

Hidrodinâmica em reatores biológicos de leito empacotado para tratamento de efluentes

DOI: 10.5281/zenodo.17012871

Iago Cezario de Souza ^{a*}

This article provides a focused analysis on the hydrodynamic evaluation of packed bed biological reactors, which is crucial for the optimization of wastewater treatment processes. It addresses the importance of hydrodynamics, detailing methodologies such as Residence Time Distribution (RTD) curves to understand fluid flow behavior. The discussion highlights the impact of factors such as hydraulic detention time, recirculation, and aeration on reactor performance, emphasizing the identification and minimization of dead zones and short circuits. The article also suggests future research directions, including the exploration of new packing media and advanced modeling tools to improve reactor efficiency and sustainability.

Este artigo oferece uma análise focada na avaliação hidrodinâmica de reatores biológicos de leito empacotado, crucial para a otimização de processos de tratamento de efluentes. Aborda a importância da hidrodinâmica, detalhando metodologias como as Curvas de Distribuição de Tempo de Residência (DTR) para compreender o comportamento do fluxo de fluidos. A discussão destaca o impacto de fatores como tempo de detenção hidráulica, recirculação e aeração no desempenho do reator, enfatizando a identificação e minimização de zonas mortas e curtos-circuitos. O artigo também sugere futuras direções de pesquisa, incluindo a exploração de novas mídias de empacotamento e ferramentas avançadas de modelagem para aprimorar a eficiência e sustentabilidade dos reatores.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

*E-mail: iagocezario@gmail.com

Palavras-chave: Hidrodinâmica; reatores biológicos; leito empacotado; tratamento de efluentes; DTR.

Recebido em 16 de julho de 2025,

Aprovado em 15 de agosto de 2025,

Publicado em 31 de agosto de 2025.

Introdução

O crescente volume de efluentes gerados por atividades urbanas e industriais impõe desafios significativos aos sistemas de tratamento, demandando soluções compactas e eficientes que atendam aos rigorosos padrões de lançamento. Nesse contexto, os reatores biológicos de leito empacotado (*packed-bed biological reactors*) emergem como uma tecnologia promissora, oferecendo um ambiente propício para o crescimento e a imobilização de biomassa ativa, o que otimiza a degradação de poluentes.^{1,2} A eficácia desses reatores, contudo, não se limita apenas à cinética microbiana, estando também profundamente relacionada aos fenômenos físicos que regem o escoamento do fluido em seu interior, ou seja, à sua hidrodinâmica.^{1,3}

A hidrodinâmica de um reator refere-se ao estudo do movimento dos fluidos e da distribuição de seus componentes dentro do sistema. Em reatores de leito empacotado, a presença de um material de suporte para a biomassa pode induzir um escoamento não uniforme, levando à formação de caminhos

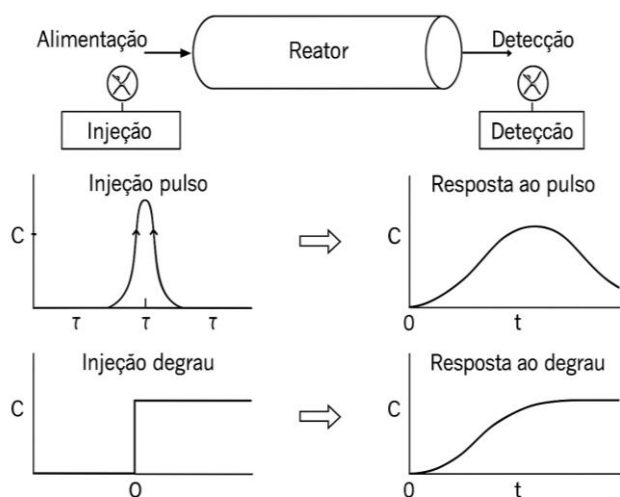
preferenciais, zonas mortas (*dead zones*) e curtos-circuitos (*short-circuits*).¹ Tais anomalias comprometem o contato entre o efluente e a biomassa, reduzindo a eficiência do tratamento e, consequentemente, a qualidade do efluente final. A compreensão e a otimização da hidrodinâmica são, portanto, cruciais para maximizar o desempenho desses sistemas.⁴

Este trabalho busca expandir a discussão sobre a hidrodinâmica em reatores de leito empacotado por meio de uma pesquisa científica. O objetivo é analisar a relevância da hidrodinâmica na operação desses reatores, detalhando as metodologias empregadas para sua avaliação, com ênfase nas Curvas de Distribuição de Tempo de Residência (DTR), e discutindo as implicações dos resultados para a otimização de processos de tratamento de efluentes. O artigo visa não apenas sintetizar o conhecimento existente, mas também oferecer uma perspectiva inovadora sobre a aplicação prática desses conceitos, contribuindo para o avanço da pesquisa e desenvolvimento de tecnologias mais eficientes no saneamento ambiental.

