

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

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

AUTORES:

Maria Estela Oliveira da Silva, Gilberto Ribeiro Pinto Junior, José Roberto Nunhez, Guilherme José de Castilho

INSTITUIÇÃO:

Universidade Estadual de Campinas - Unicamp

ANÁLISE DO TEMPO DE MISTURA EMPREGADO NA HOMOGENEIZAÇÃO DE TANQUES DE ESTOCAGEM DE PETRÓLEO

Resumo

O armazenamento em larga escala de hidrocarbonetos por meio de tanques de agitação e mistura é uma prática consolidada na indústria, especialmente no setor petrolífero. Nesse processo, o petróleo é depositado em tanques de armazenamento equipados com agitadores de entrada lateral, cuja função é garantir a homogeneização do fluido e evitar a formação de resíduos, denominados borra. Essa borra, composta por hidrocarbonetos pesados, resíduos sólidos, sedimentos e outros materiais indesejados que se separam do petróleo durante o processo de armazenamento e manipulação, representa um desafio ambiental significativo, podendo persistir no ambiente, acumular-se em organismos e gerar custos substanciais na indústria, uma vez que comprometem a funcionalidade dos tanques. A necessidade de limpeza frequente ou agitação contínua para evitar a formação desses resíduos consome energia que poderia ser economizada. Este estudo tem como objetivo analisar o tempo de mistura necessário para alcançar a homogeneização de uma solução salina a ser introduzida em um tanque em escala piloto, similar aos tanques de armazenamento da Petrobras, contendo água, realizando, assim, uma análise condutivimétrica para a determinação de tal parâmetro. Por meio de Planejamento de Experimentos (DOE), em específico uma análise fatorial completa 2^3 , foi investigado como o nível do fluido no tanque, a inclinação horizontal dos impelidores e sua configuração (agrupados e distribuídos) influenciam no tempo de mistura. Dessa forma, condutivímetros foram estrategicamente posicionados em diferentes pontos do tanque, especialmente em áreas onde a mistura é mais desafiadora devido às características do escoamento. Esta homogeneidade é indicada pela uniformidade da condutividade em todos os pontos do tanque. Os resultados destacam que o fator com maior influência sobre o sistema é a configuração dos agitadores, seguido pela inclinação horizontal. Além disso, é observado que o tempo de mistura pode variar entre 7 e 50 minutos aproximadamente dependendo da configuração do sistema estabelecida. Essas conclusões oferecem compreensão do processo útil para otimizar a operação de tanques de armazenamento de petróleo, visando não apenas a eficiência operacional, mas também a redução de custos e impactos ambientais.

Palavras-chave: petróleo; tanques de mistura; tempo de mistura; borra.

Abstract

Large-scale storage of hydrocarbons using agitation and mixing tanks is a well-established practice in the industry, especially in the petroleum sector. In this process, oil is stored in tanks equipped with side-entry agitators designed to ensure fluid homogenization and prevent the formation of residues known as sludge. This sludge, composed of heavy hydrocarbons, solid residues, sediments, and other unwanted materials that separate from the oil during storage and handling, poses a significant environmental challenge as it can persist in the environment, accumulate in organisms, and generate substantial costs for the industry by compromising tank functionality. The need for frequent cleaning or continuous agitation to prevent sludge formation consumes energy that could be saved. This study aims to analyze the mixing time required to achieve homogenization of a saline solution introduced into a pilot-scale tank, similar to those used by Petrobras, containing water, through conductometric analysis to determine this parameter. Using Design of Experiments (DOE), specifically a full factorial 2^3 analysis, the effects of fluid level in the tank, the horizontal inclination of the impellers, and their configuration (grouped and distributed) on the mixing time were investigated. Conductivity meters were strategically placed at different points in the tank, particularly in areas where mixing is more challenging due to flow characteristics. Homogeneity is indicated by the uniformity of conductivity throughout the tank. The

results highlight that the most influential factor on the system is the impeller configuration, followed by horizontal inclination. Additionally, it was observed that mixing time can vary between approximately 7 and 50 minutes depending on the system configuration. These findings provide valuable insights for optimizing petroleum storage tank operations, aiming not only for operational efficiency but also for reducing costs and environmental impacts.

