MODELAGEM MATEMÁTICA DA PRODUÇÃO DE LODO EM REATORES MBBR: EQUACIONAMENTO DO BIOFILME NO SOFTWARE BIOWIN

HELVÉCIO CARVALHO DE SENA[1]
Doutorado em Engenharia Sanitária e Ambiental – Poli-USP, Especialista em Modelagem Matemática, Especialista em Controle de Odores em ETEs e Elevatórias, Gerenciou Estações de Tratamento de Grande Porte na Região Metropolitana de São Paulo, tais como, ETE Barueri, ETE São Miguel Paulista e ETEs do Litoral de São Paulo.]

Endereço[1]: Rua Cel. João Cursino, 222, Vila Adyana, São José dos Campos, SP, 12.243-680, Brasil, helcsena@gmail.com.

RESUMO

A estimativa da produção de lodo em reatores de leito móvel com biofilme exige separar o inventário de biomassa aderida da massa efetivamente retirada do sistema. Este trabalho apresenta um equacionamento de balanço de massa compatível com a estrutura do modelo de biofilme do BioWin, aplicado ao elemento Media Bioreactor. O modelo é representado por camadas unidimensionais, com difusão de componentes solúveis, transporte de particulados, crescimento e decaimento microbiano, aderência, desprendimento e variação dinâmica da espessura. São formuladas as relações para área de mídia, volume líquido corrigido, massa de sólidos aderidos, produção de sólidos suspensos, descarte de lodo e idade do lodo total. Também são discutidos os parâmetros padrão de aderência e desprendimento e sua sequência de calibração. Uma aplicação demonstrativa baseada no histórico do Projeto BioWin mostra que a massa aderida (≈15,95 t SST) pode representar parcela dominante do inventário de sólidos, sem equivaler diretamente à produção diária de lodo. Conclui-se que a produção deve ser obtida pelas correntes externas de sólidos e reconciliada com o balanço de biomassa do biofilme, utilizando regime permanente para fechamento de massa e simulação dinâmica para avaliação de picos de desprendimento.

PALAVRAS-CHAVE: Biofilme; Produção de lodo; MBBR; IFAS; BioWin.

1. INTRODUÇÃO

Os reatores MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) utilizam meios suporte móveis para retenção de biomassa aderida, mantendo no mesmo volume líquido uma população microbiana com tempo de permanência parcialmente desacoplado do tempo de detenção hidráulica. A tecnologia foi concebida para explorar a elevada área específica protegida dos meios suporte e a fração de enchimento como variáveis de projeto (Ødegaard, 2006), e suas aplicações, critérios de projeto e desempenho em escala municipal foram consolidados em revisão recente (di Biase et al., 2019). Em configurações MBBR não há recirculação intencional de lodo biológico ao reator; em configurações IFAS (Integrated Fixed-Film Activated Sludge) coexistem biomassa suspensa recirculada e biofilme aderido. Em ambos os casos, o excesso de biofilme é transferido ao líquido por erosão ou desprendimento e precisa ser separado em decantação, flotação, filtração ou outra etapa de separação sólido-líquido (McQuarrie e Boltz, 2011; Oliveira, Volschan Junior e Piveli, 2013).

A produção de lodo não pode ser confundida com a massa de biofilme existente nas mídias. A massa aderida é um inventário interno; somente sua variação líquida e o material que deixa o sistema pelas correntes externas alteram o balanço global. Assim, a estimativa adequada exige considerar: crescimento bruto de biomassa, decaimento e transformação de sólidos, incorporação de material particulado afluente, aderência de sólidos suspensos, desprendimento do biofilme, perda de sólidos no efluente e descarte deliberado de lodo.

O BioWin representa processos MBBR e IFAS por meio do elemento Media Bioreactor e de um modelo dinâmico de biofilme unidimensional, integrado ao Activated Sludge/Anaerobic Digestion Model (ASDM). O manual descreve difusão, resistência na camada limite, transporte de particulados, aderência, desprendimento, variação de espessura, densidade variável e reações aeróbias, anóxicas e anaeróbias nas camadas do biofilme (EnviroSim, [s.d.], p. 1046-1051). A formulação interna completa é proprietária; por isso, este trabalho apresenta um equacionamento de conservação de massa compatível com a estrutura declarada pelo software e suficiente para interpretar e auditar a produção de lodo — abordagem consistente com modelos de biofilme voltados ao projeto de engenharia (Takács et al., 2007; Boltz et al., 2009).

