

Modelagem e simulação do crescimento de biofilme microbiano e consequências do *biofouling* em sistemas de combustível

Helena Clemente de Barros^{a, b, *}, Sara Horácio de Oliveira Maciel^{a, b, c}, Felipe Pedro da Costa Gomes^{a, d}

^aDepartamento de Engenharia Química, Centro de Tecnologia e Geociências - UFPE, Av. dos Economistas, s/n, Recife 50740-590, Pernambuco, Brasil

^bLaboratório de Materiais Compósitos e Integridade Estrutural (CompoLab), Instituto de Pesquisa em Petróleo e Energia (i-LITPEG) - UFPE, Av. dos Economistas, s/n, Recife 50740-590, Pernambuco, Brasil

^cLaboratório de Microbiologia (MICRO), Departamento de Engenharia Química, Centro de Tecnologia e Geociências - UFPE, Av. dos Economistas, s/n, Recife 50740-590, Pernambuco, Brasil

^dLaboratório de Transformação Material (LABTRAMA), Departamento de Engenharia Química, Centro de Tecnologia e Geociências - UFPE, Av. dos Economistas, s/n, Recife 50740-590, Pernambuco, Brasil

* helena.cbarros@ufpe.br

RESUMO

O *biofouling*, fenômeno caracterizado pelo acúmulo de biofilmes, microrganismos ou macrorganismos e substâncias poliméricas extracelulares (EPS) produzidos por esses, associados a produtos de corrosão, substâncias dissolvidas e adsorvidas é capaz de comprometer a eficiência hidráulica em sistemas de abastecimentos, ocasionando redução no diâmetro útil, incremento da rugosidade interna e congestionamento de tubulações. Tais alterações podem levar a falhas estruturais e operacionais nas aeronaves, além de promoverem a corrosão induzida microbiologicamente (CIM). Este trabalho propõe a integração entre a modelagem biocinética do crescimento e maturação de microrganismos e a simulação hidráulica de tubulações para promover o estudo das consequências da contaminação e do depósito de biofilme, tomando como exemplo representativo o querosene de aviação.

Palavras-chave: biofilme; dwsim; modelagem; biofouling.

1. O problema central

A integridade operacional dos sistemas de combustível na aviação é um pilar crítico para a segurança de voo, sendo ameaçada pela contaminação microbiológica do querosene de aviação (QAV). Embora o combustível seja um meio predominantemente hidrofóbico, a presença de água livre, proveniente de condensação térmica ou falhas no armazenamento, cria uma interface bifásica ideal para o desenvolvimento de microrganismos sésseis (Lobato et al., 2023; Pruski & Sprynskyy, 2024). Conforme apontado por Hu et al. (2019), tanques de combustível de aeronaves podem abrigar uma diversidade de bactérias e fungos capazes de metabolizar hidrocarbonetos, cuja proliferação não depende necessariamente do tempo de serviço da aeronave, mas sim das condições ambientais de exposição.

O perigo inerente a essa contaminação manifesta-se através da formação de biofilmes, definidos como comunidades microbianas complexas envoltas em uma matriz de substâncias poliméricas extracelulares (EPS) (Pruski & Sprynskyy, 2024). Esta matriz confere proteção mecânica e química aos microrganismos, dificultando sua erradicação por métodos convencionais (Caixeta et al., 2012; Cloete, 2003). O acúmulo dessa biomassa, conhecido como *biofouling*, altera a topografia interna das tubulações, resultando no incremento da rugosidade absoluta e na redução do diâmetro útil de escoamento, podendo ocasionar entupimentos (Barthel, 1998; Shineh et al., 2023). Do ponto de vista da engenharia de sistemas, essas alterações físicas impõem uma resistência adicional ao fluxo, elevando o fator de atrito e demandando uma potência de bombeamento superior para a manutenção das vazões de projeto. Caso a infraestrutura não suporte tal incremento energético, observa-se uma queda drástica na pressão de saída e na vazão volumétrica, fenômenos que podem levar ao colapso hidráulico do sistema de alimentação (Ali et al., 2023).