Keywords: oil; mixing tanks; mixing time; sludge.

Introdução

A indústria petrolífera desempenha um papel crucial no Brasil, especialmente após a descoberta do Pré-sal em 2007, que reforçou sua importância econômica ao reduzir a dependência de importações de energia. A Petrobras lidera esse setor com avanços tecnológicos significativos, especialmente em refinarias (COSTA, 2014).

O petróleo, composto principalmente por hidrocarbonetos, é um fluido cujo processamento eficiente é um foco contínuo da indústria brasileira (CLARK et al., 1977). Um dos desafios enfrentados é a formação de borra nos tanques de armazenamento, um resíduo denso composto por água, frações pesadas de petróleo e resíduos de corrosão (GUIMARÃES et al., 2016). Essa acumulação reduz a capacidade operacional dos tanques, exigindo agitação constante para evitar sua formação, o que consome considerável energia e se mostra economicamente desafiador.

Neste contexto, a pesquisa financiada pela Petrobras foca na homogeneização de soluções salinas em tanques equipados com impelidores laterais, visando determinar o tempo mínimo necessário para a agitação. A metodologia emprega condutivímetros estrategicamente posicionados para monitorar a homogeneidade da solução, simplificando assim o sistema de armazenamento de petróleo ao concentrar-se exclusivamente no tempo de mistura (FREITAS, 2020).

Metodologia

Os ensaios foram conduzidos no LACEM - Laboratório de Caracterização de Escoamentos Multifásicos da FEQ/Unicamp. Os experimentos são realizados em um tanque com capacidade de cerca de 4000 litros, com um diâmetro de 2,0 metros e altura de 1,33 metros. Este tanque é equipado com três impelidores laterais do tipo naval, conforme mostrado na Figura 1.

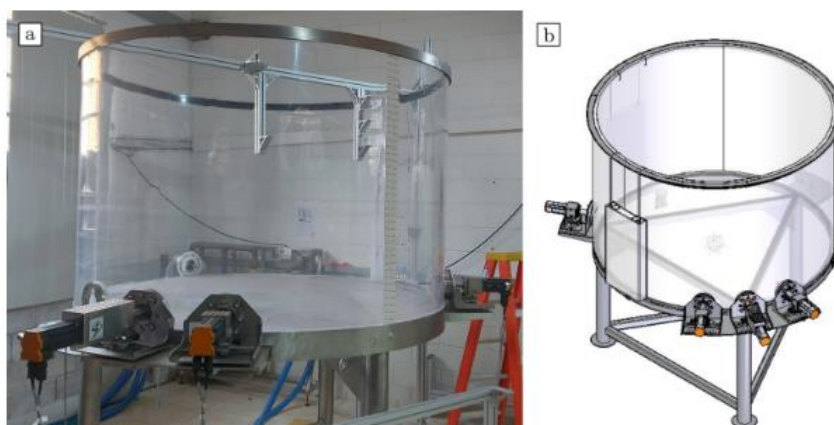


Figura 1. Tanque piloto: a) Aparato Experimental e b) Representação Esquemática

Uma solução salina de NaCl, com concentração de 125,0 g/L, é usada como solução traçadora. Essa solução é adicionada ao tanque, inicialmente preenchido com água, em diferentes níveis de acordo com os parâmetros definidos na Tabela 1. A condutividade da mistura é medida por condutivímetros da marca Hanna, modelo HI-98192, posicionados em locais estratégicos discutidos posteriormente.

Para aferir o tempo de mistura, optou-se por medir a condutividade, que se apresenta como o método mais propício para este projeto devido ao baixo custo, à possibilidade de reutilizar o fluido em estudo, e à aplicação encontrada em revisão bibliográfica. Dessa forma, os dados da condutividade foram coletados em cinco pontos diferentes, como visto na Figura 2. Contando com a variação do nível, angulação e distribuição do sistema de impelidores foram analisados os efeitos das condições operacionais, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros experimentais que podem influenciar no tempo de mistura

Fatores	Nível dos Fatores (-1)	Nível dos Fatores (+1)
Distribuição dos Impelidores	Agrupado	Distribuído
Inclinação dos Impelidores (°)	0	15
Nível do Tanque (cm)	30	40

Neste estudo, outros parâmetros que afetam a dinâmica analisada foram mantidos constantes, como a rotação fixa em 600 rpm e o número de impelidores em 3. Além disso, o condutivímetro utilizado é à prova d'água e registra dados de condutividade a cada 5 segundos.