2. OBJETIVOS

O objetivo geral é sistematizar o equacionamento necessário para interpretar a produção de lodo em reatores MBBR modelados no BioWin, distinguindo inventário de sólidos aderidos, produção biológica líquida, desprendimento e retirada efetiva de sólidos. Como objetivos específicos:

- descrever a representação unidimensional do biofilme e os mecanismos de transporte e reação utilizados pelo BioWin;
- formular os balanços de massa para substratos, biomassa, sólidos aderidos, sólidos suspensos e lodo retirado;
- relacionar os parâmetros de aderência e desprendimento aos resultados de espessura, massa superficial e produção de lodo;
- definir uma sequência de parametrização, calibração e verificação por balanço de massa;
- aplicar o método a dados demonstrativos recuperados do histórico do Projeto BioWin.

3. METODOLOGIA UTILIZADA

O desenvolvimento foi baseado em dois conjuntos de informações: o BioWin Help Manual, especialmente as seções Media Bioreactor, Solids Retention Time Calculation, Activated Sludge Processes e Modeling Fixed Film Processes; e registros internos do Projeto BioWin sobre MBBR/IFAS, produção de lodo, idade do lodo, espessura de biofilme, oxigênio dissolvido e calibração.

A metodologia proposta compreende cinco etapas: definição da geometria e da mídia; caracterização do afluente em base DQO; parametrização cinética e estequiométrica; execução das simulações em

regime permanente e dinâmica; e fechamento do balanço de sólidos por correntes externas. O regime permanente é utilizado para reconciliar produção média, inventário e descarte. A simulação dinâmica é utilizada para identificar variações de espessura, gradientes internos, picos de desprendimento e sobrecargas na separação sólido-líquido.

Tabela 1 — Dados mínimos para modelagem e auditoria da produção de lodo

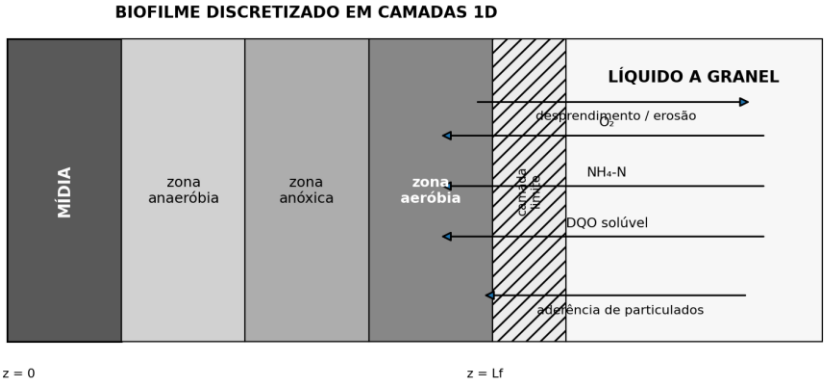
Grupo de dados	Entradas principais	Verificação / saída
Geometria e mídia	Volume, profundidade, fração de enchimento, área e volume específicos	Área total de mídia, volume líquido e TDH corrigido
Afluente	Vazão, DQO, DBO, SST, NTK, P, alcalinidade, fBS, fUS, fUP e demais frações	Carga biodegradável, carga inerte e sólidos afluentes
Operação	Temperatura, OD/ar, mistura, recirculações e descarte	Substratos, OUR, NOx, espessura e massa aderida
Biofilme	Aderência, meia saturação, desprendimento, difusividades, EPS e limites de filme	g SST/m², espessura, perfis e taxa de desprendimento
Lodo	Vazões e concentrações de WAS, efluente e outras correntes	kg SST/d, kg SSV/d, SSV/SST e SRT

Fonte: Sena, 2026.

4. FUNDAMENTAÇÃO DO MODELO DE BIOFILME

O modelo de biofilme do BioWin pertence à classe de modelos dinâmicos unidimensionais de cultura mista descrita por Wanner e Reichert (1996) e Reichert e Wanner (1997), e sistematizada posteriormente no relatório da IWA sobre modelagem de biofilmes (Wanner et al., 2006). Os perfis são calculados perpendicularmente à superfície da mídia, discretizando-se a espessura em camadas. Em cada camada, o ASDM calcula reações de crescimento, decaimento, hidrólise, fermentação, nitrificação, desnitrificação, equilíbrio ácido-base, precipitação e transferência gasosa. O resultado é a coexistência de microambientes aeróbios, anóxicos e anaeróbios dentro do mesmo biofilme.