Metodologia

A avaliação hidrodinâmica de reatores é um passo fundamental para compreender o comportamento do fluxo de fluidos e, consequentemente, otimizar o desempenho de sistemas de tratamento. Entre as ferramentas mais eficazes para essa análise, destacam-se as Curvas de Distribuição de Tempo de Residência (DTR), que fornecem informações cruciais sobre a distribuição dos tempos que as partículas de fluido permanecem dentro do reator.⁵ Essas curvas permitem identificar desvios do comportamento ideal, como a presença de zonas mortas, curtos-circuitos ou mistura incompleta, que podem comprometer a eficiência do processo.^{1,5}

Figura 1. Representação da determinação da DTR em um reator tubular, com injeção de pulso e degrau e suas respectivas respostas na saída do sistema. Autoral.



O conceito de Distribuição do Tempo de Residência (DTR) tem como base a caracterização do comportamento hidrodinâmico de reatores por meio da introdução de um traçador, substância inerte de fácil detecção e que não interage quimicamente com o meio reacional na corrente de alimentação. A variação da concentração deste traçador é monitorada na saída do sistema ao longo do tempo, possibilitando a construção de curvas que refletem a distribuição dos tempos de permanência das partículas fluidas no interior do reator. Esse procedimento permite avaliar a existência de fenômenos como zonas mortas, recirculações internas e desvios de idealidade em relação aos modelos teóricos.^{1,5}

Os métodos experimentais convencionais são: a injeção em pulso (*pulse input*) e a injeção em degrau (*step input*). No primeiro, uma pequena quantidade de traçador é

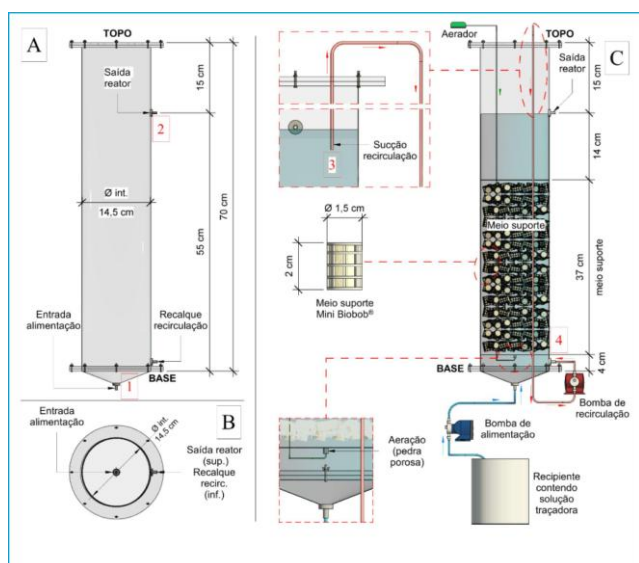
introduzida de forma quase instantânea na entrada do reator, funcionando como um estímulo breve e concentrado. A curva de concentração obtida na saída, denominada “resposta ao impulso”, é normalizada para gerar a função $E(t)$, que representa a fração de fluido que permanece no reator por um tempo t . Já no método de injeção em degrau, a concentração do traçador é alterada abruptamente de zero para um valor constante, sendo a resposta monitorada ao longo do tempo. A curva resultante, chamada resposta ao degrau, permite calcular a função $F(t)$, que representa a fração cumulativa do fluido que deixou o sistema até o tempo t . Ambas as metodologias são fundamentais para a análise do regime de escoamento e para a identificação de desvios em relação ao comportamento ideal de reatores.⁶

No estudo desenvolvido por V. G. Ribicki, A. C. Barana e G. Vuitik, realizado na Universidade Federal do Paraná (UFPR), avaliou-se o comportamento hidrodinâmico de um reator biológico de leito empacotado operado em regime de fluxo ascendente (*upflow*), com volume útil de 10,08 L e preenchido com material suporte do tipo Mini Biobob®.¹ O sistema foi submetido a ensaios de estímulo-resposta por injeção em pulso com adição de traçador conservativo (inerte), a fim de determinar a distribuição do tempo de residência (DTR) sob diferentes condições operacionais. Os experimentos foram conduzidos com tempos de detenção hidráulica (TDHs) de 8, 14 e 20 horas, razões de recirculação de 0, 1 e 2, e sob regimes com e sem aeração. A escolha dessas variáveis permitiu avaliar a influência do TDH, que regula o tempo de contato entre o efluente e a biomassa aderida ao meio suporte, bem como os efeitos da recirculação na promoção da mistura hidráulica e na mitigação de zonas mortas no interior do reator.^{1,7}

