



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Tecnologia



LUCAS FELEX MONTENEGRO

Análise de viabilidade de aplicação e eficiência de sistemas MBBR e IFAS para tratamento de efluentes no Brasil.

Limeira
2022



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Tecnologia



LUCAS FELEX MONTENEGRO

Análise de viabilidade de aplicação e eficiência de sistemas MBBR e IFAS para tratamento de efluentes no Brasil.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para a obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Ambiental à
Faculdade de Tecnologia da Universidade
Estadual de Campinas.

Orientador: Prof. Dr. Dagoberto Yukio Okada

Limeira
2022

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Faculdade de Tecnologia
Luiz Felipe Galeffi - CRB 8/10385

M764a Montenegro, Lucas Felex, 1991-
Análise de viabilidade de aplicação e eficiência de sistemas MBBR e IFAS para tratamento de efluentes no Brasil / Lucas Felex Montenegro. – Limeira, SP : [s.n.], 2022.

Orientador: Dagoberto Yukio Okada.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia.

1. Tratamento de efluentes. 2. Lodo ativado. I. Okada, Dagoberto Yukio, 1980-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Tecnologia. III. Título.

Informações adicionais, complementares

Título em outro idioma: Analysis of viability for application and efficiency of MBBR and IFAS systems for effluent treatment in Brazil

Palavras-chave em inglês:

Wastewater treatment

Activated sludge

Titulação: Bacharel

Banca examinadora:

Dagoberto Yukio Okada [Orientador]

Marcela Cravo Ferreira

Priscila Rosseto Camiloti

Data de entrega do trabalho definitivo: 16-12-2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família e amigos pelo apoio, e por sempre estarem presentes, tornando o caminho menos árduo, e mostrando que os obstáculos serão sempre vencidos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Dagoberto Yukio Okada, pela instrução, dedicação e paciência.

À empresa Allonda Ambiental, que proporcionou o contato com empreendimentos e projetos da área de saneamento, ao redor de todo o Brasil. O que provocou a inspiração para a composição do presente trabalho.

Aos colegas de trabalho, em especial, a Fábio de Pasquale Campos, Almir Ferreira da Silva, Alfredo Feitosa Lima e Daiane da Silva Porto. Sempre dispostos a ajudar e compartilhar seu conhecimento na área de saneamento.

Meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

O presente trabalho, apresenta uma avaliação das tecnologias de tratamento de efluentes, conhecidas como *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR), ou Reator aerado de leito móvel e *Integrated Fixed-Film Activated Sludge System* (IFAS). Tecnologias semelhantes e relativamente recentes, que vem se validando como bastante promissoras, desenvolvidas na Europa, a partir do aperfeiçoamento do processo de lodo ativado agregando características de sistemas de biofiltros. Foi examinada a viabilidade econômica da aplicação do processo, em relação à tecnologia de lodo ativado tradicional, aspecto primordial a se considerar, quando se discute saneamento básico no Brasil, onde a maior parte da população carece de soluções não só eficientes, mas também baratas e acessíveis. O estudo também investiga quais as situações ideais para se adotar cada uma das tecnologias, mensurando as vantagens e desvantagens de cada uma. Além de acompanhar as novas modernizações que estão sendo desenvolvidas para o processo MBBR, e as melhorias que elas trazem à eficiência do processo, avaliando casos de unidades de tratamento de esgoto nacionais. A partir da avaliação dos dados obtidos a partir da bibliografia disponível, e dos dados obtidos nos projetos correntes, fica constatado que a tecnologia MBBR/IFAS é mais adequada para ser implementada em cenários em que é necessário alcançar alta eficiência no tratamento de efluentes, e que a tecnologia tem alto potencial de evolução.

Palavras-chave: lodo ativado, MBBR, IFAS, tratamento de esgoto, biomídia.

ABSTRACT

The present research, provides an evaluation of the Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) and Integrated Fixed-Film Activated Sludge System (IFAS) technology for treatment of wastewater. Similar and relatively new technologies, which have been showing to be very promising in its efficiency, developed in Europe, by incrementing the Activated Sludge process, adding elements of biofilm process. The economic viability of applying the process was examined, comparing it to conventional activated sludge technology. This is a key aspect to be considered when discussing basic sanitation in Brazil, where most of the population demands solutions that are not only efficient, but also cheap and accessible. The study also investigates which are the ideal situations to adopt each of the technologies, measuring the advantages and disadvantages of each one. It also evaluates the new modernizations that are being developed for the MBBR process, and the improvements they bring to the efficiency of the process, evaluating cases of sewage treatment plants in Brazil. Evaluating the data obtained from the available bibliography, and the data obtained from plants applying the technologies currently, it is verified that the MBBR/IFAS technology is more adequate to be implemented in scenarios where it is necessary to achieve high efficiency in the treatment of effluents, and that the technology has a high potential for evolution.

Keywords: Activated sludge, MBBR, IFAS, biocarrier, wastewater.

Sumário

1.	INTRODUÇÃO.....	10
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1.	Sistemas de lodo ativado	12
2.1.1.	Lodo ativado convencional	13
2.1.2.	Lodo ativado de aeração prolongada	14
2.2.	Reator Biológico de Leito Móvel (MBBR)	15
2.3.	Integrated Fixed-Film Activated Sludge (IFAS).....	25
2.4.	Lodos ativados vs MBBR	27
3.	OBJETIVO	28
4.	METODOLOGIA	29
4.1.	Estimativa de custo	29
4.2.	Análise da tecnologia	30
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1.	Análise de custos	31
5.2.	ETE Gênese	35
5.3.	ETE Erval Velho.....	43
6.	CONCLUSÃO	46
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência nacional de águas
CASAN	Companhia Catarinense de Águas e Saneamento
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
ETE	Estação de tratamento de esgoto
IFAS	Integrated Fixed-Film Activated Sludge System
KMT	Kaldnes Miljøteknologi
MBBR	Moving Bed Biofilm Reactor
MBP	Monera BioPower
RAS	Retorno de lodo ativado
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SSV	Sólidos suspensos voláteis
URQ	Unidades de Recuperação de Qualidade