Figura 1 — Representação conceitual do biofilme unidimensional no BioWin



Fonte: Sena, 2026, com base em EnviroSim ([s.d.]) e Wanner e Reichert (1996).

O transporte de componentes solúveis é representado pela segunda lei de Fick, com uma resistência adicional na camada líquida limite. Para os particulados, o manual informa movimento interno e troca com o líquido por aderência e desprendimento. A espessura varia dinamicamente em função da produção local de sólidos, da densidade de cada variável particulada e da troca de massa na superfície. O BioWin atribui concentrações máximas distintas às variáveis: como referência, 50 kg DQO/m³ para heterótrofos, 100 kg DQO/m³ para autótrofos, 1.300 kg/m³ para sólidos inorgânicos e 5 kg DQO/m³ para substrato particulado e inertes orgânicos. Essa diferenciação controla densidade, porosidade e espessura simuladas (EnviroSim, [s.d.], p. 1049-1050).

5. EQUACIONAMENTO MATEMÁTICO

As equações a seguir constituem uma formulação de conservação de massa compatível com a arquitetura declarada no manual. Elas não pretendem reproduzir expressões proprietárias internas do software, especialmente a função combinada de desprendimento.

A área total disponível para crescimento do biofilme é obtida a partir do volume do reator, da fração volumétrica preenchida por mídia e da área específica do meio suporte:

$$\mathbf{A_m = V_r \times f_m \times a_s} \quad (1)$$

em que A_m é a área de mídia (m²), V_r é o volume geométrico do reator (m³), f_m é a fração de enchimento e a_s é a área específica da mídia (m²/m³ de mídia).

O volume ocupado pela mídia e o volume líquido corrigido são calculados por:

$$\mathbf{V_mídia = V_r \times f_m \times v_s} \quad (2)$$

$$\mathbf{V^L = V_r - V_mídia - A_m \times \delta corr} \quad (3)$$

onde v_s é o volume específico adimensional da mídia e δcorr é a espessura assumida para correção do volume do tanque. O manual indica valor padrão de 1,25 mm para δcorr. Trata-se de uma correção puramente geométrica de volume líquido e TDH: quando a área de mídia é grande, o termo $A_m \times$ δcorr pode assumir magnitude expressiva, mas ele não substitui a espessura dinâmica do biofilme calculada pelo balanço (eq. 11), servindo apenas para ajustar o volume efetivo do tanque.

Para cada componente solúvel j, o balanço local em uma camada do biofilme pode ser escrito como:

$$\mathbf{\partial S_j/\partial t = D_eff_{,j} \times \partial^2 S_j/\partial z^2 + \Sigma_k\, v_{j,k}\, r_k} \quad (4)$$

em que S_j é a concentração do componente, $D_eff_{,j}$ é a difusividade efetiva, z é a coordenada perpendicular à mídia, $v_{j,k}$ é o coeficiente estequiométrico e r_k é a taxa do processo k. O BioWin aplica, por padrão, um **fator de difusão líquida (net diffusion factor)** igual a 0,8 sobre as difusividades efetivas.

Na interface biofilme-líquido, a continuidade de fluxo é representada por:

$$\mathbf{J_j = k^L_{,j}\,(S_j,bulk - S_j,sup) = -D_eff_{,j}\,(\partial S_j/\partial z)|z=Lf} \quad (5)$$

sendo $k^{L}_{,j}$ o coeficiente de transferência na camada limite, S_j,bulk a concentração no líquido a granel, S_j,sup a concentração na superfície e Lf a espessura do biofilme.

Para cada componente particulado i, um balanço geral por camada é expresso por:

$$\partial X_i/\partial t = \Sigma_k \nu_{i,k} r_k - \partial(u_x X_i)/\partial z \quad (6)$$

onde u_x representa o movimento aparente de sólidos associado ao crescimento, compressão, redistribuição e expansão do filme. No BioWin, esse comportamento é influenciado pelo parâmetro Solids movement factor, cujo valor padrão é 10.