A análise das DTRs permite estimar parâmetros hidrodinâmicos de grande importância, como o tempo médio de residência, a variância e o número de tanques em série, os quais fornecem indicativos relevantes sobre o grau de mistura e possíveis desvios do escoamento ideal em reatores. No trabalho conduzido por V. G. Ribicki, A. C. Barana e G. Vuitik, foram realizados ensaios experimentais com o objetivo de avaliar essas características.¹ Os resultados obtidos revelaram tempos médios de residência consistentemente inferiores ao tempo de detenção hidráulica (TDH), o que pode sugerir a ocorrência de trajetórias preferenciais ou passagens rápidas do fluido através do sistema.⁸

Verificaram-se, ainda, valores elevados de variância e baixos valores do número de tanques em série, o que aponta para uma dispersão significativa dos tempos de permanência.

Figura 2. Representação de um reator biológico de leito empacotado: (A) frontal, (B) superior, (C) esquema de operação. Extraído da referência 1



A aplicação rigorosa dessa metodologia é crucial para o diagnóstico preciso do comportamento hidrodinâmico de reatores de leito empacotado. Ao identificar as condições operacionais que promovem um fluxo mais próximo do ideal, é possível otimizar o projeto e a operação desses sistemas, maximizando a eficiência na remoção de poluentes e garantindo a conformidade com os padrões de descarte de efluentes.⁹ A compreensão detalhada da metodologia empregada nos estudos permite não apenas replicar os experimentos, mas também adaptar e inovar em futuras pesquisas, explorando novas configurações e materiais de leito para aprimorar ainda mais o desempenho hidrodinâmico.

Resultados e discussão

Os resultados obtidos na avaliação hidrodinâmica de reatores biológicos de leito empacotado são fundamentais para a compreensão e otimização de seu desempenho no tratamento de efluentes. A análise das Curvas de Distribuição de Tempo de Residência (DTR) permite inferir o comportamento do fluxo dentro do reator, revelando a extensão da mistura, a presença de zonas mortas e a ocorrência de curtos-circuitos hidráulicos.¹⁰ Esses fatores, por sua vez, impactam diretamente a eficiência de remoção de poluentes e a estabilidade do processo.

Impacto do Tempo de Detenção Hidráulica (TDH) e Recirculação

Pesquisas experimentais têm demonstrado que variações nos Tempos de Detenção Hidráulica (TDHs) e nas razões de recirculação influenciam diretamente a hidrodinâmica de reatores de leito empacotado aplicados ao tratamento de esgoto sanitário.^{1,11} Observou-se que, na etapa não aerada, a redução do TDH pode favorecer a mistura do fluido, intensificando o contato entre o efluente e a biomassa imobilizada. Essa condição tende a otimizar os processos de transferência de massa, promovendo maior eficiência na degradação dos poluentes.

No entanto, as respostas também evidenciaram que, durante a operação aerada, a influência do TDH na mistura nem sempre é observada. Além disso, a variação das razões de recirculação pode não ter um impacto significativo na mistura em todas as operações, nem na espessura da camada limite ou na transferência de massa. Este achado é particularmente relevante, pois a recirculação é frequentemente empregada com o objetivo de melhorar a mistura e a transferência de massa em reatores de leito fixo.¹¹ Assim, os resultados da pesquisa sugerem que, para certos tipos de reatores e condições testadas, o aumento da recirculação além de um certo ponto pode não trazer benefícios hidrodinâmicos adicionais. Isso tem implicações importantes para a otimização energética e operacional, indicando que investimentos em recirculação excessiva podem não se traduzir em ganhos proporcionais de desempenho hidrodinâmico.

