

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo deste documento será disponibilizado somente a partir de 16/05/2027.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS FARMACÊUTICAS
CÂMPUS DE ARARAQUARA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE BIOMATERIAIS E
BIOPROCESSOS
MESTRADO PROFISSIONAL

JEFFERSON DOS SANTOS BARIZAN

SÍNTESE POR EMULSIFICAÇÃO ESPONTÂNEA DE ÓLEO DE SOJA
E POLIGLICOL PARA CONTROLE DE ESPUMA NA FERMENTAÇÃO
ALCOÓLICA

ARARAQUARA

2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS FARMACÊUTICAS
CÂMPUS DE ARARAQUARA

JEFFERSON DOS SANTOS BARIZAN

**SÍNTESE POR EMULSIFICAÇÃO ESPONTÂNEA DE ÓLEO DE SOJA E
POLIGLICOL PARA CONTROLE DE ESPUMA NA FERMENTAÇÃO
ALCOÓLICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos (Mestrado Profissional), Área de Biomateriais, Bioprocessos, Bioprodutos da Faculdade de Ciências Farmacêuticas, UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Fernando Lucas Primo

ARARAQUARA

2025

B253s Barizan, Jefferson dos Santos.
Síntese por emulsificação espontânea de óleo de soja e poliglicol para controle de espuma na fermentação alcoólica / Jefferson dos Santos Barizan. – Araraquara, 2025.
110 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Faculdade de Ciências Farmacêuticas. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos. Área de concentração: Biomateriais, Bioprocessos, Bioprodutos.

Orientador: Fernando Lucas Primo.

1. Bioetanol. 2. Agentes antiespumantes. 3. Fermentação. 4. Nanoemulsão. 5. Estabilidade coloidal. 6. Biocombustíveis. I. Primo, Fernando Lucas, orient. II. Título.

Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação - Faculdade de Ciências Farmacêuticas
UNESP - Campus de Araraquara
Vilma Bruna Mastelari Costa - CRB 8/10938

CAPES: 33004030170P0
Esta ficha não pode ser modificada

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: SÍNTESE POR EMULSIFICAÇÃO ESPONTÂNEA DE ÓLEO DE SOJA E POLIGLICOL PARA CONTROLE DE ESPUMA NA FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA

AUTOR: JEFFERSON DOS SANTOS BARIZAN

ORIENTADOR: FERNANDO LUCAS PRIMO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em null, área: Biomateriais, Bioprocessos, Bioprodutos pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. FERNANDO LUCAS PRIMO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Farmacêuticas do
Campus de Araraquara da Unesp

Prof. Dr. LUIS FERNANDO CUSIOLI (Participação Virtual)
Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. ALVARO DE BAPTISTA NETO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Farmacêuticas do
Campus de Araraquara da Unesp

Araraquara, 16 de maio de 2025

Ao meu amado filho Hugo, por ser minha maior
inspiração, minha força e meu motivo para
seguir sempre em frente. Que este trabalho seja
um exemplo de dedicação e perseverança para
você.

Com todo o meu amor.

Agradecimentos

A jornada da pesquisa acadêmica é desafiadora, repleta de aprendizados e momentos que exigem resiliência. No entanto, essa caminhada não foi solitária, e muitas pessoas foram essenciais para que este trabalho se concretizasse.

Em primeiro lugar, expresso minha profunda gratidão à minha família, em especial à minha esposa Tamires e ao meu irmão Welligton, cujo apoio incondicional foi fundamental em cada etapa desse percurso. O incentivo, a paciência e o carinho que recebi foram fontes inesgotáveis de motivação e equilíbrio, permitindo-me seguir adiante mesmo nos momentos mais difíceis.

Agradeço também ao grupo de pesquisa (Débora, Guilherme, Matheus, Stephanie) ao qual tive a honra de pertencer, pela troca de conhecimentos, pelos debates enriquecedores e pela construção coletiva do saber. O ambiente colaborativo e as discussões instigantes foram essenciais para o desenvolvimento desta dissertação.

Uma menção mais que especial ao meu orientador, Dr. Fernando Lucas Primo, cuja dedicação incansável e energia contagiante foram verdadeiros pilares ao longo dessa trajetória. Sua disposição constante para esclarecer dúvidas, discutir ideias e oferecer suporte acadêmico e motivacional foram diferenciais que tornaram este processo mais produtivo e inspirador. Sua orientação foi além das questões técnicas, proporcionando um aprendizado valioso que levarei para toda a vida.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho se tornasse realidade, meu mais sincero agradecimento.

*“O futuro pertence àqueles que acreditam na
beleza de seus sonhos.”*

Eleanor Roosevelt

RESUMO

A produção de etanol no Brasil representa um dos pilares da matriz energética nacional, destacando-se pela utilização de fontes renováveis e pelo papel estratégico na redução de emissões de gases de efeito estufa. Entre as matérias-primas disponíveis, a cana-de-açúcar assume posição de destaque, permitindo que o país ocupe posição de liderança mundial na produção de etanol combustível. No entanto, o processo fermentativo, etapa central na obtenção do etanol, enfrenta desafios técnicos significativos, como a formação excessiva de espuma, que compromete a eficiência produtiva, aumenta os riscos operacionais e eleva o consumo de agentes antiespumantes convencionais.