Como forma de engenharia coerente com os parâmetros disponibilizados na interface, o fluxo total de aderência pode ser interpretado por uma função de saturação em relação ao SST do líquido:

$$Jatt = katt \times SSTbulk/(K_TSS + SSTbulk) \quad (7)$$

onde katt é a taxa máxima de aderência e K_TSS é a meia saturação. Os valores padrão são 8 g/(m²·d) e 100 mg/L, respectivamente. A distribuição de Jatt entre as variáveis particuladas deve respeitar sua fração no SST aderível e seus coeficientes de resistência/EPS.

O manual não publica a expressão completa de desprendimento; informa que ela combina espessura, resistência do EPS e geração interna de N_2 ou CH_4. Uma forma dimensional para interpretação é:

$$Jdet = kdet \times Lf \times FEPS \times Fgás \times Fcomp \quad (8)$$

em que kdet tem unidade g/(m³·d), Lf converte o termo para g/(m²·d) e os fatores adimensionais representam composição, resistência e produção gasosa. O parâmetro padrão kdet é $8{,}0\times10^3$ g/(m³·d). A equação (8) deve ser usada apenas para análise dimensional; o valor real de desprendimento deve ser obtido do balanço do software.

A massa superficial e a massa total de biofilme são:

$$mA = \int_0^{Lf} \rho TSS(z)\, dz \quad (9)$$

$$Matt = A_m \times mA / 1000 \quad (10)$$

onde mA é expresso em g SST/m², ρTSS é a densidade local do biofilme e Matt resulta em kg SST.

A evolução do inventário aderido pode ser sintetizada por:

$$dmA/dt = PA + Jatt - Jdet \quad (11)$$

sendo PA a produção líquida de sólidos nas camadas, incluindo crescimento, decaimento, hidrólise, formação de inertes e precipitados. Em regime permanente, dmA/dt tende a zero e a produção líquida aderida mais a aderência é compensada pelo desprendimento.

A massa suspensa no volume líquido é:

$$Msus = V^{L} \times SSTbulk / 1000 \quad (12)$$

e a produção efetivamente retirada do sistema deve ser calculada pelas correntes externas:

$$Plodo,SST = Qw \times SSTw/1000 + Qe \times SSTe/1000 + \Sigma Poutros \quad (13)$$

onde Qw e Qe são as vazões de lodo e efluente (m³/d), SSTw e SSTe são as concentrações correspondentes (mg/L), e Poutros representa outras saídas de sólidos, como purgas de filtros, flotação ou desaguamento. Em um MBBR sem recirculação de lodo, todo sólido desprendido que for capturado pelo separador termina na corrente de lodo; a concentração do underflow, isoladamente, não define a produção sem sua vazão.

A idade do lodo total, quando se deseja incluir a biomassa aderida, é calculada por:

$$\mathbf{SRTtotal = (Msus,V + Matt,V + Msep,V) / (Qw \times SSVw/1000 + Qe \times SSVe/1000)} \quad (14)$$

onde os índices ",V" indicam que as massas do numerador são expressas em SSV (sólidos suspensos voláteis) e Msep,V é a massa opcional em clarificadores ou outras unidades. É essencial que numerador e denominador estejam na mesma base: misturar inventário em SST com descarte em SSV introduz erro sistemático na idade do lodo; a mesma equação pode ser escrita integralmente em SST, desde que consistente. O BioWin permite configurar cenários de SRT com inclusão ou exclusão da biomassa aderida. Entretanto, conforme verificado no histórico do Projeto BioWin, o valor instantâneo apresentado durante a dinâmica deve ser interpretado com cautela e não deve ser assumido automaticamente como SRT total do biofilme; recomenda-se exportar as massas e calcular externamente a equação (14).

6. PARAMETRIZAÇÃO NO BIOWIN

Tabela 2 — Parâmetros gerais padrão do biofilme no BioWin

Parâmetro	Padrão	Unidade	Interpretação principal
Attachment rate	8	g/(m²·d)	Aumenta a entrada máxima de particulados no biofilme
Attachment TSS half sat.	100	mg/L	Concentração para metade da aderência máxima
Detachment rate	$8{,}0\times10^{3}$	g/(m³·d)	Aumentar tende a reduzir a espessura do biofilme
Solids movement factor	10	–	Controla redistribuição interna de sólidos
Fator de difusão líquida (net diffusion)	0,8	–	Multiplica as difusividades efetivas
Thin film limit	0,5	mm	Faixa de transição para filme fino
Thick film limit	3,0	mm	Faixa de referência para filme espesso
Assumed film thickness for tank volume correction	1,25	mm	Corrige o volume líquido, sem calibrar reação
Film surface area/media area – max.	1,0	–	Pode aumentar área efetiva em filmes porosos/streamers
Minimum biofilm conc. for streamer formation	4	g SST/m²	Condição mínima para streamers

Fonte: EnviroSim ([s.d.], p. 1049-1050).