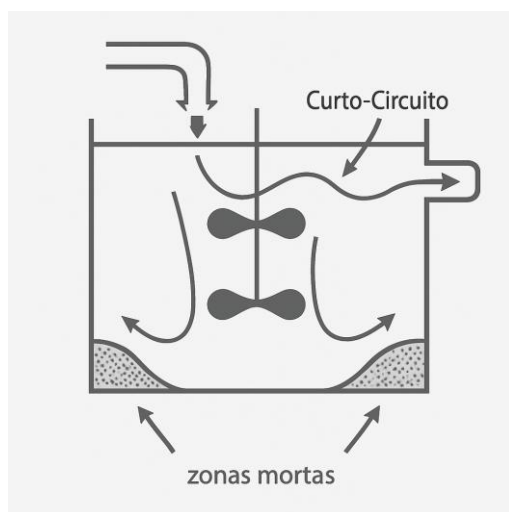
Identificação e Minimização de Volumes Mortos e Curtos-Circuitos

Estudos utilizando as Curvas de Distribuição de Tempo de Residência (DTR) têm sido eficazes na quantificação desses volumes mortos e na identificação de curtos-circuitos. Por exemplo, a discrepância entre o Tempo de Detenção Hidráulica (TDH) médio experimental e o TDH teórico estipulado é um indicativo claro de inconsistências no escoamento, sugerindo que parte do fluido pode estar passando pelo reator mais rapidamente do que o esperado, ou que há regiões do reator que não estão sendo efetivamente utilizadas para o tratamento.¹² A análise detalhada das DTRs permite não apenas diagnosticar esses problemas, mas também orientar modificações no “*design*” do reator ou nas estratégias operacionais para mitigar seus efeitos negativos.

Um dos achados mais relevantes em diversas investigações é a presença de volumes mortos significativos,

com médias que variam conforme as condições operacionais. Essas zonas mortas são regiões com circulação inadequada, resultando em tempos de residência excessivos ou até estagnação do efluente.¹³ Outro fenômeno indesejado é o curto-circuito, no qual parte do fluido escoar rapidamente do ponto de entrada ao de saída sem tempo suficiente de reação, comprometendo o desempenho do reator. Ambos os efeitos reduzem o volume útil e a eficiência do sistema, favorecendo a formação de subprodutos ou microrganismos indesejados. A otimização do *design* e das condições operacionais é essencial para mitigar essas ineficiências.¹²

Figura 3. Representação de um reator com fluxo não ideal, destacando zonas mortas e curto-circuito. Extraído da referência 13.



Hidrodinâmica e Otimização do Tratamento de Efluentes

A principal implicação hidrodinâmica para a otimização reside na mitigação de volumes mortos e curtos-circuitos. A presença dessas anomalias de fluxo, diagnosticadas por meio das Curvas de Distribuição de Tempo de Residência (DTR), compromete significativamente o volume útil do reator e, conseqüentemente, a capacidade de tratamento. A discrepância entre o Tempo de Detenção Hidráulica (TDH) experimental e o teórico, por exemplo, é um indicador inequívoco de escoamento não ideal, resultando em contato insuficiente entre o efluente e a biomassa ativa. A otimização do *design* do reator e das estratégias operacionais, visando a eliminação ou redução dessas regiões de fluxo deficiente, é crucial para assegurar que a totalidade do volume do reator contribua efetivamente para a degradação dos poluentes, elevando a qualidade do efluente final.¹⁴

Adicionalmente, a hidrodinâmica influencia diretamente o aprimoramento da mistura e do contato efluente-biomassa. Um fluxo hidrodinamicamente otimizado garante uma distribuição uniforme do efluente, minimizando a formação de caminhos preferenciais e maximizando a interação entre os poluentes e os microrganismos imobilizados. Estudos indicam que a manipulação de parâmetros operacionais, como a redução do TDH em condições específicas, pode intensificar a mistura do fluido, promovendo uma degradação mais eficiente dos contaminantes. Tal constatação reforça que a compreensão aprofundada da hidrodinâmica permite ajustes operacionais que resultam em ganhos concretos na performance do tratamento.¹⁵

Por fim, a análise hidrodinâmica contribui para a eficiência energética e a sustentabilidade operacional. A identificação de que a recirculação excessiva pode não conferir benefícios hidrodinâmicos adicionais, oferece uma diretriz valiosa para evitar o consumo desnecessário de energia. A otimização do processo, portanto, não se restringe apenas à maximização da remoção de poluentes, mas também à minimização dos custos operacionais e do impacto ambiental.

Conclusões

A avaliação hidrodinâmica de reatores biológicos de leito empacotado é um componente indispensável para a otimização de seu desempenho no tratamento de efluentes. Conforme evidenciado pela revisão da literatura, a compreensão do comportamento do fluxo de fluidos dentro desses sistemas é tão crítica quanto a cinética microbiana para a eficiência global do processo.