1.1. Consequências para a aeronave

A falha na detecção precoce da contaminação do combustível pode evoluir para cenários catastróficos. Relatórios de investigação de acidentes, como o emitido pelo NTSB (2023), descrevem perdas de potência do motor em aeronaves de asa rotativa e fixa devido à presença de água e substâncias poliamidas nos sistemas de combustível, visualmente identificadas como uma substância vermelha que obstruiu a bomba de combustível do helicóptero e contaminou o fluido. Além dos riscos imediatos ao funcionamento, a persistência do biofilme

favorece a corrosão induzida microbiologicamente (CIM), um processo eletroquímico acelerado por metabólitos ácidos que compromete a integridade estrutural de ligas metálicas aeronáuticas (Ali et al., 2023; Portella et al., 2009).

2. Metodologia

A estratégia metodológica deste trabalho visou a modelagem e simulação em estado estacionário de uma linha de transferência de combustível aeronáutico (QAV-1) utilizando o software DWSIM v9.0.5. A abordagem baseou-se em um acoplamento paramétrico entre modelos biocinéticos e simulação hidráulica convencional para representar a dinâmica do *biofouling* microbiano e seus impactos operacionais.

2.1. Modelo e parâmetros adotados para simular o crescimento microbiológico

A cinética de crescimento vertical do biofilme foi quantificada por meio do modelo heurístico de interface proposto por Bravo et al. (2023), que descreve a evolução da altura da colônia (h) com o tempo (t), através da equação diferencial apresentada na Equação (1) abaixo.

$$\frac{dh}{dt} = \alpha * \min(h, L) - \beta * h \quad (1)$$

Onde α é a taxa de crescimento, β é a taxa de decaimento e L é a altura da camada ativa de crescimento (Bravo et al., 2023).

A contaminação de querosene de aviação (QAV-1) por microrganismos é caracterizada pela presença de linhagens com alta capacidade adaptativa e de degradar hidrocarbonetos. Entre os agentes fúngicos, o *Hormoconis resinae* é descrito como o principal contaminante em tanques de armazenamento, sendo capaz de utilizar o combustível como única fonte de carbono e energia para sua proliferação (Lobato et al., 2023). O crescimento desse fungo ocorre por meio de hifas miceliais que se organizam na interface combustível-água, resultando na formação de uma biomassa espessa e gelatinosa, denominada "borra" (Lobato et al., 2023). Além da obstrução física de componentes, o metabolismo do *H. resinae* promove a secreção de ácidos orgânicos, que reduzem o pH do meio e comprometem a integridade de ligas metálicas aeronáuticas, abrindo espaço para atuação da corrosão microbiologicamente influenciada (Lobato et al., 2023).

De mesmo modo, o gênero *Pseudomonas* destaca-se como um representante bacteriano gram-negativo recorrente em sistemas de combustível. Esse microrganismo apresenta uma robusta capacidade de degradação de hidrocarbonetos e produção de biossurfactantes, mecanismos que facilitam a colonização e a estabilização de biofilmes densos nas superfícies internas de tubulações e tanques (Pruski & Sprynsky, 2024). Embora ambos microrganismos citados possuam descrições importantes quanto ao seu impacto qualitativo e biológico, a escassez literária de parâmetros cinéticos quantitativos resulta na utilização de modelos matemáticos baseados em representantes com dados consolidados.

Com base nisso, para uma simulação de crescimento mais severo de biofilme, foram adotados os parâmetros experimentais validados por Bravo et al. (2023) para o microrganismo *Klebsiella pneumoniae*, considerando os dados expostos na Tabela 1.

Tabela 1. Dados experimentais da cinética de crescimento da *Klebsiella pneumoniae*

Taxa	Valor
α - Crescimento (1/h)	1,612
β - Decaimento (1/h)	0,068
L - Camada ativa (μm)	17,338

Fonte: Bravo et al. (2023)

2.2. Composição e configuração termodinâmica do combustível

Para representar o querosene de aviação (QAV-1) no simulador DWSIM, definiu-se uma mistura focada na representação próxima em densidade, viscosidade cinemática e intervalo de ebulição, dados fornecidos pela Vibra Energia (2021) por meio da Ficha com Dados de Segurança (FDS) para o QAV-1. A composição de 49% de n-dodecano e 50,9% de tolueno utilizada mimetiza a densidade relativa de 0,804, a viscosidade cinemática na faixa de 1,0 a 2,4 mm²/s a 40° C e o intervalo de ebulição entre 150°C e 300°C a 1 atm estabelecidos, dados importantes para simular o escoamento do fluido e conferidos por meio de análises disponíveis no DWSIM.