O procedimento começa com a limpeza do tanque, seguida pela instalação de condutivímetros em pontos estratégicos ao redor do tanque, conforme ilustrado na Figura 2, para monitorar a condutividade da mistura. Após o enchimento do tanque com água, os impelidores são ativados durante um período de 15 minutos para estabelecer o perfil de escoamento em estado estacionário. Os dados iniciais de condutividade são registrados para cada parâmetro investigado, enquanto a solução salina é introduzida no tanque e monitorada pelo condutivímetro para determinar o tempo necessário para a mistura completa.

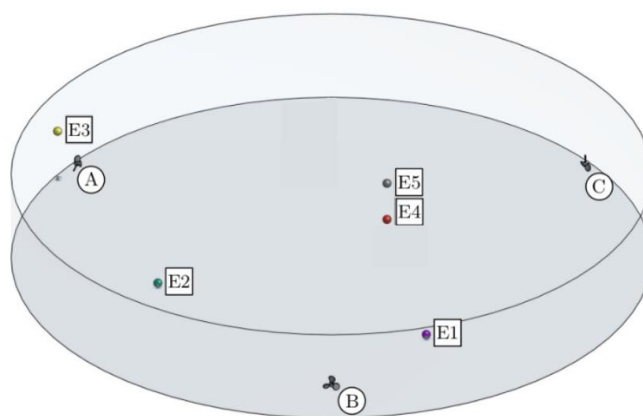


Figura 2. Configuração da disposição dos condutivímetros

Para avaliar a influência de cada parâmetro listado na Tabela 1, é necessário realizar uma análise utilizando um Planejamento Fatorial 2^3 , resultando em 8 cenários a serem estudados. O Planejamento Fatorial 2^3 empregado neste estudo tem como objetivo estimar um sistema e avaliar a influência de três fatores principais: nível do tanque, distribuição e inclinação dos impelidores. Esse método permite

explorar de forma abrangente as relações entre os diferentes parâmetros do sistema (FATIBELLO-FILHO *et al.* 2011). Os experimentos foram conduzidos em duplicata, resultando em um total de 16 ensaios a serem analisados, conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2. Planejamento Experimental

Ensaio	Disposição dos Impelidores	Angulação dos Impelidores (°)	Nível do Tanque (cm)
1 e 9	Distribuído	0	30
2 e 10	Agrupado	0	30
3 e 11	Distribuído	15	30
4 e 12	Agrupado	15	30
5 e 13	Distribuído	0	40
6 e 14	Agrupado	0	40
7 e 15	Distribuído	15	40
8 e 16	Agrupado	15	40

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

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, representada por C , foi a propriedade analisada. C_t indica a condutividade em cada instante t , durante a análise, enquanto C_0 representa a condutividade inicial no tanque (antes da adição do traçador), e C_∞ é a condutividade final presente no tanque. C'_t é o valor desejado da normalização, variando de 0 a 1. Para obter maior precisão, recomenda-se gerar um gráfico do logaritmo da variância RMS (Root Mean Square, ou Média Quadrática) em função do tempo. A variância RMS (σ_{RMS}^2) é uma medida estatística amplamente utilizada para avaliar a magnitude de uma variável. Isso se justifica porque ao plotar a condutividade normalizada em função do tempo, podem ocorrer flutuações em torno do ponto final, dificultando a aferição do tempo de mistura. O cálculo do logaritmo da variância RMS é realizado 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 condutividade elétrica normalizada no instante t de cada sensor i posicionado no interior do tanque.

O tempo de mistura é o período mínimo necessário para que um parâmetro de análise, como a condutividade elétrica, atinja um valor final compreendido entre limites, como, por exemplo, entre 95% e 105%. Neste estudo, adotamos o tempo de mistura de 95%, representado por θ_{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, conforme descrito por Fasano e Penney (PENNEY, 1994), é realizada pela Equação 3.