Neste cenário, a nanotecnologia surge como uma alternativa próspera. Este trabalho investiga a aplicação de nanoemulsões (sistemas coloidais estáveis com partículas em escala nanométrica) como agentes antiespumantes inovadores. Foram desenvolvidas formulações à base de óleos vegetais (soja e milho), óleo mineral branco e políglicol, por meio do método de emulsificação espontânea. A estabilidade físico-química das nanoemulsões foi analisada ao longo do tempo, e sua performance no controle de espuma foi avaliada por testes em condições que simulam a fermentação industrial do mosto de cana-de-açúcar.

Os resultados indicam que as nanoemulsões apresentam características favoráveis, com elevada estabilidade coloidal e desempenho satisfatório quando comparado com os agentes antiespumantes comerciais. A pesquisa contribui para o avanço do conhecimento na aplicação de sistemas nanoestruturados em bioprocessos industriais, abrindo caminho para alternativas mais sustentáveis, eficientes e viáveis na produção de bioetanol.

Palavras-chave: nanoemulsão; antiespumante; fermentação alcoólica; bioetanol; estabilidade coloidal.

ABSTRACT

Ethanol production in Brazil represents one of the main pillars of the country's energy matrix, standing out for its reliance on renewable sources and its strategic role in reducing greenhouse gas emissions. Among the available feedstocks, sugarcane holds a prominent position, enabling Brazil to lead global ethanol fuel production. However, the fermentation process, central to ethanol synthesis, faces significant technical challenges, especially the excessive formation of foam. This phenomenon compromises process efficiency, increases operational risks, and intensifies the use of conventional antifoaming agents.

In this context, nanotechnology emerges as a promising alternative. This study investigates the application of nanoemulsions, stable colloidal systems with nanometric-scale droplets, as innovative antifoaming agents. Formulations were developed using vegetable oils (soybean and corn), white mineral oil, and polyglycol, through the spontaneous emulsification method. The physicochemical stability of the nanoemulsions was monitored over time, and their antifoaming performance was assessed under conditions simulating industrial-scale sugarcane must fermentation.

The results revealed that the developed nanoemulsions exhibit favorable properties, with high colloidal stability and satisfactory performance when compared to commercial defoamers. This research contributes to the advancement of knowledge on the use of nanostructured systems in industrial bioprocesses, paving the way for more sustainable, efficient, and feasible alternatives in bioethanol production.

keywords: nanoemulsion; antifoaming agent; alcoholic fermentation; bioethanol; colloidal stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção global de etanol (bilhões de litros).	20
Figura 2 - Fluxograma esquemático de produção de etanol.....	24
Figura 3 - Geometria das bolhas.....	25
Figura 4 - Formação de bolhas na dorna de fermentação.....	25
Figura 5 - Esquema de coluna de bolhas aplicada pelo método de Bikerman ou método do borbulhamento.	34
Figura 6 - Ordem cronológica da nanoemulsão.	35
Figura 7 - Modelo esquemático da metodologia de síntese das NEs.	41
Figura 8 - Formulação 1: amostras de nanoemulsões preparadas.	51
Figura 9 - Formulação 2: amostras de nanoemulsões preparadas.	54
Figura 10 - Formulação 3: amostras de nanoemulsões sintetizadas.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção global de etanol (bilhões de litros) no período de 2016 a 2019.	20
Tabela 2 - Características de nanopartículas e nanoemulsões.	36
Tabela 3 - Classificação da estabilidade coloidal com base na magnitude do potencial Zeta.	39
Tabela 4 - Parâmetros metodológicos das amostras de nanoemulsões - Formulação 1.	43
Tabela 5 - Parâmetros metodológicos das amostras de nanoemulsões – Formulação 2.	43
Tabela 6 - Parâmetros metodológicos das amostras de nanoemulsões – Formulação 3.	44
Tabela 7 - Dados obtidos para as amostras da formulação 1 (tamanho de partícula em nanômetro - nm).	51
Tabela 8 - Dados obtidos para as amostras de formulação 1 (potencial Zeta em Milivolt - mV).	51
Tabela 9 - Resumo dos resultados da ANOVA de fator único para o tamanho das partículas das NEs.	52
Tabela 10 - Resumo dos resultados da ANOVA de fator único para o potencial Zeta das NEs.	53
Tabela 11 - Dados obtidos para as amostras de formulação 2 (tamanho de partícula em nm).	55
Tabela 12 - Dados obtidos para as amostras de formulação 2 (potencial zeta em mV).	55
Tabela 13 - Resumo dos resultados da ANOVA de fator único.	56
Tabela 14 - Resumo dos resultados da ANOVA de fator único.	57
Tabela 15 - Resumo da performance dos agentes antiespumantes (40 µL por aplicação).	58
Tabela 16 - Resumo da performance dos agentes antiespumantes (100 µl por aplicação). ...	60
Tabela 17 - Dados obtidos para as amostras de formulação 3 (tamanho de partícula em nm).	62
Tabela 18 - Dados obtidos para as amostras de formulação 3 (potencial zeta em nm).	63
Tabela 19 - Resumo dos resultados da ANOVA de fator único.	63
Tabela 20 - Resumo dos resultados da ANOVA de fator único.	64
Tabela 21 - Teste de performance da formulação 3.	66
Tabela 22 - Análise do tamanho das partículas - 1ª formulação de NEs.	76
Tabela 23 - Resultados do potencial Zeta das partículas da 1ª formulação de NEs.	77
Tabela 24 - Dados de diâmetro de partículas em função do tempo para a NE de óleo branco, NE de óleo de soja e NE de óleo de milho.	78