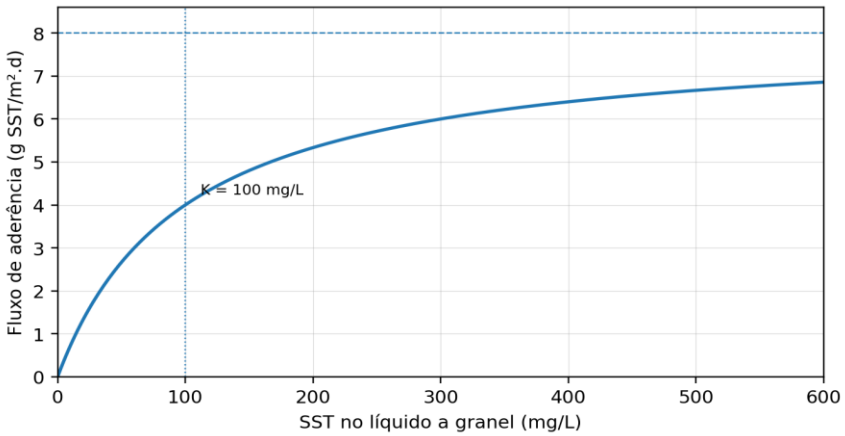
A calibração da produção de lodo deve começar pelo balanço global e pelo afluente, e não pelos parâmetros de biofilme. O rendimento aeróbio padrão dos heterótrofos é 0,666 mg DQO de biomassa por mg DQO de substrato. O próprio manual recomenda verificar a fração particulada não biodegradável fUP, a vazão de descarte e a SRT quando houver divergência entre OUR e produção de lodo simulada e medida (EnviroSim, [s.d.], p. 880-881). Alterar rendimentos antes de fechar o fracionamento pode compensar um erro de caracterização com outro erro de modelo.

A sequência recomendada é: (1) fechar vazões e cargas; (2) calibrar DQO solúvel e particulada, SST/SSV e frações fBS, fUS e fUP; (3) ajustar descarte e separação de sólidos; (4) verificar OUR, amônia, nitrato e alcalinidade; (5) comparar massa aderida e espessura com medições ou faixas de engenharia; e somente então (6) realizar sensibilidade em katt, K_TSS, kdet, difusividade e EPS.

7. RESULTADOS OBTIDOS

A equação (7), aplicada aos valores padrão, evidencia que a aderência se aproxima assintoticamente de 8 g SST/(m²·d). Em SSTbulk = 100 mg/L, o fluxo é 4 g SST/(m²·d); em 500 mg/L, alcança aproximadamente 6,7 g SST/(m²·d). Portanto, em MBBR com baixa concentração suspensa, a aderência pode ser limitada pela disponibilidade de particulados, enquanto em IFAS a maior concentração de sólidos favorece o intercâmbio com o biofilme.

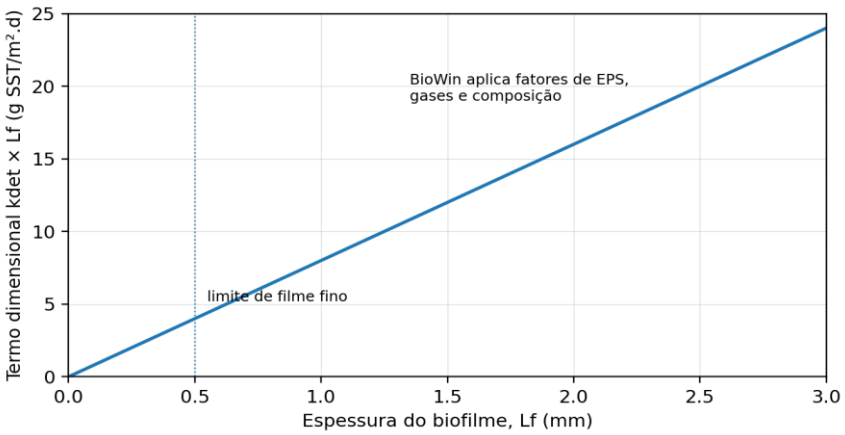
Figura 2 — Curva de aderência compatível com os parâmetros padrão do BioWin



Fonte: Sena, 2026. A curva representa a equação (7), não uma reprodução da expressão proprietária do BioWin.

