	Nível dos fatores (-1)	Nível dos fatores (+1)
Disposição dos impelidores	Agrupado	Distribuído
Inclinação dos Impelidores (°)	0	15
Nível do tanque (cm)	30	40

Tabela 2 – Parâmetros experimentais que podem influenciar no tempo de mistura.

Neste estudo, a rotação foi fixada em 600 rpm e o número de impelidores em 3. Condutivímetros à prova d'água, posicionados estrategicamente no tanque, medem a condutividade a cada 5 segundos. O procedimento inclui a limpeza do tanque com detergente neutro, a instalação dos condutivímetros em pontos previamente definidos, visto na Figura 3, e a adição da solução salina à água do tanque.

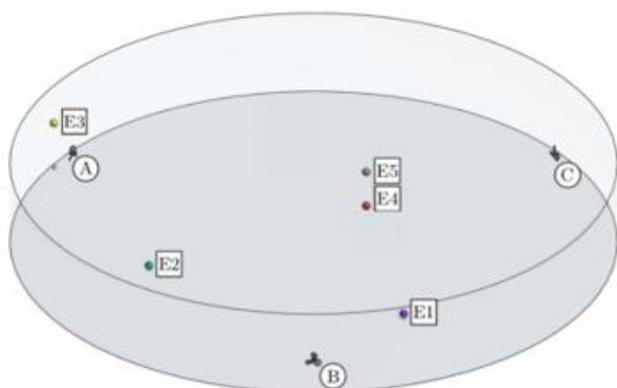


Figura 2 - Configuração da disposição dos condutivímetros.

O tempo de mistura é calculado quando a condutividade atinge 95% do valor esperado. Após preencher o tanque com água e ativar os impelidores, espera-se 15 minutos para estabilizar o escoamento antes de iniciar a operação e registrar os dados necessários.

Para avaliar o impacto de cada parâmetro listado na Tabela 1, será realizada uma análise com um Planejamento Fatorial  $2^3$ , que gera 8 cenários para estudo. Este método visa estimar o sistema e examinar a influência de três efeitos principais, permitindo uma análise detalhada das interações entre os parâmetros do sistema (FATIBELLO-FILHO et al. 2010). Os experimentos foram repetidos em duplicata, totalizando 16 ensaios a serem avaliados, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Ensaio x Parâmetros			
Ensaio	Disposição dos Impelidores	Inclinação dos Impelidores	Nível do Tanque
1 e 5	Distribuído	0	30
2 e 6	Distribuído	15	30
3 e 7	Distribuído	0	40
4 e 8	Distribuído	15	40
9 e 13	Agrupado	0	30
10 e 14	Agrupado	15	30
11 e 15	Agrupado	0	40
12 e 16	Agrupado	15	40

Tabela 2 – Configuração dos fatores presentes no tanque.

O método utilizado para analisar os dados e determinar o tempo de mistura é detalhado em (BROWN, 2004), e sua aplicação em estudos anteriores mostrou resultados consistentes com os objetivos deste projeto. Aqui está uma breve descrição desse método.

Inicialmente, os valores medidos são normalizados usando a Equação 1:

$$C'_t = \frac{C_t - C_0}{C_\infty - C_0} \quad (1)$$

A condutividade elétrica, denotada por  $C$ , é um parâmetro chave na análise.  $C_t$  representa a condutividade em cada instante  $t$ ,  $C_0$  é a condutividade inicial do tanque (antes da adição do traçador), e  $C_\infty$  é a condutividade final.  $C'_t$  é o valor normalizado, variando de 0 a 1.

Para maior precisão, recomenda-se plotar o logaritmo da variância RMS ( $\sigma_{RMS}^2$ ) em função do tempo. Isso é necessário porque a concentração normalizada pode flutuar ao redor do ponto final, como mostrado na Figura

3. O cálculo da variância RMS é dado pela Equação 2.

$$\log \sigma_{RMS}^2 = \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C'_{t,i} - 1)^2 \quad (2)$$

$C'_{t,i}$  trata-se do valor da concentração normalizada no instante  $t$  de cada sensor  $i$  posicionado no interior do tanque.