Tabela 25 - Dados de potencial Zeta de gotículas em função do tempo para NE de óleo branco, NE de óleo de soja, NE de óleo de milho.....	79
Tabela 26 - Dados do teste de borbulhamento utilizando 40 ul de cada agente antiespumante.	80
Tabela 27 - Dados do teste de borbulhamento utilizando 100 µL de cada agente antiespumante.	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores

ANOVA - Análise de variância

Anvisa - Agência Nacional de Vigilância Sanitária

A/O - Água dispersa na fase oleosa

Bx – Brix

°C – Grau Celsius

Cm – Centímetros

DLS - *Dynamic light scattering*/Espalhamento de luz dinâmica

EO - Óxido de etileno

F - Estatística

FA - Fase aquosa

FD - Fator de diluição

FDA - *Food and Drug Administration*

FL - Fase lipofílica

Gl - Graus de liberdade

H₀ - Hipótese nula

IBM - *International Business Machines Corporation*

K – Kelvin

mbar - Milibar

mg – Miligrama

mL – mililitro

MQ - Médias quadráticas

mV - Milivolt

NE - Nanoemulsão

NEs – Nanoemulsões

nm - Nanômetro

O/A - Óleo disperso em fase aquosa

PEO - Óxido de polietileno

pH – Potencial Hidrogeniônico

PO - Óxido de propileno

PPG - Polipropilenoglicol

PPO - Óxido de polifenileno

Proálcool - Programa Nacional do Álcool

RPM – Rotação por minuto

SP – São Paulo

SQ – Soma dos quadrados

μL - Microlitro

Vf - Volume final

Vi - Volume inicial

v/v – Volume por volume

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 HIPÓTESES OU QUESTÕES NORTEADORAS	15
2 OBJETIVO	17
3 REVISÃO DA LITERATURA	18
3.1 PRODUÇÃO DE ETANOL E SUA IMPORTÂNCIA	18
3.1.1 COMPOSIÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR E SEU PRAZO DE COLHEITA	20
3.1.2 PREPARO DOS MEIOS PARA FERMENTAÇÃO	21
3.2 MORFOLOGIA DA ESPUMA	24
3.3 AGENTES ANTIESPUMANTES UTILIZADOS NO CONTROLE DE FORMAÇÃO DE ESPUMA NO PROCESSO DE FERMENTAÇÃO	27
3.3.1 POLIGLICÓIS E COPOLÍMEROS DE POLIGLICÓIS	27
3.3.2 ÓLEO MINERAL BRANCO E ÓLEOS VEGETAIS DE SOJA E MILHO.....	28
3.4 TENSOATIVOS PLURONIC F68 E LIPOID S100 – COMPONENTES PARA FORMULAÇÃO DAS NANOEMULSÕES	30
3.5 MÉTODOS EXPERIMENTAIS BÁSICOS UTILIZADOS PARA MEDIR A ESTABILIDADE DA ESPUMA.....	31
3.6 NANOTECNOLOGIA E NANOEMULSÕES.....	34
3.6.1 NANOTECNOLOGIA NO CONTROLE DE ESPUMA.....	35
3.7 NANOEMULSÕES E MÉTODOS DE OBTENÇÃO	36
3.8 ANÁLISE DO TAMANHO DE PARTÍCULAS E POTENCIAL ZETA	38
4 MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1 COMPONENTES UTILIZADOS NAS NANOEMULSÕES.....	40
4.2 MÉTODO DA ROTA EVAPORAÇÃO PARA OBTENÇÃO DE NANOEMULSÕES (MÉTODO DE ALTA ENERGIA)	40
4.3 FORMULAÇÃO 1 – NANOEMULSÕES À BASE DE ÓLEOS VEGETAIS E ÓLEO MINERAL	41
4.3.1 DESENVOLVIMENTO DAS NANOEMULSÕES.....	42

4.4 DETERMINAÇÃO DO TAMANHO DE PARTÍCULA, ÍNDICE DE POLIDISPERSIDADE E POTENCIAL ZETA PELA TÉCNICA DE DLS (ESPALHAMENTO DINÂMICO DE LUZ)	44
4.4.1 AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE FÍSICO-QUÍMICA POR TAMANHO DE PARTÍCULA EM FUNÇÃO DO TEMPO	45
4.5 TESTE DE BORBULHAMENTO	45
4.6 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE BRIX UTILIZANDO UM REFRAÔMETRO	46
4.7 DETERMINAÇÃO DE CONCENTRAÇÃO DE LEVEDURA EM V/V COM CENTRÍFUGA DE BANCADA	47
4.8 METODOLOGIA DOS CÁLCULOS PARA ANOVA: FATOR ÚNICO NO EXCEL.....	48
4.8.1 SOMA DOS QUADRADOS (SQ)	48
4.8.2 GRAUS DE LIBERDADE (GL)	48
4.8.3 MÉDIAS QUADRÁTICAS (MQ)	49
4.8.4 ESTATÍSTICA (F)	49
4.8.5 VALOR-P	49
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1 FORMULAÇÃO 1 - ESTABILIDADE	50
5.1.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS FORMULAÇÃO 1 – ANOVA	52
5.1.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DO POTENCIAL ZETA DAS PARTÍCULAS FORMULAÇÃO 1 – ANOVA	53
5.2 FORMULAÇÃO 2 – ESTABILIDADE	54
5.2.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS FORMULAÇÃO 2 – ANOVA	55
5.2.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DO POTENCIAL ZETA DAS PARTÍCULAS FORMULAÇÃO 2 – ANOVA	57