A análise dimensional do termo de desprendimento mostra que o produto kdet × Lf alcança 4, 8 e 24 g SST/(m²·d) para filmes de 0,5, 1,0 e 3,0 mm, antes da aplicação dos fatores de EPS, gases e composição. Isso explica a elevada sensibilidade da espessura ao parâmetro Detachment rate e, simultaneamente, demonstra por que não é adequado estimar a produção diária multiplicando diretamente kdet pela área e pela espessura.

Figura 3 — Termo dimensional simplificado de desprendimento em função da espessura



Fonte: Sena, 2026. O BioWin utiliza uma função combinada com fatores adicionais.

O manual apresenta, para calibração do modelo padrão, massas superficiais de aproximadamente 1,5; 11,0; e 14,7 g SST/m², associadas a espessuras de 0,1; 0,5; e 1,0 mm em condições de carga MBBR baixa, média e alta. Esses valores constituem referências úteis para triagem, mas não substituem dados do meio suporte, carga, temperatura, OD e composição do esgoto.

Em uma das revisões do Projeto BioWin para a ETE RMSP foram avaliados: vazão média de 42 L/s; reator anóxico de 840 m³; reator aerado de 2.400 m³; 60% de enchimento em ambos; e mídia com 800 m²/m³. O BioWin indicou massas aderidas de 6,7 g SST/m² no tanque anóxico e 11,5 g SST/m² no tanque aerado. A aplicação das equações (1) e (10) produz o inventário apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 — Inventário demonstrativo de sólidos aderidos no Projeto BioWin

Reator	Volume (m³)	Enchimento	Área de mídia (m²)	Massa aderida (kg SST)
Anóxico	840	60%	403.200	2.701 (6,7 g/m²)
Aerado	2.400	60%	1.152.000	13.248 (11,5 g/m²)
Total	**3.240**	–	**1.555.200**	**15.949**

Fonte: elaboração própria a partir de registros internos do Projeto BioWin (Sena Projetos, 2026).

O inventário aderido calculado é de aproximadamente 15,95 t SST. Esse valor não corresponde a 15,95 t/d de lodo. Em regime permanente, a massa aderida permanece aproximadamente constante, e a produção diária é a massa que atravessa as fronteiras do sistema. O inventário influencia a capacidade de tratamento, a resposta a choques e a SRT total, enquanto o desprendimento controla a transferência gradual desse inventário para a fase suspensa e para o separador.

Também foram registrados SST e SSV de 9.672 e 6.952 mg/L no underflow do decantador. A relação SSV/SST de aproximadamente 0,72 é plausível para lodo predominantemente biológico; contudo, a produção em kg/d somente pode ser calculada após multiplicação pela vazão de underflow ou de descarte.

Exemplo ilustrativo de fechamento da eq. (13). Para tornar explícita a distinção entre inventário e produção, admita-se, a título puramente ilustrativo, uma vazão de descarte de lodo Qw = 40 m³/d com SSTw = 9.672 mg/L e perda no efluente desprezível. A produção retirada seria Plodo = 40 ×

9.672/1000 ≈ **387 kg SST/d**. Confrontada com o inventário aderido de ≈15.949 kg SST, essa produção corresponde a menos de 2,5% do inventário por dia, ilustrando numericamente por que a massa aderida não pode ser lida como produção diária. Os valores de Qw e SSTw devem ser substituídos pelos dados operacionais reais para o fechamento efetivo do balanço.

No mesmo histórico foram observados biofilme com espessura próxima de 0,93 mm, OD médio no MBBR de 1,0 mg/L e OD de apenas 0,01 mg/L no fundo do filme. Esses resultados são coerentes com gradientes relevantes e com a coexistência de zonas aeróbia, anóxica e potencialmente anaeróbia. A heterogeneidade altera rendimentos, decaimento, produção de gás e desprendimento, reforçando a necessidade de utilizar os perfis internos do BioWin e não apenas concentrações no líquido a granel.

8. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados mostram que a principal fonte de erro conceitual é tratar a biomassa aderida como se fosse produção diária. Em MBBR, o biofilme funciona como estoque dinâmico. Crescimento e aderência aumentam esse estoque; decaimento, erosão e desprendimento o reduzem; e o lodo externo aparece após a transferência para o líquido e sua separação. A produção média em regime permanente pode ser obtida de forma robusta pelas correntes externas, enquanto a decomposição entre crescimento, inerte e desprendimento é analisada pelas taxas e inventários internos.

A espessura do biofilme é, ela própria, uma variável de controle. Evidências experimentais indicam que filmes finos favorecem a penetração de substrato e oxigênio e a nitrificação, ao passo que filmes espessos introduzem limitação difusional e maior instabilidade de desprendimento (Piculell et al., 2016). Isso ampara a distinção, feita neste trabalho, entre os limites de filme (parâmetros numéricos) e a espessura dinâmica efetivamente calculada.

O fracionamento do afluente é decisivo. A fração fUP aumenta diretamente a carga particulada não biodegradável que tende a integrar o lodo; fUS reduz a fração de DQO disponível para crescimento; fBS e as frações biodegradáveis particuladas afetam produção de biomassa, OUR e consumo de nutrientes. Por isso, uma calibração que ajuste kdet para corrigir excesso de lodo, sem validar fUP e o descarte, pode produzir uma espessura aparentemente correta e um balanço global incorreto.

A espessura Assumed film thickness for tank volume correction não deve ser usada para calibrar remoção ou produção de sólidos. Ela apenas corrige o volume líquido e o TDH. A espessura dinâmica decorre do balanço da equação (11), dos limites de filme, da densidade, da difusão e das taxas de aderência/desprendimento. De modo semelhante, o Thin film limit é parâmetro numérico/dinâmico e não um valor-alvo de projeto.

Para MBBR puro, a ausência de retorno de lodo simplifica a fronteira de massa: sólidos desprendidos são conduzidos ao separador e saem como lodo ou efluente. Para IFAS, parte dos sólidos retorna ao reator e a produção só é observada na purga e nas perdas. Nesses sistemas híbridos, recomenda-se manter dois indicadores: SRT da fase suspensa e SRT total incluindo a biomassa aderida. A diferença entre ambos quantifica o efeito de retenção proporcionado pela mídia.

A validação deve combinar quatro níveis: (i) qualidade do efluente; (ii) OUR e balanço de oxigênio; (iii) inventário de SST/SSV suspenso e aderido; e (iv) produção externa de lodo. Um modelo que reproduz apenas amônia ou DQO, mas não fecha OUR e sólidos, pode estar compensando parâmetros. O relatório do BioWin para Word/Excel e as tabelas do Album permitem exportar concentrações, vazões, massas e séries temporais para esse fechamento.

9. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A modelagem da produção de lodo em MBBR deve separar claramente massa aderida, massa suspensa e massa retirada. A massa aderida é obtida pela área de mídia multiplicada pela massa superficial do biofilme; a produção efetiva é obtida pelas correntes externas de sólidos. Em regime permanente, o desprendimento compensa a produção líquida e a aderência, mantendo aproximadamente constante o inventário aderido. Recomenda-se:

- utilizar o regime permanente para fechar o balanço médio de DQO, SST, SSV, OUR e nutrientes antes da análise dinâmica;
- calcular a produção de lodo por vazão × concentração nas correntes de descarte e efluente, evitando inferi-la apenas pela massa aderida ou pela concentração do underflow;
- calibrar primeiro o fracionamento do afluente, especialmente fUP, e as condições de descarte/SRT; somente depois ajustar aderência, desprendimento, difusividade e EPS;
- comparar massa superficial e espessura com faixas do manual e, sempre que possível, com ensaios de remoção de biomassa das mídias;
- em simulação dinâmica, exportar as massas para calcular externamente a SRT total incluindo biofilme e avaliar picos de desprendimento e carga de sólidos no decantador;
- documentar separadamente os parâmetros globais e locais do Media Bioreactor, mantendo rastreabilidade das alterações de calibração.

O equacionamento apresentado fornece uma estrutura auditável para interpretar o BioWin sem substituir sua solução numérica interna. A aplicação ao histórico do Projeto BioWin confirmou que o inventário aderido pode dominar a massa total do sistema e, ainda assim, não representar a produção diária de lodo. O fechamento adequado depende das fronteiras de massa, da dinâmica de aderência/desprendimento e da caracterização correta do afluente.