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma básico de um sistema de lodos ativados.	13
Figura 2 - Fluxograma básico de um sistema de lodo ativado convencional. .	14
Figura 3 - Fluxograma básico de um sistema de lodo ativado de aeração prolongada.	15
Figura 4 - Fluxograma básico sistema MBBR.....	17
Figura 5 - Biomídia KMT K1.....	18
Figura 6 - Diversos elementos plásticos, utilizados como biomídias.	19
Figura 7 - Biomídas de poliuretano enriquecido com carbono ativado.	21
Figura 8 - Fluxograma básico do sistema IFAS.	26
Figura 9 - Fluxograma básico do processo - ETE Gênese.....	36
Figura 10 - Biomídia de anéis de polipropileno usada na ETE Gênese	37
Figura 11 - Biomídia de espuma de poliuretano (MBP) aplicada na ETE Gênese	37
Figura 12 - Vazão afluente a ETE. Período histórico 01/2016 a 03/2018.	38
Figura 13 - Vazão afluente a ETE. Período 12/11/2018 a 04/02/2019.	39
Figura 14 - Concentração de nitrogênio amoniacal no efluente tratado.	41
Figura 15 - Foto microscópica da biomídia de poliuretano aplicada na ETE Gênese, após 06 meses de operação.	42
Figura 16 - Concentração de SSV no reator aerado – ETE Gênese.....	43
Figura 17 - ETE Erval Velho	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos sistemas de lodo ativado em função da idade do lodo.	13
Tabela 2 - – Biomídias de diversos fornecedores e suas características.	20
Tabela 3 - Volumes úteis dos tanques de aeração e potências instaladas.....	31
Tabela 4 - Volumes úteis dos tanques de aeração e potências instaladas por habitante.....	31
Tabela 5 - Estimativa dos custos de implantação dos processos avaliados...	32
Tabela 6 - Custos finais, considerando custos de terreno.	33
Tabela 7 - Custos finais considerando as biomídias R\$ (900,00).	34
Tabela 8 - Estimativa dos custos de energia elétrica.....	35
Tabela 9 - Valores de DBO _{5,20}	40
Tabela 10 - Análise amostras ETE Erval velho.....	45

1. INTRODUÇÃO

O tratamento de águas residuárias representa um grande desafio para a engenharia ambiental, na busca pela conservação dos corpos hídricos. Atualmente, no Brasil metade da população, aproximadamente 100 milhões de brasileiros, ainda não têm acesso a saneamento básico.

É de responsabilidade das instituições e dos profissionais da área, a busca por técnicas e soluções para o tratamento de efluentes, atribuição esta fundamental para a preservação do meio ambiente, e para a saúde e qualidade de vida da população.

O lançamento de efluentes não tratados diretamente em corpos hídricos, gera sérios problemas para a biosfera e para a sociedade como um todo. O excesso de matéria orgânica e de nutrientes, na forma de compostos com nitrogênio e fósforo, ocasiona o processo de Eutrofização de corpos d'água, reduzindo o oxigênio dissolvido na água, além da introdução de compostos tóxicos e metais pesados, que comprometem as condições para manter a vida aquática, e se acumulam na cadeia alimentar. Tratar os poluentes antes do seu lançamento é de importância primordial para o poder público, uma vez que tem impacto direto na saúde da população, tendo um impacto direto na redução de doenças de veiculação hídrica.

Segundo dados de 2022 da Agência Nacional de Águas (ANA), nos 5.670 municípios brasileiros, estima-se que 44,5% da população ainda não tem acesso a esgotamento sanitário, sendo que 26,33% não tem sequer esgoto coletado. Em São Paulo, o estado mais economicamente desenvolvido da federação, estima-se que 31,77% do esgoto não é tratado. Uma situação acima da média, mas ainda longe do ideal.

O governo federal estima o investimento de R\$ 70 bilhões de reais, no setor de saneamento básico nos próximos anos, para atingir os objetivos do novo Marco Legal do Saneamento Básico. Com a aprovação da lei nº 14.026/2020, foram estabelecidas as diretrizes de desenvolvimento para assegurar as expectativas da universalização de serviços de tratamento de água e esgoto no Brasil. As regras estabelecem que até o ano de 2033, 99% da população brasileira deve ser atendida com água potável e 90% deve ser atendida com coleta e tratamento de esgoto. Uma das medidas da nova legislação, foi extinguir os contratos firmados sem licitação, entre municípios e empresas estaduais de saneamento, tornando obrigatório a abertura de processos de licitação, para novos projetos de infraestrutura, possibilitando então, a concorrência

de prestadores de serviço públicos e privados. Tal medida visa aumentar a concorrência, e a oferta de prestadores de serviço que possam atuar no mercado de saneamento. A lei também estabelece a formação de blocos de municípios, para propiciar o atendimento de municípios pequenos, com poucos recursos e sem cobertura de saneamento. Dessa forma, os municípios poderão contratar serviços de forma coletiva (Ministério da Economia, 2022).

Neste cenário de aquecimento de investimentos no setor de saneamento, surgem iniciativas pela busca de tecnologias mais avançadas a serem aplicadas nos sistemas de tratamento de efluentes, sendo esta, uma oportunidade de modernizar os recursos que são usualmente empregados nas estações de tratamento de esgoto.

Em meio às diversas tecnologias de tratamento de efluentes disponíveis no mercado, o processo de lodos ativados, é um dos que apresenta maior eficiência na remoção de matéria orgânica presente nos efluentes, capaz de alcançar índices de eficiência superiores a 90% de remoção de matéria orgânica, sendo amplamente utilizado, é uma tecnologia bem estabelecida e provada.

As plantas de lodo ativado são também uma excelente alternativa de para zonas urbanas densamente povoadas, onde há pouco espaço para a construção de unidades de tratamento de esgoto, uma vez que as instalações requeridas para a operação de sistemas de lodos ativados são de dimensões menores, quando comparado a outros sistemas de tratamento de efluentes (Odegaard, 1998).

Nesse contexto, alternativas ainda mais eficientes buscam otimizar o processo de lodos ativados, a fim de melhorar ainda mais a capacidade de tratamento, aumentando a capacidade de purificação por unidade de área utilizada nas estações de tratamento de esgoto. Dentre tais novas alternativas, o processo de Reatores Híbridos, ou *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR), e o processo *Integrated Fixed-Film Activated Sludge System* (IFAS) têm se destacado internacionalmente. O processo consiste, basicamente, na adição de pequenas unidades de material suporte nos tanques de aeração do sistema de Lodos Ativados, fazendo com que os reatores possam contar com a biomassa em suspensão, usualmente presente nos tanques além da biomassa aderida que se desenvolve na superfície do material suporte (Campos, 2011).

O presente trabalho apresenta uma avaliação destas tecnologias e a viabilidade de sua implantação no contexto brasileiro, especialmente no estado de São Paulo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