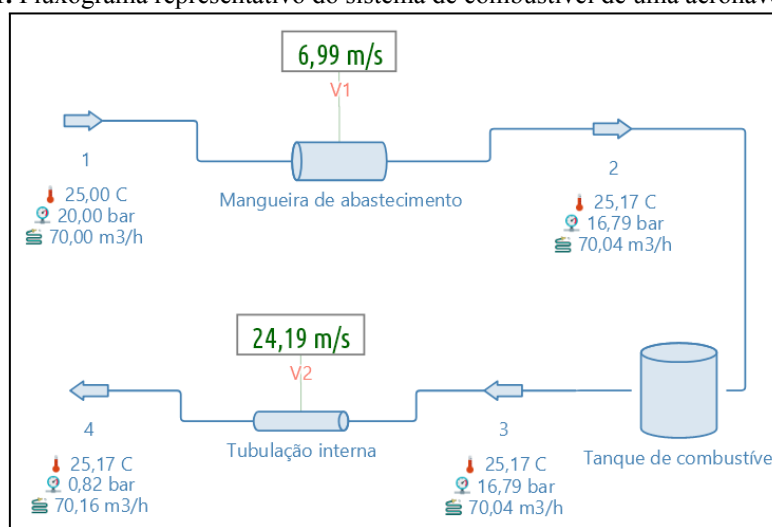
Dado isso, o n-dodecano representa a fração parafínica central da cadeia de hidrocarbonetos, enquanto o tolueno representa a presença de aromáticos, conjuntamente simulando cadeias carbônicas variando de 9 a 16

carbonos, como descrito na FDS para o combustível (Petrobras, 2019). Ademais, foi incluída uma fração de 0,1% de água para representar a umidade residual, fundamentada em protocolos experimentais de biodeterioração que utilizam a proporção de 1000:1 (combustível/água) para simular umidade residual e água livre (Lobato et al., 2023). Dadas as condições estabelecidas, o pacote termodinâmico utilizado foi o Peng-Robinson (PR), ideal para misturas de hidrocarbonetos (Al-Malah, 2017).

2.3. Fluxograma representativo do sistema de combustível em aeronaves

Para simular o efeito do acúmulo de biofilme nas tubulações, foi esquematizado o fluxograma simplificado de um sistema de abastecimento, apresentado na Figura 1.

Figura 1. Fluxograma representativo do sistema de combustível de uma aeronave genérica.



Fonte: elaborado pelos autores (2026)

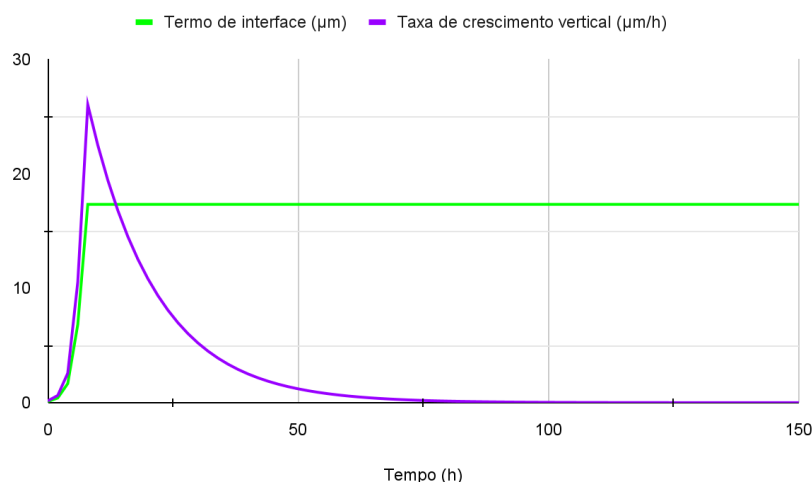
Os diâmetros na mangueira de abastecimento foram estabelecidos a partir da média dos diâmetros interno e externo da mangueira industrial Avio Global C, respectivamente, 59,5 mm e 75 mm (Hennings, 2026). De mesmo modo, a pressão inicial da corrente foi determinada pelos dados fornecidos de pressão máxima de trabalho suportada pela mangueira. A vazão inicial da corrente 1 (70 m³/h), descrita na Figura, foi estabelecida de acordo com os dados da Unidade de Abastecimento de Aeronaves 300GPM (UAA - 300GPM) com JET-A1, disponibilizados pela empresa Rucker Equipamentos (2026) através de seu site.