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado e unidade
A_m	Área total de mídia disponível para o biofilme (m^2)
V_r ; V^L	Volume geométrico do reator ; volume líquido corrigido (m^3)
f_m ; a_s ; v_s	Fração de enchimento ; área específica (m^2/m^3 de mídia) ; volume específico da mídia (–)
$\delta corr$	Espessura assumida para correção de volume do tanque (m); padrão 1,25 mm
S_j ; $D_eff,_j$; J_j	Concentração, difusividade efetiva e fluxo do componente solúvel j

Símbolo	Significado e unidade
X_i ; u_x	Concentração do particulado i ; velocidade aparente de sólidos
Jatt ; katt ; K_TSS	Fluxo, taxa máxima (8 g/m²·d) e meia saturação (100 mg/L) de aderência
Jdet ; kdet ; Lf	Fluxo de desprendimento ; coeficiente ($8{,}0\times10^3$ g/m³·d) ; espessura do biofilme
mA ; Matt	Massa superficial (g SST/m²) ; massa total aderida (kg SST)
Msus ; Msep	Massa suspensa no líquido ; massa em separadores (kg)
Plodo ; Qw, Qe ; SRT	Produção de lodo ; vazões de descarte e efluente ; idade do lodo

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOLTZ, J. P.; JOHNSON, B. R.; DAIGGER, G. T.; SANDINO, J. Modeling Integrated Fixed-Film Activated Sludge (IFAS) and Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) systems I: mathematical treatment and model development. *Water Environment Research*, v. 81, n. 6, p. 555-575, 2009. DOI: 10.2175/106143008X357066.

DI BIASE, A.; KOWALSKI, M. S.; DEVLIN, T. R.; OLESZKIEWICZ, J. A. Moving bed biofilm reactor technology in municipal wastewater treatment: a review. *Journal of Environmental Management*, v. 247, p. 849-866, 2019. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.06.053.

ENVIROSIM ASSOCIATES LTD. *BioWin Help Manual*. Hamilton, Ontario: EnviroSim Associates Ltd., [s.d.].

McQUARRIE, J. P.; BOLTZ, J. P. Moving bed biofilm reactor technology: process applications, design, and performance. *Water Environment Research*, v. 83, n. 6, p. 560-575, 2011. DOI: 10.2175/106143010X12851009156286.

ØDEGAARD, H. Innovations in wastewater treatment: the moving bed biofilm process. *Water Science and Technology*, v. 53, n. 9, p. 17-33, 2006. DOI: 10.2166/wst.2006.284.

OLIVEIRA, D. V. M.; VOLSCHAN JUNIOR, I.; PIVELI, R. P. Avaliação comparativa entre custos dos processos MBBR/IFAS e lodo ativado para o tratamento de esgoto sanitário. *Revista DAE*, n. 193, p. 46-55, 2013. DOI: 10.4322/dae.2014.110.

PICULELL, M.; WELANDER, P.; JÖNSSON, K.; WELANDER, T. Evaluating the effect of biofilm thickness on nitrification in moving bed biofilm reactors. *Environmental Technology*, v. 37, n. 6, 2016. DOI: 10.1080/09593330.2015.1080308.

REICHERT, P.; WANNER, O. Movement of solids in biofilms: significance of liquid phase transport. *Water Science and Technology*, v. 36, n. 1, p. 321-328, 1997. DOI: 10.2166/wst.1997.0070.

SENA PROJETOS. *Registros técnicos internos do Projeto BioWin*: modelagem MBBR/IFAS, biofilme, idade do lodo e produção de sólidos. 2026. Documento interno.

TAKÁCS, I.; BYE, C. M.; CHAPMAN, K.; DOLD, P. L.; FAIRLAMB, P. M.; JONES, R. M. A biofilm model for engineering design. *Water Science and Technology*, v. 55, n. 8-9, p. 329-336, 2007. DOI: 10.2166/wst.2007.274.

WANNER, O.; REICHERT, P. Mathematical modeling of mixed-culture biofilms. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 49, n. 2, p. 172-184, 1996. DOI: 10.1002/(SICI)1097-0290(19960120)49:2<172::AID-BIT6>3.0.CO;2-N.

WANNER, O.; EBERL, H.; MORGENROTH, E.; NOGUERA, D.; PICIOREANU, C.; RITTMANN, B.; VAN LOOSDRECHT, M. *Mathematical Modeling of Biofilms*. London: IWA Publishing, 2006. (IWA Scientific and Technical Report, n. 18).