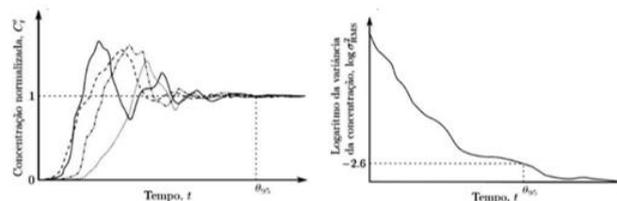


Figura 3 - Gráficos usados para determinar o tempo de mistura (Adaptados de BROWN, 2004).

O tempo de mistura é o período mínimo necessário para que um parâmetro de análise (condutividade elétrica), atinja um valor de 95%, nesse trabalho, representado por  $\theta_{95}$ . Esse valor é determinado pela curva do logaritmo da variância, onde ocorre a interseção do tempo com o valor do logaritmo da variância quando  $\sigma_{RMS}^2 = -2.6$  ( $C' = 0.95$ ). A conversão para outros intervalos de precisão, é realizada pela Equação 3 (PENNEY, 1991).

$$\frac{\theta_n}{\theta_{95}} = \frac{\ln\left(1 - \frac{n}{100}\right)}{\ln(1 - 0,95)} \quad (3)$$

O Minitab®, reconhecido software estatístico, foi utilizado para avaliar o impacto dessas variáveis no sistema. Este software permite a análise do potencial efeito das interações entre esses fatores nos resultados finais, através de DOE (Design Of Experiments).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Ao aplicar a análise, são obtidos gráficos de logaritmo da variância e do perfil de condutividade elétrica normalizada em função do tempo representado na Figura 4.

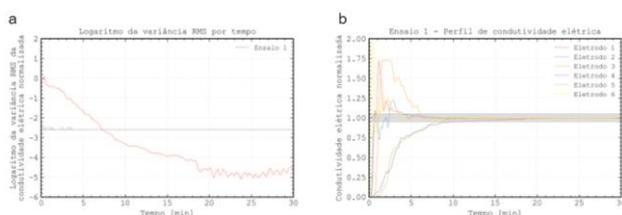


Figura 4 - Gráfico do Logaritmo da Variância e Perfil da Condutividade Elétrica Normalizada.

Tabela 2 - Ensaios x Tempo de Mistura		
Ensaios	Tempo de mistura médio [min]	Desvio Padrão
1 e 5	9,42	2,83
2 e 6	49,63	0,63
3 e 7	7,34	1,29
4 e 8	51,54	2,18
9 e 13	7,96	2,42
10 e 14	14,75	1,53
11 e 15	9,29	2,42
12 e 16	11,54	2,07

Tabela 2 – Tempos de mistura e seus respectivos desvios padrão com pontos centrais.

Ao avaliar o desempenho do tempo de mistura em função da disposição dos impelidores, observamos que a configuração agrupada é a mais eficiente, exigindo menos tempo para homogeneizar o tanque. A análise da inclinação dos impelidores revela que os

A análise fatorial 2<sup>3</sup> implica a manipulação simultânea de três variáveis independentes, cada uma operando em dois níveis distintos. O termo "2<sup>3</sup>" indica que cada variável possui dois níveis, enquanto o expoente "3" denota o número total de fatores envolvidos na análise (distribuição, inclinação e nível).

A partir dos gráficos apresentados, e utilizando a metodologia de análise de dados apresentada, foram determinados os tempos de mistura para cada ensaio experimental. Esses resultados, são apresentados na Tabela 2.

tempos de mistura mais curtos estão associados a uma inclinação de 0°.

Para a análise empregando o método fatorial 2<sup>3</sup> com o Software Minitab®, os resultados são apresentados de forma detalhada nas Figuras 5 e 6.