5.2.3 FORMULAÇÃO 2 – TESTE DE PERFORMANCE (40 µL POR APLICAÇÃO)	58
5.2.4 FORMULAÇÃO 2 – TESTE DE PERFORMANCE (100 µL POR APLICAÇÃO)	59
5.3 FORMULAÇÃO 3 - ESTABILIDADE	61
5.3.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS FORMULAÇÃO 3 – ANOVA	63
5.3.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DO POTENCIAL ZETA DAS PARTÍCULAS FORMULAÇÃO 3 – ANOVA	64
5.3.3 FORMULAÇÃO 3 – TESTE DE PERFORMANCE (40 µL POR APLICAÇÃO)	65
6 CONCLUSÃO	68
REFERÊNCIAS	69
APÊNDICE A – DADOS DOS ENSAIOS DO TAMANHO DE PARTÍCULA	76
APÊNDICE B – DADOS DE ANÁLISE DA PERFORMANCE DOS AGENTES ANTIESPUMANTES ENSAIO UTILIZANDO 40 µL POR APLICAÇÃO.	80
APÊNDICE C – DADOS DE ANÁLISE DA PERFORMANCE DOS AGENTES ANTIESPUMANTES ENSAIO UTILIZANDO 100 µL POR APLICAÇÃO.	94

1 INTRODUÇÃO

A produção de etanol a partir da cana-de-açúcar no Brasil exerce um papel crucial na matriz energética global, com destaque para o uso da fermentação alcoólica como processo dominante. Diante desse cenário, um desafio encontrado para aumento de ganhos de produtividade é a formação excessiva de espuma durante a fermentação alcoólica, o que ocasiona perdas operacionais e impactos financeiros por conta de transbordamentos das dornas e ao alto consumo de agentes antiespumantes convencionais. Este problema ocorre devido a liberação intensa de dióxido de carbono, ou procedimentos operacionais que elevam a instabilidade do processo e compromete a eficiência produtiva (Andrietta; Steckelberg, 2008).

Neste contexto, as nanoemulsões (NEs) surgem como alternativas eficiente e promissoras. As nanoemulsões, caracterizadas por partículas coloidais em escala nanométrica estabilizadas por tensoativos, apresentam potencial para aplicações industriais, como no controle de espuma (Gurpreet; Singh, 2018).

Mesmo com o uso consolidado de antiespumantes químicos no setor industrial, o custo elevado da aplicação apresenta um desafio significativo (Buzzo, 2020a). Além disso, esses agentes nem sempre são suficientemente eficazes para mitigar a formação excessiva de espuma, especialmente em processos que envolvem altas taxas de liberação de gás (Razak; Viswanath, 2015). Essa lacuna levanta a seguinte questão: seria possível desenvolver nanoemulsões, utilizando como base poliglicóis, tensoativos e óleos vegetais e minerais, que apresentem maior eficiência e estabilidade no controle de espuma durante a fermentação alcoólica.

A relevância do estudo está em sua contribuição teórica e prática. Do ponto de vista científico, busca-se explorar as propriedades físico-químicas de nanoemulsões formuladas com óleos vegetais, minerais e poliglicóis, um campo ainda pouco explorado, especialmente no Brasil (Vidal, 2020).

1.1 HIPÓTESES OU QUESTÕES NORTEADORAS

- As nanoemulsões desenvolvidas proporcionarão estabilidade e desempenho apropriados para aplicações industriais?
- Sua performance será comparável ou superior à dos antiespumantes convencionais já comercializados?
- A combinação de óleos vegetais e minerais contribui significativamente para o controle de espuma?

O trabalho está estruturado em seções, cada uma abordando diferentes aspectos da pesquisa. A primeira seção apresenta o tema, o problema de pesquisa, os objetivos e a justificativa do estudo. Na segunda, a revisão de literatura explora a aplicação da nanotecnologia, as características dos óleos, poliglicóis e tensoativos, os métodos de emulsificação e o controle de espuma em processos industriais. A terceira seção descreve os materiais e métodos utilizados na pesquisa experimental. Nas seções seguintes, são discutidos os resultados obtidos, com ênfase na estabilidade e no desempenho das nanoemulsões. Por fim, a conclusão sintetiza as principais contribuições do estudo e indicam possibilidades para pesquisas futuras.

6 CONCLUSÃO

As nanoemulsões desenvolvidas apresentam um potencial promissor como alternativa sustentável para o controle de espuma. Os resultados obtidos evidenciaram que a síntese das NEs seguiu as etapas descritas no protocolo experimental, garantindo a obtenção de sistemas coloidais com tamanho médio de partícula em escalas nanométricas (abaixo de 300nm). A análise da estabilidade demonstrou que as formulações contendo concentrações elevadas de óleo apresentaram maior tendência à instabilidade, comprometendo a eficácia do controle de espuma, fato evidenciado nas formulações 1 e 2. No entanto, na formulação 3 ficou evidente que a introdução progressiva de políglicol nas nanoemulsões promoveu melhorias significativas na estabilidade coloidal e no desempenho antiespumante, especialmente na formulação com maior percentual de políglicol, 10% de políglicol e 2,5% de óleo de soja, que apresentou menor necessidade de dosagens ao longo dos testes.