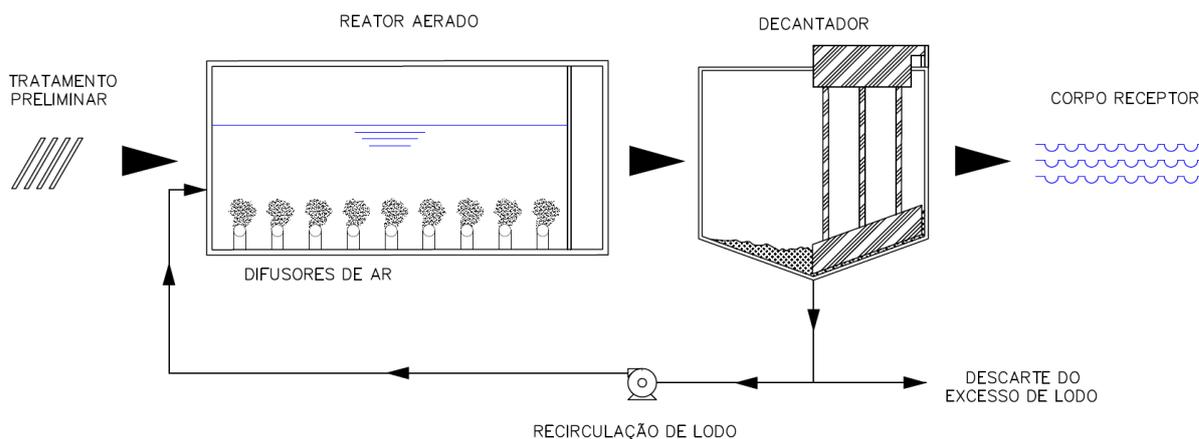
2.1. Sistemas de lodo ativado

Os sistemas de lodo ativado se utilizam da ação metabólica de microrganismos aeróbios para a degradação de matéria orgânica presente nos esgotos e efluentes, e em alguns casos de matéria nitrogenada. Tais sistemas são amplamente utilizados, para o tratamento de despejos domésticos e industriais, quando existe a necessidade de alta eficiência na remoção de matéria orgânica, em uma área reduzida para instalação da estação de tratamento do efluente. Tais sistemas são usualmente mais complexos do que os outros sistemas de tratamento, pois se utilizam de sistemas mecanizados de aeração, que consomem energia elétrica continuamente. Além disso, tais sistemas requerem equipamentos de desaguamento de lodo, e um esquema logístico estabelecido de destinação do excesso de lodo gerado e desaguado para aterro sanitário, conforme ilustrado na Figura 2. Levando em consideração todos esses fatores, pode dizer que consiste em uma operação mais sofisticada, e todos estes fatores geram custos e requerem mão de obra especializada.

A remoção de matéria nitrogenada é possível nos sistemas de lodo ativado. Em condições habituais, tais sistemas são capazes de gerar nitrificação de amônia para nitrato razoavelmente bem, especialmente em regiões de clima quente. Entretanto, o processo de desnitrificação, não é eficiente, sendo necessário modificações no processo, para que seja alcançado em sistemas de lodo ativado. É necessário a criação de zonas anóxicas, onde há a ausência de oxigênio e a presença de nitratos, para que as bactérias desnitrificantes possam se desenvolver, além de ser necessário a presença de doadores de elétrons (orgânicos ou autotróficos). Para que ocorra a remoção de fósforo, também é necessário a existência de zonas anaeróbias no sistema de tratamento.

O arranjo básico de um sistema de lodo ativado está representado na Figura 1. Tal sistema é composto por tanque de aeração (reator), decantador, e sistema de recirculação de lodo. Os decantadores se fazem necessário para reter o excesso de biomassa em suspensão proveniente do tanque de aeração. O sistema de retorno do lodo, permite o controle da idade do lodo.

Figura 1 - Fluxograma básico de um sistema de lodos ativados.



Fonte: Do autor.

Os sistemas de lodos ativados podem ser classificados em função da idade do lodo, de acordo com a Tabela 1, a seguir:

Tabela 1 - Classificação dos sistemas de lodo ativado em função da idade do lodo.

Idade do lodo	Carga de DBO aplicada por unidade de volume	Faixa de idade do lodo	Denominação usual
Reduzidíssima	Altíssima	Inferior a 3 dias	Aeração modificada
Reduzida	Alta	4 a 10 dias	Lodos ativado convencional
Intermediária	Intermediária	11 a 17 dias	-
Elevada	Baixa	18 a 30 dias	Aeração prolongada

Fonte: Von Sperling (1997).

Em regiões de clima quente, o lodo atinge a taxa de remoção máxima de DBO, usualmente na idade de 4 a 10 dias. Quanto menores as temperaturas, maior é o tempo necessário para que o lodo atinja o estado de estabilização aeróbia. Em regiões de clima temperado, pode ser necessário o emprego de lodo com idade superior a 10 dias para se alcançar a nitrificação completa do efluente, durante todo o ano (Von Sperling, 1997).

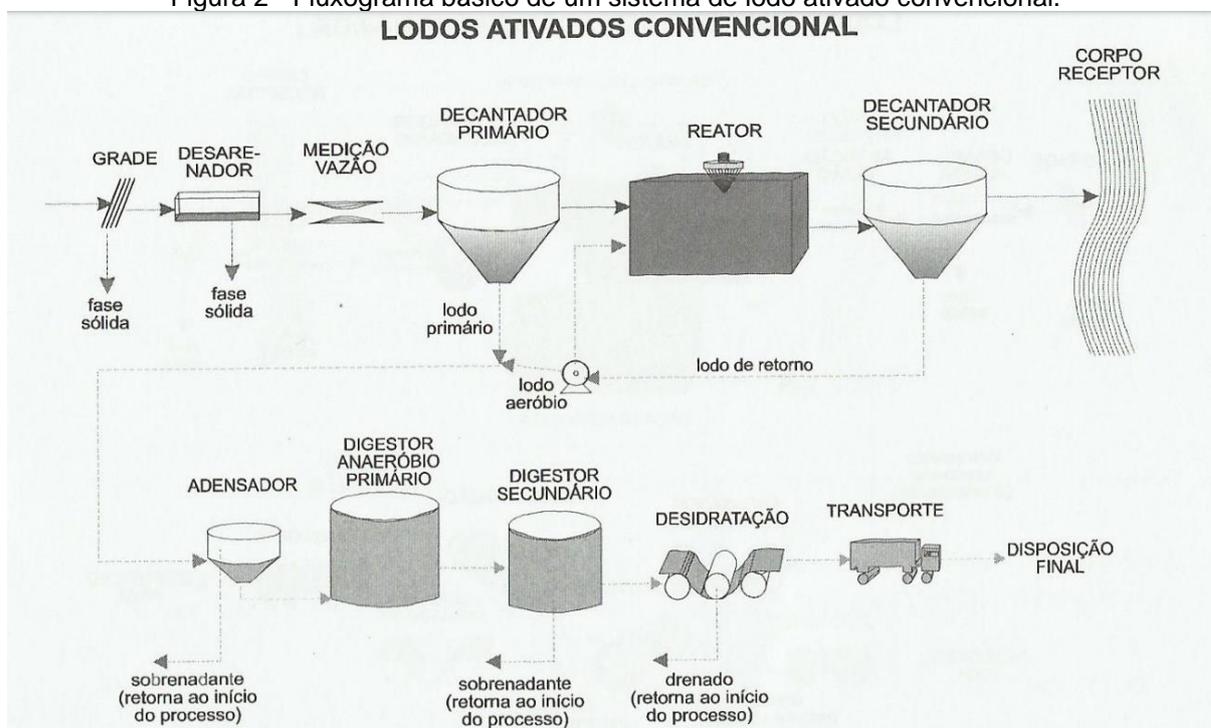
2.1.1. Lodo ativado convencional

No sistema convencional de lodos ativados, parte da matéria em suspensão sedimentável do efluente é retirada antes do reator aerado, usando um decantador primário, antes do tanque de aeração.