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

No âmbito da análise estatística adotada, foi empregado o Minitab®, reconhecido *software* estatístico, foi utilizado para avaliar o impacto dessas variáveis no sistema, a partir de uma análise fatorial 2³, essencial para explorar de forma sistemática e detalhada a interação entre múltiplos fatores. Este *software* facilita a análise dos dados experimentais, permitindo uma compreensão detalhada de como cada variável independente influencia o fator, bem como o potencial efeito das interações entre esses fatores nos resultados finais, através de DOE (*Design Of Experiments*), análise de variância, teste T (MONTGOMERY, 2017).

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 3, a qual traz um exemplo dos 16 possíveis ensaios realizados.

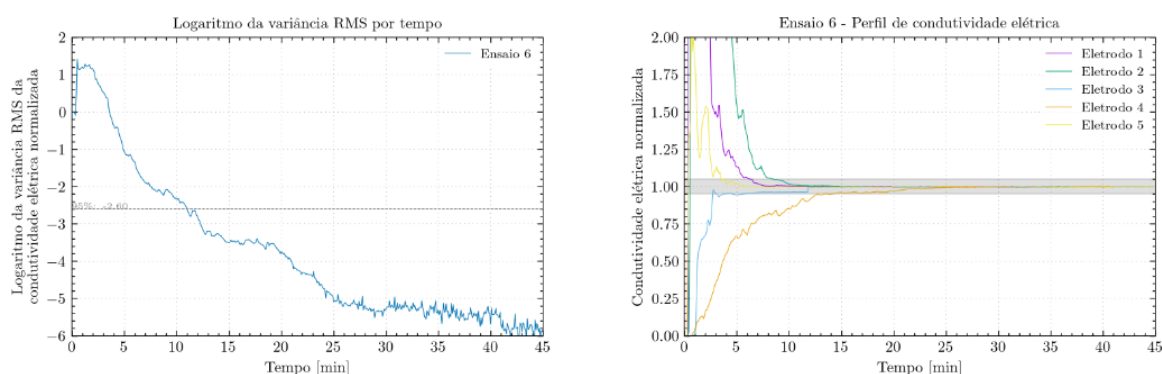


Figura 3. Gráfico do Logaritmo da Variância e Perfil da Condutividade Elétrica Normalizada

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, assim como as médias do tempo de mistura e seus respectivos desvios padrões baseados em ensaios em duplicata são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Planejamento Experimental

Ensaio	Tempo de mistura médio (min)	Desvio padrão
1 e 9	20,55	0,53
2 e 10	8,17	1,77
3 e 11	25,54	2,07
4 e 12	14,63	1,35
5 e 13	13,46	0,30
6 e 14	10,38	0,88
7 e 15	24,67	1,89
8 e 16	9,59	0,83

A Figura 4 apresenta o gráfico de efeito de Pareto ($\alpha = 0,05$) obtido através da análise fatorial 2^3 mostrando que a influência dos três fatores - distribuição dos impelidores (A), inclinação horizontal (B) e nível de água (C) – é significativa no tempo de mistura, sendo a distribuição dos impelidores o fator mais influente. Nota-se também que a interação entre os 3 fatores (ABC) e a interação entre a distribuição dos impelidores e sua inclinação horizontal (AB) também atua sobre o tempo de mistura.