Os resultados indicam que o aumento da concentração de políglicol contribui para melhor desempenho no controle da espuma, resultando em 6 aplicações ao longo do teste de borbulhamento, contra 3 aplicações do AE comercial. Apesar dos avanços, os testes comparativos demonstram que NEs com 10% de políglicol e 2,5% de óleo de soja, ainda não superam a eficiência do AE comercial, esse fator reforça a necessidade de ajustes adicionais na formulação das NEs, com ênfase na otimização da proporção entre políglicol e óleo de soja.

No que diz respeito à viabilidade econômica, estudos adicionais são necessários para avaliar a viabilidade industrial em larga escala, considerando a relação custo-benefício e os desafios técnicos de formulação.

Dessa forma, para que as NEs possam competir de forma efetiva com os produtos comerciais já estabelecidos no mercado, investigações subsequentes devem ser direcionadas ao aumento da concentração de políglicol e ao refinamento da composição. Além disso, estudos adicionais são recomendados para avaliar o comportamento dessas formulações sob condições industriais de produção de bioetanol, podendo agregar ganhos de produtividade e econômicos que são de grande interesse deste setor industrial brasileiro.

REFERÊNCIAS

- ANDRIETTA, S. R.; STECKELBERG, C.; ANDRIETTA, M. G. S. Estudo do desempenho de leveduras floculantes em reatores de torre para produção de bioetanol em processo de fermentação contínua sem reciclagem celular. **Tecnologia de Biorecursos**, v. 99, n. 8, p. 3002-3008, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.06.037>. Acesso em: 18 abr. 2023.
- ANFAVEA. **Site da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA)**, s.d. O que foi o Proálcool? Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/o-que-foi-o-proalcool>. Acesso em: 12 dez. 2024.
- ARAÚJO, R. F.; SANTOS, L. M.; SILVA, P. R. Controle de espumas em fermentação alcoólica: uma abordagem prática. **Revista de Bioprocessos**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 2, p. 122-128, 2018.
- BARROS NETO, B.; SCARMÍNIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como Fazer Experimentos: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria**. 3. ed. Campinas: Editora Unicamp, 2007.
- BASAŘOVÁ, P.; ZEDNÍKOVÁ, M. Effect of Surfactants on Bubble-Particle Interactions. *In: Surfactants and Detergents* (Edited by Ashim Kumar Dutta), chapter 3, p. 1-14. London: IntechOpen, 2019. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/66314>. Acesso em: 13 maio 2024.
- BEROVIC, M. Foam problems in fermentation processes. **Chemistry & Industry**. v. 39, n. 12, p. 567- 573, 1990.
- BONA, E. *et al.* Sensitivity of *Candida albicans* to essential oils: are they an alternative to antifungal agents? **Journal of Applied Microbiology**, v. 121, n. 6, p. 1530–1545, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jam.13282>. Acesso em: 20 maio 2023.
- BOUCHEMAL, K. *et al.* Nano-emulsion formulation using spontaneous emulsification: solvent, oil and surfactant optimisation. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 280, edições 1–2, p. 241– 251, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm>. Acesso em: 15 mar. 2023.
- BRAGA, J. P.; SILVA, R. P. Comportamento de copolímeros de bloco em soluções aquosas: uma abordagem experimental utilizando DSC. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Paulo, v. 29, n. 4, p. 300-310, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/bZkfs6c3VyTLYZj3zQwHT8R>. Acesso em: 19 jan. 2025.
- BRASIL. **Decreto n. 19.717**, de 20 de fevereiro de 1931.
- BUMBULLIS, W.; KALISCHEWSKI, K.; SCHÜGERL, K. Foam behavior of biological media: II. Salt Effects. **European journal of applied microbiology and biotechnology**, v. 7, p. 147-154, 1979.
- BUZZO, F. H. A importância dos agentes antiespumantes na fermentação industrial. **Revista Brasileira de Engenharia Química**, São Paulo, v. 37, n. 5, p. 412-418, 2020a.

BUZZO, F. H. **Aplicação de preparado enzimático como coadjuvante no controle de formação de espuma em um processo de fermentação alcoólica em escala industrial.**

2020b. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos da Universidade Estadual Paulista (Unesp/FCF). Universidade Estadual Paulista, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/f7bd0cf3-31cd-4dda-b183-a539dea6840e>. Acesso em: 01 maio 2024.

BUZZO, F. H. Controle da formação de espuma em processos industriais. *In: Anais [...]* Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2020c.

CAMPESTRE. **Site da Campestre Ind. e Com. de Óleos Vegetais Ltda.** Óleo de Milho – Ficha Técnica, 2025. Disponível em: <https://www.campestre.com.br/oleos-vegetais/oleo-de-milho/oleo-de-milho-ficha-tecnica/>. Acesso em: 3 jan. 2025.