Por fim, segundo a *Experimental Aircraft Association* (EAA), o diâmetro interno mínimo da tubulação rígida entre o tanque e o filtro de combustível de linha (*gascolator*) deve ser de $\frac{3}{8}$ ", aproximadamente 9,53 mm. Para simular com os dados de entrada inseridos, a melhor escolha de diâmetros externo e interno foi, respectivamente, de 38 e 32 mm, de forma a permitir a conversão do sistema.

3. Resultados e discussão

Para simular e analisar a progressão do crescimento do biofilme de *Klebsiella pneumoniae*, os dados e a metodologia descrita foram processados utilizando-se o *Google Sheets*. Este *software* de planilhas eletrônicas possibilitou a aplicação de fórmulas matemáticas simples, como a do modelo heurístico proposto por Bravo et al. (2023). A evolução temporal da taxa de crescimento e do termo de interface do microrganismo é apresentada graficamente na Figura 2.

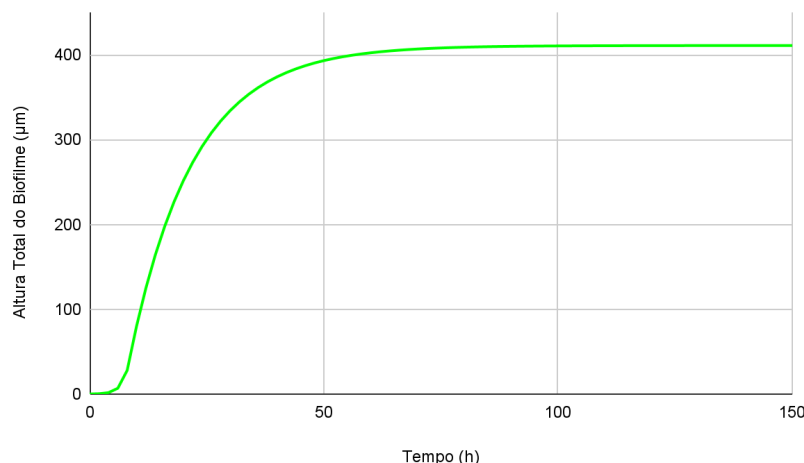
Figura 2. Gráfico da evolução temporal da taxa de crescimento e do termo de interface para *Klebsiella pneumoniae*



Fonte: elaborado pelos autores (2026)

Os resultados descritos pela Figura 2 expõem o comportamento dinâmico do modelo de interface de Bravo et al. (2023), simulando a transição biocinética de uma colônia microbiana ao longo de 150 horas. O termo de interface, representado matematicamente por $\min(h, L)$, indica que o crescimento é inicialmente proporcional à altura total do biofilme (h), observada na Figura 3, até que esta atinja o limite da camada ativa (L), ponto em que a difusão de nutrientes torna-se o fator limitante e a curva de interface atinge um patamar constante (Bravo et al., 2023). Em paralelo, a taxa de crescimento vertical descreve a velocidade líquida de expansão do biofilme. Ela apresenta um pico de intensidade quando a camada ativa é estabelecida e entra em declínio exponencial subsequente, fenômeno observado na Figura 2.

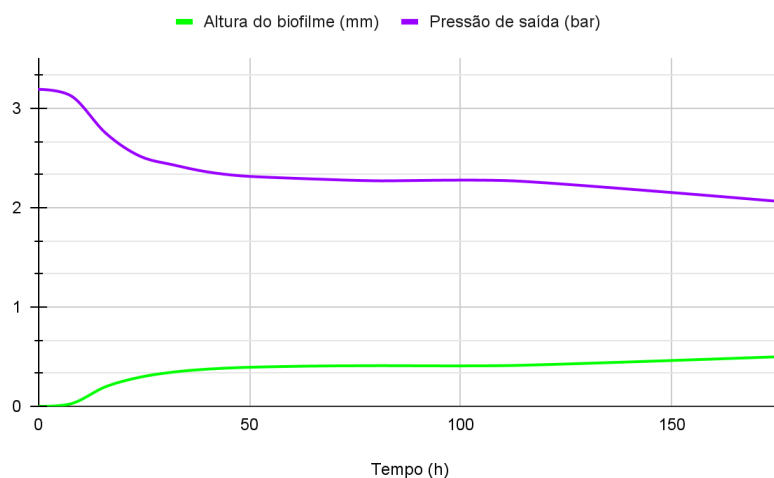
Figura 3. Gráfico da curva de crescimento do biofilme: transição do regime exponencial para o equilíbrio estacionário