Pelo fato de a idade do lodo ser de 4 a 10 dias, a biomassa que compõe o lodo precisa passar ainda por uma etapa de estabilização, pois ainda contém uma elevada carga de matéria orgânica, proveniente da própria biomassa das células das bactérias presentes no lodo. A forma mais usual de tratar o lodo é através de digestores anaeróbios, que reduzem o volume de biomassa. Antes de passar pelo digestor anaeróbio, é interessante andensar o lodo, para reduzir o teor de umidade, e conseqüentemente, o volume de lodo (Von Sperling, 1997).

A Figura 2, apresenta fluxograma básico de um sistema de lodo ativado convencional.

Figura 2 - Fluxograma básico de um sistema de lodo ativado convencional.



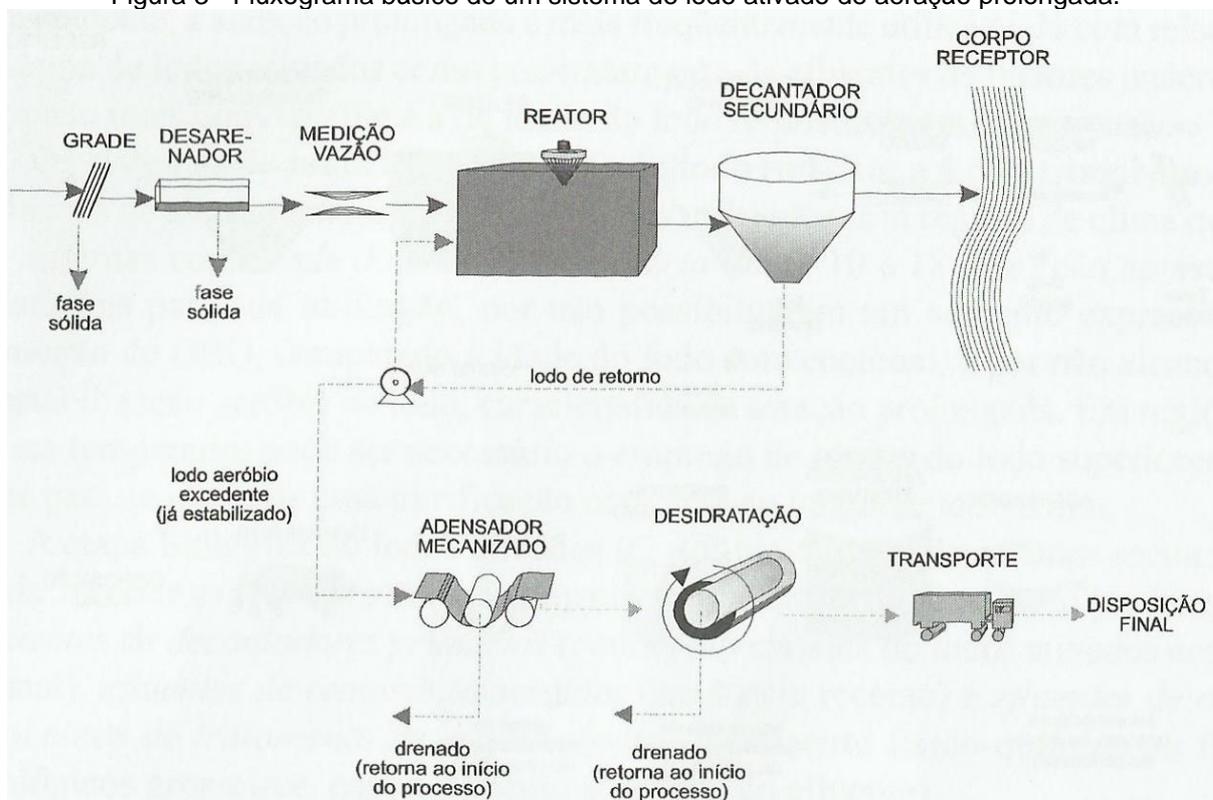
2.1.2. Lodo ativado de aeração prolongada

O sistema de lodo ativado de aeração prolongada, opera de modo que a biomassa em suspensão permaneça no sistema por um período mais longo, por volta de 18 a 30 dias. Dessa forma, a quantidade de biomassa é maior que no sistema convencional, tendo um tempo de detenção do líquido no tanque de aeração em torno de 16 a 24 horas, de forma que as bactérias acabam consumindo sua própria matéria orgânica em seus processos metabólicos, este processo é denominado respiração endógena. Desse modo, a biomassa é estabilizada no próprio tanque de aeração,

porém, o processo de respiração endógena requer um consumo maior de oxigênio pelas bactérias, fazendo-se necessário o aumento da quantidade de oxigênio introduzida no tanque aeróbio em quantidades significativas, elevando o custo com energia elétrica.

Entretanto, o sistemas de aeração prolongada não requer estabilização do lodo primário, e nem do lodo excedente. Deste modo, tais sistemas não precisam de decantador primário, nem de unidades anaeróbias de digestão de lodo, o que simplifica bastante o processo, conforme ilustrado na Figura 3 (Von Sperling, 1997).

Figura 3 - Fluxograma básico de um sistema de lodo ativado de aeração prolongada.



Fonte: Von Sperling (1997).

2.2. Reator Biológico de Leito Móvel (MBBR)

O sistema de reatores aerados de leito móvel, ou *Moving Bed Biofilm Reactors* (MBBR), também conhecidos como reatores aeróbios híbridos, foi primeiramente idealizado, na Noruega, na década de 1990, resultado da cooperação entre a companhia Kaldnes Miljøteknologi (KMT) e o instituto de pesquisa europeu SINTEF. O objetivo do programa foi de aprimorar a eficiência da tecnologia tradicional de lodos

ativados, buscando aumentar a eficiência e a estabilidade do processo, principalmente na remoção de Nitrogênio e Fósforo (Campos, 2011).

A ideia por trás do desenvolvimento do processo de reatores aeróbios de leito móvel, é unir as melhores características encontradas no processo de lodo ativado, e no processo de biofiltros, descartando as desvantagens de cada um deles. Diferente da maioria dos reatores de biofilme, o MBBR é capaz de utilizar todo o volume útil do tanque aerado para crescimento de biomassa, assim como no processo de lodo ativado. Por outro lado, assim como os biofiltros, e diferente dos lodos ativados, o MBBR não precisa de recircular a biomassa no tanque de aeração. Isto é possível, graças à introdução de pequenas peças que servem de material suporte para o crescimento de biofilme, que ficam em livre movimento dentro do tanque de aeração. Estas peças de material suporte, são denominadas “biomédias” (Odegaard, 1998).