Os estudos baseados nas Curvas de Distribuição de Tempo de Residência (DTR) são ferramentas poderosas para diagnosticar anomalias hidrodinâmicas, como volumes mortos e curtos-circuitos, que podem comprometer severamente a capacidade de tratamento do reator. A presença de volumes mortos significativos ressalta a necessidade de aprimoramentos no *design* e na operação para garantir que todo o volume útil do reator seja efetivamente utilizado para a degradação de poluentes.

Em última análise, a otimização hidrodinâmica de reatores biológicos de leito empacotado é fundamental para o desenvolvimento de tecnologias de tratamento de efluentes mais eficientes, compactas e sustentáveis. A inovação nesse campo reside não apenas na criação de novos materiais de suporte ou microrganismos, mas também na compreensão aprofundada e no controle dos fenômenos físicos que governam o transporte de massa e a interação entre o efluente

e a biomassa. Futuras pesquisas devem focar na exploração de novas configurações de reatores e na aplicação de ferramentas avançadas de modelagem para prever e otimizar o comportamento hidrodinâmico, pavimentando o caminho para soluções mais robustas e economicamente viáveis no saneamento ambiental.

Contribuições por Autor

A resenha sobre o artigo em referência e a inclusão de algumas observações são de Iago Cezario de Souza.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Ao grupo PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) pelo apoio ao Programa de Educação Tutorial pela oportunidade concedida. Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

Notas e Referências

1. V. G. Ribicki, A. C. Barana and G. Vuitik, Avaliação hidrodinâmica de um reator biológico de leito empacotado, *Engenharia Sanitária Ambiental*, 2024, **29**, 1-7.
2. M. Dezotti, G. L. S. Jr and J. P. Bassin, *Processos Biológicos Avançados: Para Tratamento de Efluentes e Técnicas de Biologia Molecular Para o Estudo da Diversidade Microbiana*, Editora Interciência, 1st edn., 2011.
3. H. S. Fogler, *Elements of Chemical Reaction Engineering*, Pearson, Boston Columbus Indianapolis, 5th edn., 2016.
4. Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*, McGraw-Hill, New York, 5th edn., 2014.
5. G. Tchobanoglous, F. L. Burton and H. D. Stensel, *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, McGraw-Hill, Boston, Mass., 4th edn., 2003.
6. N. K. Shamas, *Biological Treatment Processes: Volume 8*, Springer, New York, 1st edn., 2009.
7. E. M. A. Santos, G. M. M. S. Sampaio, R. C. Leitão, A. M. Facó, E. A. Menezes and S. T. Santaella, Influência do tempo de detenção hidráulica em um sistema UASB seguido de um reator biológico com fungos para tratar efluentes de indústria de castanha de caju, *Engenharia Sanitária Ambiental*, 2006, **11**, 39-45.
8. O. LEVENSPIEL, *CHEMICAL REACTION ENGINEERING*, WILEY EASTERN PRIVATE LIMITED, NEW DELHI, 1st edn., 1962.
9. R. A. F. Gatti, *Influência da variação do TDH e da taxa de recirculação no comportamento de reatores anaeróbio e aeróbio de leito fixo seguidos de filtro percolador na remoção de nitrogênio e fósforo*, Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campo Mourão, 2017.
10. P. A. Arpini, G. V. Tavares e A. M. Segadães, *Determinação da distribuição do tempo de residência em processos químicos através do processamento digital de imagens*, COBEQ-IC Proceedings, 2011, **13**, 123-130.
11. I. N. Henrique, J. T. Sousa, A. L. F. Souto, V. D. Leite e W. S. Lopes, *Ciência & Engenharia*, 2014, **23**, 103-113.
12. G. L. Foutch and A. H. Johannes, in *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, ed. R. A. Meyers, Academic Press, New York, 3rd edn., 2003.
13. M. M. Costa, T. de Assis, M. O. Marques e R. A. de Vasconcelos, *Determinação da conversão não ideal de um reator CSTR em diferentes agitações usando o modelo de desvio e volume morto*, Anais do XXI Encontro Nacional de Modelagem Computacional e IX Encontro de Ciência e Tecnologia de Materiais, seção Aplicações em Engenharia Química, Búzios, RJ, Brasil, 8-11 de outubro de 2018, 2-8.
14. M. Von Sperling, M. E. Verbyla e S. C. Oliveira, *Princípios do Tratamento Biológico de Esgotos*, UFMG, Belo Horizonte, 1st edn., 2020.

15. O. de Textos, Princípios básicos do tratamento de esgotos, Vol. 2, 2st edn. 2016. <https://www.ofitexto.com.br/principios-basicos-do-tratamento--de-esgotos/p>, (accessed 31 July 2025).