Fonte: elaborado pelos autores (2026)

Para análise das consequências do *biofouling*, dada a modelagem de crescimento microbiano reproduzida, foi elaborado o gráfico descrito na Figura 4, com os valores retornados pelo fluxograma apresentado na Figura 1, localizado no item 2.3. deste trabalho. Foram representadas as alterações verificadas na pressão de saída da tubulação em 14 pontos temporais diferentes, ao longo de 150 horas pela deposição do biofilme.

Figura 4. Visualização gráfica do impacto da formação de biofilme na tubulação sobre a pressão do sistema.



Fonte: Elaborada pelos autores (2026)

O gráfico da Figura 4 expõe a diminuição da pressão de saída da tubulação de transporte de combustível na aeronave, com o avanço da altura do biofilme ao longo do tempo. E quando este atinge o estado de maturação, onde o crescimento sésil diminui e parte da microbiota pode migrar do modo de vida sésil ao planctônico (Ali et al., 2023).

Como a maturação é representada pelo estado estacionário do crescimento, passível de observação nas Figuras 2 e 3 deste documento, a altura do biofilme estabiliza e o processo de desprendimento de partes deste biofilme entra em ação, liberando fragmentos do material na corrente que passa pela tubulação. A partir desse momento, o biofilme atinge novos locais de deposição, ocasionando novas contaminações e promovendo a biocorrosão e o seu acúmulo em sistemas de transporte. Esse acúmulo pode levar à obstrução de tubulações, além de falhas operacionais e estruturais, visto que a perda de diâmetro útil de operação acarreta sobrecarga do sistema de bombeamento para compensar a energia necessária de vazão de saída (Ali et al., 2023). O fenômeno da biocorrosão é uma das consequências do *biofouling*, e um dos problemas a se considerar, uma vez que pode acarretar dissolução metálica, formando produtos de corrosão e incrustações, que danificam a estrutura das tubulações (Santos et al., 2022).

Portanto, é relevante o monitoramento e a manutenção constantes de tubulações com risco de contaminação por microrganismos, visto que, apesar da altura do biofilme estabilizar em 0,4 mm, em um período de aproximadamente 150 horas, é essencial levar em consideração a deposição do material que diminui o diâmetro útil da tubulação e, consequentemente, continua a ocasionar a queda na pressão de operação.

4. Conclusões e perspectivas futuras

O trabalho possibilitou encontrar um modelo viável para estudo acadêmico, com parâmetros de crescimento relacionados a bactérias produtoras de biofilmes, passível de ser utilizado como guia para experimentos futuros, utilizando outros microrganismos mais frequentes nos problemas de contaminação de combustível de aviação, tais como as bactérias do gênero *Pseudomonas* e o fungo *Hormoconis resiniae*. A literatura é escassa em relação à simulação de crescimentos biológicos, sendo necessária diversas contribuições na área.

Agradecimentos: Os autores agradecem o apoio financeiro do Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - PRH-ANP, gerido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2025/03493-5. Em especial ao PRH30/UFPE.

Referências

- Ali, A., Zahra, A., Kamthan, M., Husain, F. M., Albalawi, T., Zubair, M., Alatawy, R., Abid, M., & Noorani, M. S. (2023). Microbial Biofilms: Applications, *Clinical Consequences, and Alternative Therapies*. *Microorganisms*, 11(8), 1934. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11081934>
- Al-Malah, K. I. M. (2017). *Aspen Plus: Chemical engineering applications*. John Wiley & Sons.

Aviation investigation final report: Robinson helicopter company r44 ii (WPR23LA263; p. 7). (2023). NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD (NTSB).