Até 2014, mais de 1200 unidades de estações de tratamento de efluentes utilizando a tecnologia MBBR já estavam em operação em pelo menos 50 países ao redor do mundo. Entre elas as unidades de tratamento a seguir são consideradas modelos de desenvolvimento da tecnologia:

- Remoção de DBO: Estação de tratamento de esgoto de Moa Point, em Wellington, Nova Zelândia.
- Remoção de nitrogênio: Estação de tratamento de esgoto de Harrisburg, na Pennsylvania, Estados Unidos. E Estação de tratamento de esgoto de Williams Monaco, Colarado, Estados Unidos.
- Sistema de MBBR como tratamento terciário. Estação de tratamento de esgoto de Moorhead, Minnesota, Estados Unidos.
- Unidades de MBBR utilizadas para pós desnitrificação de efluente. Estação de tratamento de esgoto de Klagsham/Sjolunda, Malmo, Suécia. E Estação de tratamento de esgoto de Gardemon, na Noruega.

Assim como outros processos de leito de biofilme submerso, o MBBR é capaz de promover o desenvolvimento de um biofilme ativo altamente especializado, apropriado para as condições particulares de tratamento de um dado efluente específico. A fauna microbiológica especializada, fornece uma alta eficiência volumétrica, e estabilidade no processo, resultando em um reator mais compacto.

Diferente da maioria dos processos de biofilme submerso, o MBBR é um processo de fluxo contínuo, em que o material do leito suporte fica livre, em suspensão

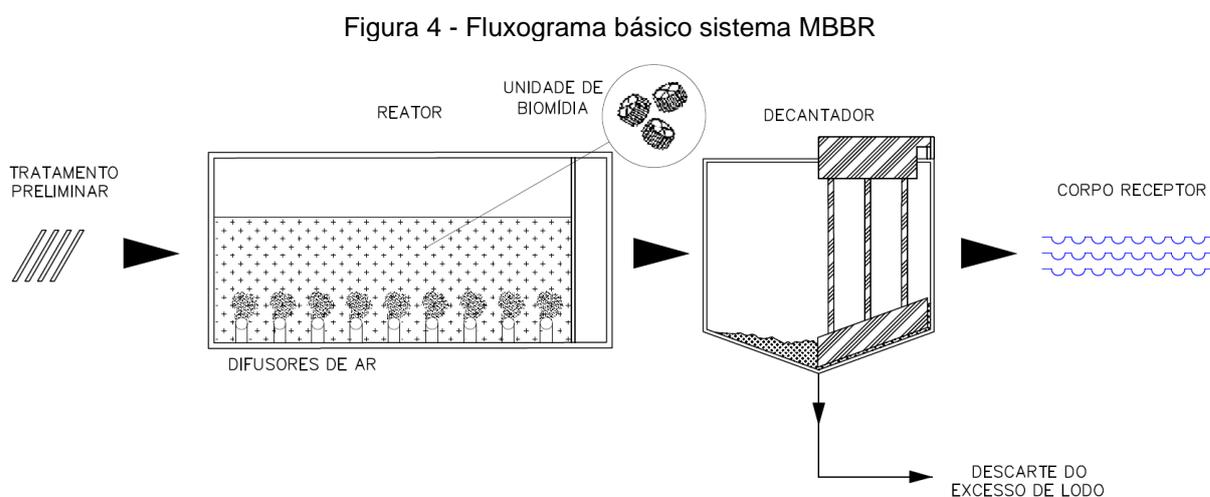
no meio líquido, fazendo com que o próprio movimento do material aumente a força de cisalhamento atuando contra o biofilme, o que evita o crescimento excessivo de biofilme aderido no material suporte, eliminando a necessidade de lavagem do leito suporte, para manter a vazão do efluente através do leito e o desempenho do processo, reduzindo a complexidade operacional.

Sistemas MBBR oferecem a mesma flexibilidade e simplicidade linear, dos tratamentos de lodo ativado, permitindo configurações diversas de reatores, para objetivos de tratamento diversos, como remoção de DBO, nitrificação, pós desnitrificação.

Tal flexibilidade, permite que a tecnologia seja aplicada em diversas geometrias de tanques de reatores aerados, podendo também oferecer a possibilidade de aprimorar plantas de tratamento já existentes, sem alterações estruturais, das instalações, e sem a necessidade de introduzir novos equipamentos (Water Environment Federation, 2010).

Em processos aerados, o movimento das biomédias é provocado pela agitação causada pelo ar que é bombeado no tanque, através de sopradores. O movimento dentro do tanque é importante, pois favorece a dissolução de oxigênio no efluente, e promove a dispersão de material suporte em todo o volume do tanque. É desejado que o processo seja otimizado a fim de alcançar a “fluidização” do material suporte, no efluente, dentro dos tanques (Rusten et al., 2006).

A Figura 4, a seguir apresenta um fluxograma básico de um sistema MBBR.



Fonte: Do autor.

As biomédias podem ser de diversos tipos, formatos e materiais. Existem diversos fabricantes no mercado. As mais tradicionais são feitas de polietileno de alta densidade ($0,95\text{g/cm}^3$), em formato de pequenos cilindros com uma cruz no meio e arestas nas laterais (Figura 6). Os cilindros têm por volta de, 7mm a 10mm de comprimento e 10mm a 15mm de diâmetro (Odegaard, 1998).

A configuração do material é arranjado de modo a disponibilizar uma grande superfície de contato com o efluente no meio líquido, onde os microrganismos possam aderir-se e desenvolver colônias, aumentando a concentração de microrganismos por unidade de volume, e aumentando o tempo de retenção celular.

Figura 5 - Biomédia KMT K1.



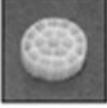
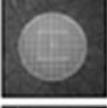
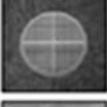
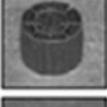
Fonte: Odegaard (1998).

Figura 6 - Diversos elementos plásticos, utilizados como biomédias.



Fonte: Campos (2011).

Tabela 2 – Biomédias de diversos fornecedores e suas características.

Fabricante	Nome da Biomédia	Área superficial	Dimensões da biomédia (Largura;Diâmetro)	Biomédia Imagem
Veolia, Inc.	AnoxKaldnes™ K1	500 m ² /m ³	7 mm; 9 mm	
	AnoxKaldnes™ K3	500 m ² /m ³	12 mm; 25 mm	
	AnoxKaldnes™ biofilm chip (M)	1200 m ² /m ³	2 mm; 48 mm	
	AnoxKaldnes™ biofilm chip (P)	900 m ² /m ³	2 mm; 48 mm	
Infilco Degremont, Inc.	ActiveCell™ 450	450 m ² /m ³	15 mm; 22mm	
	ActiveCell™ 515	515 m ² /m ³	15 mm; 22 mm	
Siemens Water Technologies Corp.	ABC4™	600 m ² /m ³	14 mm; 14 mm	
	ABC5™	660 m ² /m ³	12 mm; 12 mm	
Entex Technologies, Inc.	Bioportz™	589 m ² /m ³	14 mm x 18 mm	

Fonte: Water Environment Federation (2010).

Figura 7 - Biomédias de poliuretano enriquecido com carbono ativado.



Fonte: Monera BioPower.