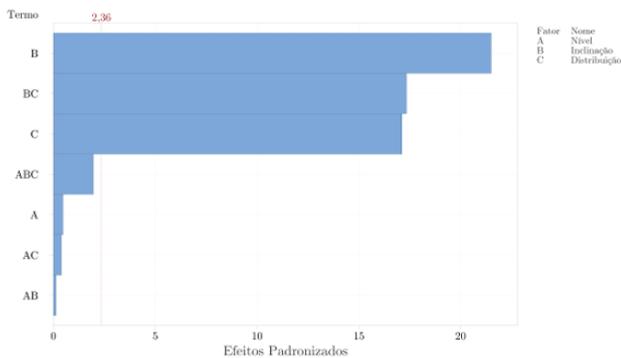


Figura 5 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados.

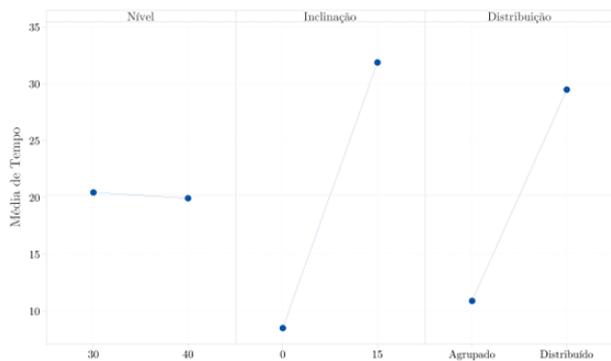


Figura 6 - Principais efeitos para o tempo de mistura.

A Figura 5 mostra o gráfico de efeito de Pareto ( $\alpha = 0,05$ ) da análise fatorial  $2^3$ , revelando que a distribuição dos impelidores (C) é o fator mais influente no tempo de mistura, seguido pela inclinação horizontal (B) e nível de água (A). A interação entre a distribuição dos impelidores e sua inclinação horizontal (BC) também afeta o tempo de mistura, assim como a distribuição dos impelidores (C). É importante ressaltar que, nesta análise, foi observado que o nível do tanque não demonstra uma influência significativa sobre o tempo de mistura.

A Figura 6 destaca que a distribuição dos impelidores causa variações significativas no tempo médio de mistura, sendo maior para impelidores distribuídos equidistantemente e para  $\beta = 15^\circ$ , mas é mantida contante para a variação de nível.

## CONCLUSÕES:

A análise dos tempos de mistura em relação à disposição dos impelidores mostrou que a configuração agrupada é a mais eficiente, exigindo menos tempo para alcançar a homogeneização do tanque. Além disso, verificou-se que uma inclinação dos impelidores de  $0^\circ$  está associada aos menores tempos de mistura.

A análise fatorial  $2^3$  indicou que a distribuição dos impelidores e a inclinação horizontal são os principais fatores que influenciam o tempo de mistura, enquanto o nível do tanque teve um impacto menor. Os resultados obtidos com o Software Minitab® confirmaram que tanto a configuração dos impelidores quanto a sua inclinação afetam de forma semelhante o desempenho do sistema.

## BIBLIOGRAFIA

- BROWN, David A. R.; Jones, Pip N.; Middleton, John C. **Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice**. 2004
- CLARK Jr., R. C.; BROWN, D. N. **Petroleum properties and analyses in biotic and abiotic systems**. In: Malis, D. C. **Effects of petroleum on Arctic and Subarctic environments in organisms**. 89p. Academic Press, New York, 1977.
- COSTA, Susiane M. **A Exploração do pré-sal e o Futuro Brasileiro**. 2014. 39. Universidade de Brasília., Brasília, 2014.
- FATIBELLO-FILHO, Orlando *et al.* **Planejamento fatorial e superfície de resposta: otimização de um método voltamétrico para a determinação de  $ag(i)$  empregando um eletrodo de pasta de nanotubos de carbono**. 2011.
- FREITAS, Lucas F. L. **Características turbulentas de um tanque**. 2020. Universidade Estadual de Campinas.
- GUIMARÃES, Adriana K. V. *et al.* **Estudo da caracterização da borra de petróleo e processo de extração de petróleo**. 2016.
- PENNEY, Roy W. *et al.* **Advanced Impeller Geometry Boosts Liquid Agitation**. Chemical Engineering, 1994.