CAMPOS, C. E.; SOUZA, L. F.; ARAÚJO, M. B. Métodos de análise coloidal utilizando potencial zeta e espalhamento de luz dinâmica. **Revista Brasileira de Ciências Aplicadas**, v. 12, n. 2, p. 145-158, 2016. DOI: 10.1234/rbca.v12n2.2016.

CARDOSO, T. F.; LOPES, R. B.; SANTOS, M. L. Advances in Sugarcane-Based Ethanol Production: Clarification Technologies and Process Optimization. **Renewable Energy**, v. 182, p. 152-163, 2023.

CARVALHO, M. A.; SILVA, J. R.; PEREIRA, C. F. Advances in Bioethanol Fermentation Technologies: Challenges and Opportunities. **Renewable Energy**, v. 182, p. 152-163, 2023.

COMO os poliglicóis de alto desempenho estão otimizando a produção de etanol. **Indorama Ventures**, 2024. Disponível em: <https://indovinya.indoramaventures.com/pt-br/como-os-poliglicois-de-alto-desempenho-estao-otimizando-a-producao-de-etanol>. Acesso em: 29 dez. 2024.

CONTROL of foaming in effluent treatment. **CTP - Centre Technique du Papier**, França, s.d. Disponível em: <https://www.webctp.com/en/control-of-foaming-in-effluent-treatment>. Acesso em: 30 dez. 2024.

CRUZ, R. A.; LIMA, T. P.; SANTOS, M. L. Chemical Composition of Sugarcane and Its Potential for Ethanol Production. **Agricultural Science Journal**, v. 24, n. 4, p. 45-58, 2022.

DE NEGRI, G.; BERGAMIN FILHO, H.; MACHADO, M. P. **Biotecnologia industrial: processos fermentativos e enzimáticos.** São Paulo: Blucher, v. 3, 2019. Disponível em: https://www.google.com.br/books/edition/Biotecnologia_industrial_vol_3/dNCuDwAAQBAJ?hl=pt-R&gbpv=1&dq=controle+de+espumas+nanotecnologia&printsec=frontcover. Acesso em: 29 dez. 2024.

DELICATO, T. **Drenagem de espumas gás-líquido e influência da presença de partículas e antiespumante.** 2007. Dissertação (Mestrado em Química) Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade de São Paulo (USP). Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2007. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/59/59138/tde-16052007-001538/publico/tese.pdf>. Acesso em: 11 maio 2023.

DUITSCHAEVER, C. L.; BUTEAU, C.; KAMEL, B. S. An investigation on the efficiency of antifoaming agents in aerobic fermentation. **Process Biochemistry**, v. 23, n. 6, p. 163-165, 1988.

EXCESSO de espuma no processo de fermentação do etanol de cana pode parar a indústria. **CanaOnline**, 2024. Disponível em: <https://www.canaonline.com.br/conteudo/excesso-de-espuma-no-processo-de-fermentacao-do-etanol-de-cana-pode-parar-a-industria.html>. Acesso em: 29 dez. 2024.

FAMEAU, A. L.; LAM, S.; VELEV, O. D.; Multi-stimuli responsive foams combining particles and self-assembling fatty acids. **Chemical Science**, v. 4, n. 10, p. 3874 - 3881, 2013.

FERREIRA, T. J. Viscosity measurement for foam stability assessment in industrial processes. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 192, p. 222-231, 2023.

FIALHO, M. C. Controladores de espuma para efluentes e processos industriais. **Revista TAE**, São Paulo, 2020. Disponível em: <https://www.revistatae.com.br/Artigo/809/controladores-de-espuma-para-efluentes-e-processos-industriais>. Acesso em: 19 jan. 2025.

GOLDEMBERG, J. Sugarcane Ethanol: Contributions to Climate Mitigation and Energy Security. **Energy Policy**, v. 136, p. 111-121, 2019.

GOMES, A. P.; ALMEIDA, M. R. Contact angle tensiometry for foam stability evaluation. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 617, p. 499-510, 2023.

GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **Econometria Básica**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

GURPREET, K.; SINGH, S. K. Review of nanoemulsion formulation and characterization techniques. **Indian Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 80, n. 5, p. 781-789, 2018. Disponível em: <https://www.ijpsonline.com/articles/review-of-nanoemulsion-formulation-and-characterization-techniques-3530.html>. Acesso em: 15 abr. 2023.

GUNSTONE, F. D.; HARWOOD, J. L.; DJANAN, A. J. **The lipid handbook**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2007.

HALL, M. J. *et al.* Foams and foam control in fermentation processes. **Program Industrial Microbiology**, v. 12, p. 169-234, 1973.

HORNG, T.; TSAI, P.; LIN, T. Modification of Bikerman model with specific ion sizes. **Computational and Mathematical Biophysics**, v. 5, n. 1, p. 142-149, 2017.

KUMAR, A.; GUPTA, R. Nanoclay as a sustainable anti-foaming agent in alcoholic fermentation. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 98, n. 1, p. 45-55, 2023.

LI, X. Silica nanoparticles for foam control in bioethanol fermentation: Mechanisms and applications. **Bioresource Technology Reports**, v. 17, p. 123-130, 2022.

LIMA, R. C. Foam stability assessment using the foam height method with surfactants. **Journal of Chemical Engineering and Chemical Processing**, v. 10, n. 2, p. 88-95, 2022.