Segundo o trabalho de Odegaard (1998), a área superficial, disponível para suporte de biofilme, varia bastante, de acordo com o tipo de biomédia utilizada. Elementos mais antigos apresentavam área superficial por volta de $200 \text{ m}^2/\text{m}^3$ a $600 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Porém existe um empenho no mercado em desenvolver biomédias que disponham de área superficial cada vez maiores. As biomédias mais modernas, podem chegar a áreas superficial da ordem de $20.000 \text{ m}^2/\text{m}^3$, como é o caso das biomédias de poliuretano enriquecidas com carbono ativado apresentadas na Figura 7. Quanto maior for a área superficial da mídia de suporte, maior será a concentração de biomassa por unidade de volume presente nos reatores.

As biomédias livres, em reatores aerados que utilizam sistemas de aeração com bolhas grosseiras, melhoraram significativamente a eficiência na transferência de oxigênio para o meio líquido (Odegaard, 1998).

A proporção de volume preenchido com as biomédias, em relação ao volume do tanque do reator aeróbio, varia bastante de acordo com as condições de projeto, o tipo de biomédia utilizado, a eficiência esperada, etc. A norma regulamentadora brasileira NBR 12.209:2011, que regulamenta projetos de estações de esgotamento sanitários, recomenda a aplicação de uma quantidade de biomédia entre 30% e 70% do volume do tanque.

Alguns cuidados devem ser observados na operação das instalações, para assegurar as condições ideais de funcionamento do reator, e evitar problemas com as biomédias de movimento livre:

- **Velocidade de aproximação**
 - A velocidade máxima durante situações de pico de vazão, que poderá chegar a ao reator MBBR deve ser considerada (vazão dividido pela área da seção transversal do reator). Para velocidades de aproximação menores, por volta de 20 m/h, as biomédias tendem a permanecer uniformemente distribuídas por todo o reator. Entretanto, para velocidades de aproximação mais elevadas, acima de 35 m/h, as biomédias podem migrar e amontoar-se no fundo do tanque, na extremidade jusante do tanque de aeração, pressionando contra a rede de retenção de biomédias, o que pode ocasionar o aumento da perda de carga do sistema, além de prejudicar o processo, uma vez que a condição ideal de operação é que as biomédias ocupem todo o volume do tanque, de maneira uniforme. A relação largura versus comprimento do tanque deve ser levada em consideração a fim de evitar a concentração de médias. Em geral, uma relação largura comprimento próxima de 1:1 é o ideal para evitar a migração de biomédia em condição de pico de vazão.

- **Geração de espuma**
 - Apesar de incomum, pode haver episódios de formação de espuma no reator aerado, especialmente durante o processo de largada do reator, ou em episódios de pico de carga, ou quando o efluente recebe despejo de substâncias saponificantes. A espuma pode ficar presa dentro do tanque de aeração. Nestes casos, é recomendável utilizar agentes antiespumantes, com o cuidado de escolher produtos que não sejam tóxicos aos microrganismos, e não usar compostos de sílica, pois esse tipo de antiespumante pode atacar o plástico das biomédias. No caso de intervenção com agentes químicos, é importante realizar testes em escala reduzida, para averiguar como a fauna microbiana irá reagir aos produtos químicos aplicados (Water Environment Federation, 2010).

- **Mistura e fluidização do material suporte.**
 - É possível enfrentar dificuldades para que a biomídia se misture integralmente por todo o volume do tanque, principalmente nos estágios iniciais do início de um reator aerado, quando o biofilme ainda não teve tempo suficiente para se estabelecer. As biomídias são menos densas que a água, e tendem a boiar, se concentrando na superfície da água. À medida que a fauna microbiana começa a se desenvolver, e se agregar na superfície da biomídia, o conjunto começa a ganhar densidade, e daí sim, passa a ser mais denso que a água, aumentando assim, a sua capacidade de se misturar ao meio (Rusten et al., 2006).
 - Este problema é ainda mais agudo para as biomídias esponjosas de poliuretano que são bem menos densas e comportam uma concentração maior de biomassa em seu interior. Na ativação de um reator, quando ainda não há biomassa agregada, elas flutuam bastante, podendo até mesmo ser carreadas pelo vento, dependendo das condições do local das instalações da estação de tratamento. Elas precisam passar por um tempo de aclimação para que possam desenvolver biomassa suficiente agregada à sua estrutura para ganhar densidade e manter-se submersa no tanque de aeração. Para mitigar este problema, pode-se adotar o procedimento de adicionar as biomídias no tanque aos poucos, de forma gradual, à medida que elas vão ganhando densidade.
 - Em biomídias de polietileno, pode acontecer o problema inverso, onde as biomídias mais densas, desenvolvem muito biofilme em sua estrutura, tornando-se muito densas. Com isso, elas acabam tendo sua mobilidade reduzida, e tendem a se concentrar no fundo do tanque,
- **Colmatação das biomídias.**
 - Outro problema que o desenvolvimento excessivo de biomassa pode acarretar, é a colmatação das biomídias,

onde a estrutura delas acaba sendo obstruída, dificultando a penetração de nutrientes para os microrganismos que estão no interior dos blocos de biofilme, dificultando também a difusão de oxigênio (Stewart, 2003).

Um aspecto que confere à nova tecnologia (MBBR) uma vantagem competitiva interessante, é o seu potencial de aperfeiçoamento, visto que é um método, relativamente novo, com grande perspectiva de evolução.

Dentre as principais inovações, o componente mais importante, causador dos avanços mais significativos, em termos de rendimento dos reatores biológicos de suporte livre, tem sido o desenvolvimento de novas biomédias, sendo elas o item primordial da eficiência dos reatores aerados. Nos últimos anos, novos formatos vêm sendo desenvolvidos, buscando materiais e configurações capazes de conceder ao material suporte uma maior área superficial para aderência de micro-organismos, conseqüentemente, aumentando a eficiência do reator biológico aerado, uma vez que, para um mesmo volume, as biomédias passam a apresentar mais superfície disponível, sendo capazes de comportar uma concentração maior de biomassa aderida em sua estrutura.

Nos últimos anos, a SABESP e a CASAN começaram a introduzir os processos MBBR/IFAS, utilizando mídias mais modernas, com alta área superficial, produzidas em Poliuretano e enriquecidas com carbono ativado. Primeiramente, em projetos de menor porte, em caráter experimental, com o objetivo de atestar a capacidade e a eficiência da tecnologia, obtendo-se sucesso em projetos, como a ETE Gênese (SABESP) e a ETE de Erval Velho (CASAN).

Após a validação da eficiência do processo, a tecnologia começa a ser aplicada em projetos maiores, como é o caso das Unidades de Recuperação de Qualidade (URQ), componentes do projeto Novo Rio Pinheiros, na cidade de São Paulo, que tem como objetivo a revitalização do Rio Pinheiros, melhorando a qualidade de suas águas, e dos córregos que compõem a sub-bacia hidrográfica do Rio Pinheiros. O projeto conta com a instalação de 5 URQs, sendo a maior delas a URQ Pirajussara, que tratará a vazão de 600 L/s do córrego Pirajussara. Estas unidades são o caso ideal para aplicação da tecnologia MBBR, pelo desafio de tratar uma alta vazão, de

um efluente com alta carga de poluentes, em uma área densamente povoada e urbanizada, sendo o espaço disponível para construção bastante limitado.