Barthel, L. (1998). Estudo de biofilme desenvolvido em reator de leito fluidizado trifásico aeróbio no tratamento de efluentes têxteis [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina]. *Repositório Institucional da UFSC*. <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/77419>

Bravo, P., Lung Ng, S., MacGillivray, K. A., Hammer, B. K., & Yunker, P. J. (2023). Vertical growth dynamics of biofilms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(11). <https://doi.org/10.1073/pnas.2214211120>

Caixeta, D. S., Scarpa, T. H., Brugnera, D. F., Freire, D. O., Alves, E., de Abreu, L. R., & Piccoli, R. H. (2012). Chemical sanitizers to control biofilms formed by two *Pseudomonas* species on stainless steel surface. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 32(1), 142-150. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612012005000008>

Cloete, T. E. (2003). Resistance mechanisms of bacteria to antimicrobial compounds. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 51(4), 277-282. [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(03\)00042-8](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(03)00042-8)

EAA. (1993). *A fuel systems review*. Experimental Aircraft Association. <https://www.eaa.org/aaa/aircraft-building/builderresources/while-youre-building/building-articles/fuel-systems-a-fuel-systems-review>

Hennings. (2026). *Mangueira industrial avião Global-C*. <https://hennings.com.br/produtos/industrial/mangueiras-industriais/mangueiras-para-abastecimento-de-aeronaves/mangueira-industrial-avio-global-c/>

Hu, D., Zeng, J., Wu, S., Li, X., Ye, C., Lin, W., & Yu, X. (2019). A survey of microbial contamination in aviation fuel from aircraft fuel tanks. *Folia Microbiologica*, 65(2). <https://doi.org/10.1007/s12223-019-00744-w>

Lobato, M. R., Cazarolli, J. C., Rios, R. D. F., D'Alessandro, E. B., Lutterbach, M. T. S., Filho, N. R. A., Pasa, V. M. D., Pedro, D. A., Scorza, R., & Bento, F. M. (2023). Behavior of deteriorogenic fungi in aviation fuels (fossil and biofuel) during simulated storage. *Brazilian Journal of Microbiology*, 54, 1603-1621. <https://doi.org/10.1007/s42770-023-01055-6>

Kleber Franke Portella, A. Joukoski, Scheffer, A., Nicole Machuca Brassac, & Carlos Eduardo Belz. (2009). Biofouling e biodeterioração química de argamassa de cimento portland em reservatório de usina hidroelétrica. *Química Nova*, 32(4), 1047-1051. <https://doi.org/10.1590/s0100-40422009000400037>

Pruski, D., & Myroslav Sprynskyy. (2024). Jet Fuel Contamination: Forms, Impact, Control, and Prevention. *Energies*, 17(17), 4267-4267. <https://doi.org/10.3390/en17174267>.

Rucker (2026). *Caminhão de abastecimento JET*. <https://rucker.ind.br/produto/caminhao-abastecimento-jet/>

Santos, E. D. S., Lemos, L. D. C., Gonçalves, L. S., Lione, V. F., Lutterbach, M. T. S., & Heggendorn, F. L. (2022). Biocorrosão e o biofouling – uma revisão de literatura. Em E. Científica Digital, Open Science Research VII (1º ed., p. 193-205). *Editora Científica Digital*. <https://doi.org/10.37885/221110775>

Sauer, K., Rickard, A. H., & Davies, D. G. (2007). Biofilms and biocomplexity. *Microbe*, 2(7), 347-353.

Shineh, G., Mobaraki, M., Perves Bappy, M. J., & Mills, D. K. (2023). Biofilm formation, and related impacts on healthcare, food processing and packaging, industrial manufacturing, marine industries, and sanitation—A review. *Applied Microbiology*, 3(3), 629-665. <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol3030044>

Souza, V. R. S. de, Alves, C. F., de Lucena, L. F., Silva, L. C. C., de Albuquerque Xavier, E., da Silva Jr., C. J. G., Converti, A., Gouveia, R. L., & Sarubbo, L. A. (2025). Strategies for biofouling control: A review from an environmental perspective of innovation and trends. *Coatings*, 15(10), 1185. <https://doi.org/10.3390/coatings15101185>

Vibra Energia S.A. (2021, 10 de setembro). *Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico (FISPQ): QAV-1 (Versão 10)*. <https://www.vibraenergia.com.br/sites/default/files/2023-11/fispq-vibra-qav-jet-a.pdf>