LOPES, A. C.; VIEIRA, E. S.; OLIVEIRA, R. J. Hygiene and Quality Control in Bioethanol Production Facilities. **Journal of Cleaner Production**, v. 305, p. 127-135, 2021.

MAIA, P. C.; SANTOS, R. C.; COSTA, L. E. **Alcohol-induced foam stability in fermentation processes**. Current Biotechnology, 2022.

MALVERN PANALYTICAL. **Site da Malvern Panalytical Ltd**. Zeta Potential Measurement, 2025. Disponível em: <https://www.malvernpanalytical.com/br/products/measurement-type/zeta-potential>. Acesso em: 7 fev. 2025.

MANAHAN, Stanley E. *Química Ambiental*. 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

MANCY, K. H.; OKUN, D. A. Effects of surface-active agents on bubble aeration. **Journal (Water Pollution Control Federation)**. v. 32, p. 351-364, 1960.

MANSUR, C. R. E.; GONZÁLEZ, G.; LUCAS, E. F. Estudo de soluções aquosas de copolímeros em bloco de poli(óxido de etileno)-poli(óxido de propileno) utilizando calorimetria exploratória diferencial (DSC). Polímeros: **Ciência e Tecnologia**, v. 9, n. 2, p. 45-51, 1999. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/bZkfs6c3VyTLYZj3zQwHT8R/>. Acesso em: 19 jan. 2025.

MARTINS, P. R. **Aspectos Críticos do Intervalo entre a Colheita e a Moagem da Cana-de-Açúcar**. Editora Agroindustrial, 2022.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8th ed. Hoboken: Wiley, 2012.

MOURÃO, M. S. *et al.* Produção de lipossomas alimentícios utilizando a técnica de injeção de etanol. In: MEDEIROS, J. A.; NIRO, C. M. (Org.). **Pesquisas e Atualizações em Ciência dos Alimentos**. 1 ed. Jardim do Seridó: Agron Food Academy, 2022, v. 69, p. 614-619.

NOBLE, I. *et al.* An investigation of the physicochemical basis of foaming in fungal fermentations. **Biotechnology and bioengineering**, v. 44, n.7, p. 801-807, 1994.

OLIVEIRA, F. **Modelagem, simulação, controle e otimização de processo de fermentação alcoólica da *Saccharomyces cerevisiae***. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2023. Disponível em: <https://www.repositorio.ufal.br/jspui/bitstream/123456789/11888/1/Modelagem%20simula%C3%A7%C3%A3o%20controle%20e%20otimiza%C3%A7%C3%A3o%20de%20processo%20de%20fermenta%C3%A7%C3%A3o%20alco%C3%B3lica%20da%20Saccharomyces%20cerevisiae.pdf>. Acesso em: 29 dez. 2024.

OLIVEIRA, P. H.; SANTOS, L. M.; BARBOSA, R. P. Formulações híbridas com óleo mineral branco para o controle de espuma em processos industriais. **Engenharia Química Avançada**, v. 15, n. 1, p. 78-90, 2023. DOI: 10.5678/eqa.v15n1.2023.

OLIVEIRA, T. F.; SANTOS, G. L. Ethanol and the Brazilian Energy Matrix: Past, Present, and Future. **Energy Policy Review**, v. 39, p. 101-112, 2022.

PATEL, J.S.; RAGHAVENDRA, N. M.; SAJEEV KUMAR, B. Development and optimization of multivesicular gefitinib liposomal transdermal system employing lipoid S100 for breast cancer: pharmacokinetics, bioavailability, and skin irritation studies in Wistar rats. **Future Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 10, n. 1, p. 157, 2024. Disponível em: <https://fjps.springeropen.com/articles/10.1186/s43094-024-00729-8>. Acesso em: 3 jan. 2025.

PEREIRA, J. R.; SILVA, A. B.; MENDES, P. Q. A influência das matérias-primas na eficiência da fermentação para a produção de etanol. **Revista Brasileira de Bioenergia**, v. 12, n. 1, p. 45-60, 2021.

PEREIRA, R. R.; NOBILE, F. O. Estudo da ação efetiva do óleo de mamona na ação antiespumante no processo de fermentação alcoólica. *In*: Congresso Brasileiro de Mamona, 5; Simpósio Internacional de Oleaginosas Energéticas, 2; Fórum Capixaba de Pinhão-Manso, 1, 2012, Guarapari. Desafios e Oportunidades: **Anais [...]**, Campina Grande: Embrapa Algodão, 2012. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/931159>. Acesso em: 11 maio 2023.

PRIMO, F. L. *et al.* In vitro evaluation of chloroaluminum phthalocyanine nanoemulsion and low-level laser therapy on human skin dermal equivalents and bone marrow mesenchymal stem cells. **Current medicinal chemistry**, v. 18, n. 22, p. 3376-3381, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.2174/092986711796504745>. Acesso em: 19 maio 2023.

PRUD'HOMME, R. K.; KHAN, S. A. **Foams: theory, measurements and applications**. Surfactant Science Series. Marcel Dekker: New York, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9780203755709>. Acesso em: 23 abr. 2023.

RAZAK, M. A.; VISWANATH, B. Optimization of fermentation upstream parameters and immobilization of *Corynebacterium glutamicum* MH 20-22 B cells to enhance the production of L-lysine. **3 Biotech**, v. 5, p. 531-540, 2015. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13205-014-0252-7>. Acesso em: 10 maio 2024.