2.3. Integrated Fixed-Film Activated Sludge (IFAS).

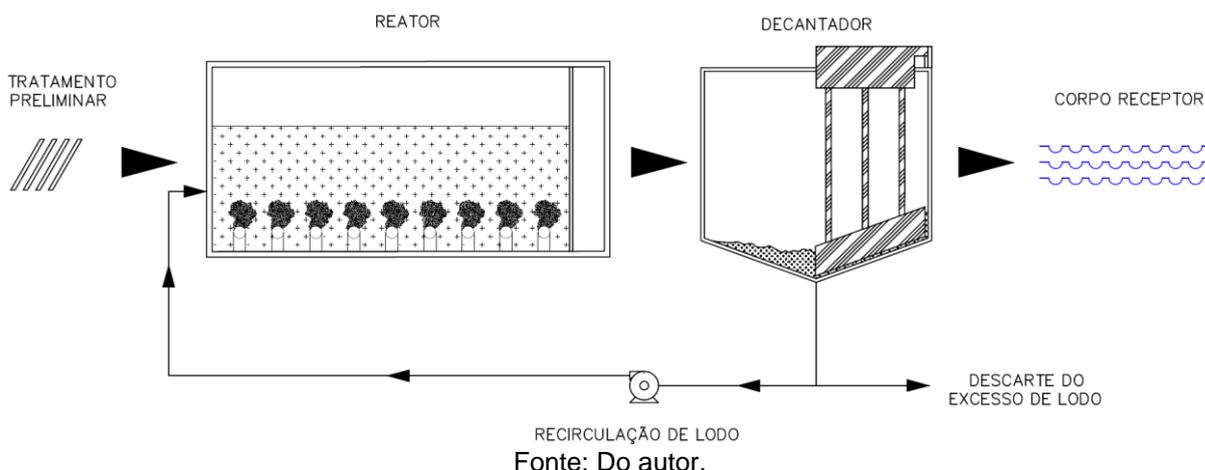
A premissa básica do processo IFAS é prover biomassa adicional ao reator de um sistema de lodo ativado ou MBBR, com o intuito de aumentar a capacidade do sistema, ou de aperfeiçoar sua eficiência. A biomassa adicional é obtida através da recirculação do lodo adensado nos decantadores do processo, reaproveitando a biomassa gerada nos tanques de aeração, aumentando a vida útil e o tempo de detenção dos microrganismos, que irão atuar na decomposição da matéria orgânica presente no efluente.

Assim, o processo IFAS é tipicamente considerado como uma de aprimoramento em estações de tratamento de efluente já existentes, que buscam melhorar ou incorporar a remoção de nutrientes ao seu processo.

O material suporte presente, e a biomassa a ele agregada, permite que o tratamento aeróbio seja completado em um volume reduzido, permitindo que parte do volume, seja utilizado como uma zona anóxica, ou como uma área de ação anaeróbia, capaz de remover nitrogênio e fósforo.

O processo IFAS pode ser aplicado a uma grande variedade de processos que utilizam suporte para biofilme, tanto fixos, quanto livres. Por vezes, o processo IFAS é confundido com o processo MBBR, pois ambos podem utilizar o mesmo tipo de biomídia. Entretanto, o processo MBBR não incorpora um sistema de retorno de lodo ativado (RAS) (Biofilm Reactors, WEF, 2010).

Figura 8 - Fluxograma básico do sistema IFAS.



Vantagens do sistema IFAS:

- Capacidade de aumentar eficiência de plantas já existentes, pela adição de mais biomédia;
- Maior concentração de biomassa disponível para tratamento, sem aumentar a carga de sólidos nas etapas de decantação, e clarificação finais do processo;
- Maior eficiência por unidade de volume;
- Redução na produção de lodo;
- Nitrificação e desnitrificação podem ocorrer simultaneamente;
- Capacidade de recuperação de fauna microbológica mais rapidamente, após eventos de choque, ou recebimento de cargas tóxicas.

Desvantagens:

- Potencial de gerar emissão de odores;
- Maior complexidade operacional. O controle biológico do retorno do lodo, é um processo bastante delicado;
- Aumento da perda de carga do sistema, relacionado a telas de retenção de biomédia.

2.4. Lodos ativados vs MBBR

O processo de lodo ativado é um dos mais experimentados, e bem estabelecido processo de tratamento de efluentes utilizado no mundo, com mais de um século de aplicação, sob as mais variadas circunstâncias. O princípio de funcionamento se baseia no cultivo de biomassa aeróbia, em um tanque equipado com algum sistema de aeração ativa. A biomassa gerada permanece em suspensão no recinto, e realiza a degradação biológica da matéria presente no efluente. Esta biomassa é então separada em decantadores, podendo ser retornada ao início de processo enquanto o lodo excedente é descartado.

O processo Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR), ou reator biológico de leito móvel, é um avanço tecnológico, que pode ser adaptado ao processo convencional de lodo ativado, a fim de aumentar a eficiência da decomposição de matéria orgânica, pela adição de biomassa aderida ao material suporte, além da biomassa em suspensão. Em sua concepção, este processo visava especificamente ampliar a capacidade de tratamento de unidades de tratamento de efluentes de pequeno porte, existentes na Europa, sem a necessidade de ampliar as dimensões dos reatores.

O processo Integrated Fixed Film Activated Sludge (IFAS) dá um passo além no processo MBBR, utilizando técnicas de retorno de lodo ativado, acumulado nos decantadores, ao reator aerado, adicionando uma nova camada de complexidade ao processo, visando aumentar ainda mais a sua eficiência (Oliveira et al., 2013).

3. OBJETIVO

- **Objetivo Principal:**

Avaliar a viabilidade econômica, e a eficiência do processo MBBR e IFAS, para ser aplicado à realidade brasileira, em comparação à tecnologia de Lodos Ativados, já bem estabelecida no Brasil.

- **Objetivos específicos:**

- Realizar uma análise de viabilidade econômica, comparando os custos dos processos MBBR/IFAS em relação à tecnologia de Lodo Ativado tradicional.
- Aferir a eficiência do processo e o seu potencial de evolução, analisando as tecnologias mais recentes de biomédias utilizadas em estações de tratamento de esgoto brasileiras.

4. METODOLOGIA

4.1. Estimativa de custo

Com o intuito de avaliar a situação atual da tecnologia MBBR e IFAS no Brasil, e a viabilidade de sua aplicação, é de suma importância averiguar os custos relacionados a implantação de estações de tratamento de esgoto, equipadas com estes tipos de sistemas de tratamento.

Tais custos, estão intrinsecamente relacionados à eficiência dos processos. Visto que as tecnologias MBBR e IFAS são relativamente complexas, quando comparadas a outras alternativas tecnológicas de tratamento de esgoto.