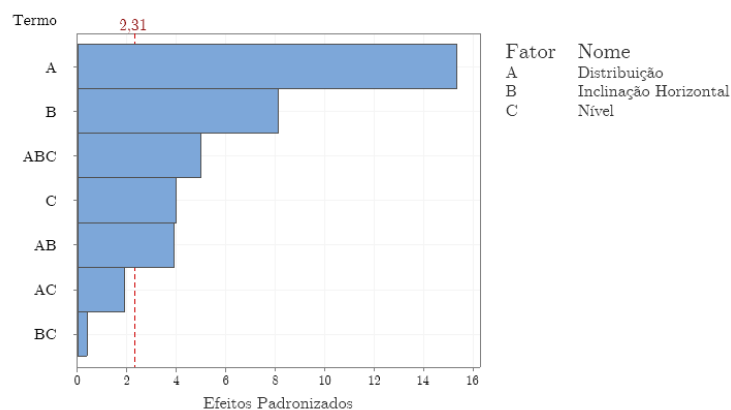


Figura 4. Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados

Além disso, na Figura 5a, observamos como o tempo médio de mistura é influenciado pelos diferentes parâmetros. É evidente que alterações na distribuição dos impelidores resultam em variações significativas no tempo médio de mistura em comparação com outras variações: o tempo de mistura é maior para impelidores equidistantemente distribuídos e para $\beta = 15^\circ$, porém diminui para o nível de 40cm. Por outro lado, a Figura 5b ilustra a interação entre os fatores analisados. Linhas que tendem a se cruzar (azuis e vermelhas) indicam que as variações nos parâmetros afetam mutuamente uns aos outros, como que ocorre para a distribuição e a inclinação horizontal (AB).

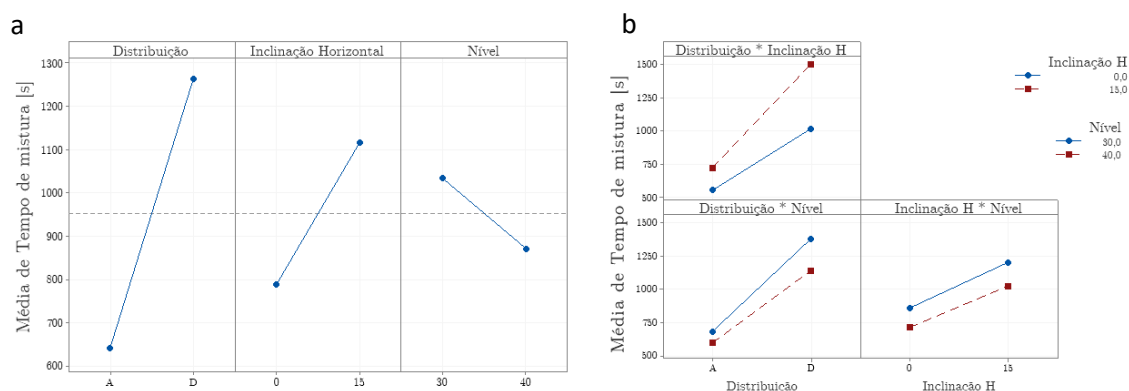


Figura 5. Gráficos: a) Efeitos principais para tempo de mistura e b) Interação para tempo de mistura

Conclusões

A análise dos gráficos de logaritmo da variância e do perfil de condutividade elétrica normalizada, juntamente com a metodologia de análise de dados utilizada, permitiu determinar com precisão os tempos de mistura em cada ensaio experimental. Os resultados revelaram que a distribuição dos impelidores é o principal fator que influencia o tempo de mistura, seguido pela inclinação horizontal

e pelo nível de água. Além disso, as interações entre esses fatores também se mostraram significativas, ressaltando a complexidade do processo estudado.

Os maiores tempos médios de mistura foram observados nos ensaios 3, 11, 7 e 15, todos utilizando uma configuração distribuída e uma inclinação de 15° para os impelidores. Embora o nível de água nesses ensaios varie entre 30 e 40 cm, esse fator não demonstrou influência significativa sobre o tempo de mistura. Em contraste, os menores tempos médios foram registrados nos ensaios 2, 10, 8 e 16, que empregam uma configuração agrupada. Para esses ensaios, as inclinações variam entre 0° (nos ensaios 2 e 10) e 15° (nos ensaios 8 e 16). Desconsiderando o desvio padrão, os ensaios com as menores médias de tempo foram os 2 e 10.

Os gráficos adicionais analisados complementam essas conclusões ao demonstrar que ajustes na distribuição dos impelidores têm um impacto substancial no tempo médio necessário para atingir a homogeneização desejada. As interações entre os parâmetros estudados indicam a importância de considerar múltiplas variáveis simultaneamente para otimizar eficientemente o processo de mistura. Essas descobertas destacam a aplicação crucial de métodos analíticos na engenharia de processos complexos.

Agradecimentos

Agradeço à FAPESP pelo apoio financeiro ao processo 2023/08520-5.

Referências Bibliográficas

- 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.
- MONTGOMERY, Douglas C. **Design and analysis of experiments**. 9. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017.
- PENNEY, Roy W. *et al.* **Advanced Impeller Geometry Boosts Liquid Agitation**. Chemical Engineering, 1994.