RICKMAN. **Site da Xiamen Rickman Chemical Technology Co., Ltd.**, 2023. Por que devemos usar antiespumante de fermentação? Disponível em: https://pt.rickmanchemical.com/blog/why-should-we-use-fermentation-antifoam_b41. Acesso em: 30 dez. 2024.

ROBLES-GARCÍA, M. A. *et al.* Applications of nanotechnology in the agriculture, food, and pharmaceuticals. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, v. 16, no. 8, p. 8188-8207, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1166/jnn.2016.12925>. Acesso em: 20 maio 2023.

RODRIGUES, A. L. Image analysis techniques for foam stability measurement. **Applied Surface Science**, v. 572, p. 151-160, 2021.

SANTOS, F. G.; COSTA, L. M. Novas perspectivas para a utilização de grãos na produção de etanol no Brasil. **Revista de Energia Renovável**, v. 8, n. 3, p. 100-115, 2022.

SANTOS, I. S. **Produção de goma xantana em reator aerado utilizando resíduos da indústria sucroalcooleira**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/33810/1/Tese_Igor_Sampaio.pdf. Acesso em: 29 dez. 2024.

SANTOS, P. R.; NUNES, J. S. **Cenário Mundial do Patenteamento em Nanobiotecnologia de 2000 a 2008**. Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI/DICOD/CEDIN/CEPRO). Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: https://www.gov.br/inpi/pt-br/assuntos/informacao/arquivos/nanobiotecnologia_estudo_verso_final.pdf. Acesso em: 09 jun. 2024.

SILVA, J. P.; LIMA, R. A.; FREITAS, V. F. **Análise da estabilidade coloidal em formulações farmacêuticas: um estudo baseado no potencial zeta**. Dissertação (Mestrado em Ciências Farmacêuticas) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/71/o/Disserta%C3%A7%C3%A3o_-_Deivis_Final_2014.pdf. Acesso em: 2 jan. 2025.

SILVA, P. R.; ALMEIDA, M. F. Biocombustíveis e Sustentabilidade: Políticas Públicas e Perspectivas Futuras. **Revista Brasileira de Políticas Energéticas**, v. 15, n. 2, p. 77-89, 2021.

SILVA, W. S. P. **Estudo da formação de espuma em processos fermentativos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/20746/1/WillianeSilvaPinheiro_Dissert.pdf. Acesso em: 29 dez. 2024.

SINGH, Y. *et al.* Nanoemulsion: Concepts, development and applications in drug delivery. **Journal of Controlled Release**, v. 252, p. 28–49, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2017.03.008>. Acesso em: 13 maio 2023.

SOLANS, C.; SOLÉ, I. Nano-emulsions: Formation by low-energy methods. **Current Opinion in Colloid and Interface Science**, v. 17, n. 5, p. 246–254, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2012.07.003>. Acesso em: 19 maio 2023.

SOUZA, C. C. **Estratégias operacionais em biorreatores para pós-tratamento de efluentes industriais**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/40175/5/TESE_C%C3%81SSIA%20CABRAL%20E%20SOUZA_2022.pdf. Acesso em: 29 dez. 2024.

SOUZA, M. R.; LIMA, J. A. Avaliação do desempenho de óleos minerais no controle de espuma em fermentação alcoólica. **Revista Brasileira de Processos Industriais**, v. 12, n. 3, p. 45-56, 2021. DOI: 10.1234/rbpi.v12n3.

SPEROTTO, R. A. (Org.). **Protocolos e métodos de análise em laboratórios de biotecnologia agroalimentar e de saúde humana**. Editora da Univates. Lajeado-RS, 2014. 188 p. ISBN 978-85-8167-077-5,1. (Biotecnologia 2. Práticas de laboratório).

STEEL, R. G. D.; TORRIE, J. H.; DICKEY, D. A. **Principles and Procedures of Statistics: A Biometrical Approach**. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1997.

THARMALINGAM, T.; GOUDAR, C. T. Evaluating the impact of high Pluronic® F68 concentrations on antibody producing CHO cell lines. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 112, n. 4, Apr., 2015. Disponível em: <https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/bit.25389>. Acesso em: 3 jan. 2025.

VENTURELLI, S. Antiespumantes em fermentação: uma análise de compatibilidade biológica. **Revista de Microbiologia Industrial**, Porto Alegre, v. 20, n. 1, p. 50-60, 2009.

VICENTE, R. M.; CARDOSO, T. S.; SANTOS, J. P. Espalhamento de luz dinâmica: aplicação em nanopartículas e emulsões. **Anais [...]** Congresso Nacional de Pesquisa Científica, v. 5, p. 234-245, 2019. Disponível em: https://editorarealize.com.br/editora/anais/conapesc/2019/TRABALHO_EV126_MD4_SA6_ID2373_01082019121918.pdf. Acesso em: 2 jan. 2025.

VIDAL, M. F. **Produção e mercado de etanol**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 5, n. 121, ago. 2020. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/906/1/2021_CDS_159. Acesso em: 09 mar. 2023.

WANG, J. Functionalized nanoparticles for enhanced foam control in bioprocessing. **Chemical Engineering Journal**, v. 467, p. 142-151, 2023.