Dessa forma, realizou-se a análise comparativa de custos de implementação e operação a partir de dados obtidos na bibliografia. No estudo conduzido por Daniel Oliveira, Roque Piveli e Isaac Volschan, as tecnologias MBBR/IFAS são comparadas com as tecnologias de lodo ativado tradicionais, considerando os custos envolvidos na implementação dos sistemas, levando em consideração a realidade brasileira (Oliveira et al., 2013).

No estudo supracitado, foram consideradas 3 cenários para a comparação dos processos: (1) Somente remoção de matéria orgânica, considerando IFAS e lodo ativado de alta taxa, para atender uma população de 500.000 habitantes. (2) Remoção de matéria orgânica, e nitrogênio, considerando os sistemas IFAS e lodo ativado convencional, para atender uma população de 500.000 habitantes. (3) Remoção de matéria orgânica, remoção de nitrogênio e estabilização do lodo, considerando IFAS e lodo ativado com aeração prolongada, para atender uma população de 50.000 habitantes. Foram considerados gastos com a construção e operação do sistema, incluindo gastos com material suporte, sistema de aeração, valor do terreno e energia elétrica.

As estimativas dos gastos com as estruturas físicas, de engenharia civil, foram obtidas através do software SIENGE, amplamente utilizado no mercado, para o planejamento de obras. O software é capaz de simular o gasto com todos os suprimentos necessários, uma vez fornecida as quantidades estimadas de concreto, ferragens, alvenaria, mão de obra, etc.

Também foram considerados os gastos com a obtenção do material suporte, para o tanque de aeração do sistema IFAS, sendo o preço médio considerado R\$

2.000,00 por metro cúbico de material. Além disso, também foi ponderado o custo com o sistema de aeração, com sopradores de ar, difusores, tubulações etc.

Ademais, o valor do terreno para implantação das ETE's também foi levado em conta, considerando áreas apropriadas para este tipo de empreendimento, nos municípios.

Outro item importante que foi analisado, é o gasto com energia elétrica, fator este, fundamental para julgar a viabilidade do processo, uma vez que apresenta considerável impacto nos custos de operação das unidades de tratamento. São gastos expressivos a médio e longo prazo, essencial para o estudo de viabilidade dos processos (Oliveira et al., 2013).

A partir do levantamento de custos demandados pela implementação e construção das estações de tratamento, e os custos operacionais, e possível avaliar as vantagens competitivas de cada tecnologia, e para quais situações é mais vantajoso a aplicação de cada tecnologia.

4.2. Análise da tecnologia

Para averiguar os ganhos de eficiência que as tecnologias MBBR/IFAS podem trazer às estações de tratamento de esgoto, são apresentados dois estudos de caso bastante peculiares, da ETE Gênesis e ETE Erval Velho. Os dados foram fornecidos pela Monera BioPower, empresa que atuou no projeto de aprimoramento das ETEs, e a partir de laudos técnicos da SABESP.

A ETE Erval velho é um caso interessante de comparação entre a tecnologia MBBR/IFAS e a tecnologia de sistemas de lodo ativado tradicional, pois ela foi concebida para operar como uma planta de lodo ativado tradicional, e posteriormente, para aumentar a eficiência do processo de tratamento de efluentes, ela foi adaptada para operar como MBBR.

A ETE Gênesis, apresenta um cenário notável para avaliar o potencial de evolução da tecnologia MBBR, onde grandes saltos na melhoria do processo podem ser obtidos a partir do advento de novas tecnologias. Neste caso em específico, com o objetivo de aumentar a eficiência da estação de tratamento, a ETE passou por uma iniciativa de modernização no seu processo, através da aplicação de uma nova biomídia de material suporte.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Análise de custos

Na Tabela 3, apresenta-se os valores obtidos para o dimensionamento do volume útil (VU) instalado, ou seja, o volume dos tanques de aeração e (tanques dos sistemas). E a potência elétrica instalada (Pot), requerida pelos sistemas de aeração.

Tabela 3 - Volumes úteis dos tanques de aeração e potências instaladas

Condição de Projeto	MBBR/IFAS		Lodo Ativado	
	VU (m ³)	Pot (kW)	VU (m ³)	Pot (kW)
(1) Alta taxa 500.000 habitantes	5.625	933	15.750	933
(2) Convencional 500.000 habitantes	7.746	1.672	18.900	1.253
(3) Aeração Prolongada 50.000 habitantes	2.951	298	6.000	221

Fonte: Oliveira et al. (2013).

Percebe-se que o sistema MBBR/IFAS requer tanques de dimensões muito menores do que o sistema de lodo ativado, chegando a demandar um volume útil que chega a ser quase 1/3 do volume útil requerido pelo sistema de lodo ativado, no cenário (1), para a mesma potência instalada. A potência demandada pelo sistema MBBR é maior, embora o tanque aerado seja menor, pois o processo demanda mais oxigênio dissolvido (Oliveira et al., 2013).

A Tabela 4, a seguir apresenta os dados normalizados proporcionalmente para as dimensões de volume e potência por habitante.

Tabela 4 - Volumes úteis dos tanques de aeração e potências instaladas por habitante.

Condição de Projeto	MBBR/IFAS		Lodo Ativado	
	VU (m ³)/hab	Pot (kW)/hab	VU (m ³)/hab	Pot (kW)/hab
(1) Alta taxa 500.000 habitantes	0,01125	0,001866	0,0315	0,001866
(2) Convencional 500.000 habitantes	0,015492	0,003344	0,0378	0,002506
(3) Aeração Prolongada 50.000 habitantes	0,05902	0,00596	0,12	0,00442

Fonte: Oliveira et al. (2013).

Entende-se que os processos terão maior aproveitamento à medida que a escala do empreendimento aumenta, para atender a mais pessoas. Portanto, a implementação de processos com mais tecnologia agregada, passa a fazer mais sentido para cidades mais densamente povoadas.

A Tabela 5, apresenta os custos específicos estimados para cada um dos casos considerados. Aqui, foram ponderados os custos relacionados à construção civil das instalações, o custo com os equipamentos que compõe o sistema de aeração dos reatores aeróbios, e para os sistemas MBB/IFAS foi estimado o custo do material suporte (biomídias).

Tabela 5 - Estimativa dos custos de implantação dos processos avaliados

População (hab.)	Processos	Custos Específicos (R\$)				Custo por Habitante
		Construção Civil	Meio Suporte	Sistema de Aeração	Total	
(1) 500.000	Lodo ativado alta taxa	2.847.690	-	536.297	3.383.987	6,77
	MBBR/IFAS	1.056.947	5.625.000	536.297	7.218.244	14,44
(2) 500.000	Lodo ativado convencional	3.168.366	-	762.538	3.930.904	7,86
	MBBR/IFAS	1.292.964	7.746.000	609.881	9.648.845	19,30
(3) 50.000	Lodo ativado aeração prolongada	950.056	-	274.430	1.224.485	24,49
	MBBR/IFAS	460.918	2.951.000	303.290	3.715.208	74,30

Fonte: Oliveira et al. (2013).

Observa-se que os custos relacionados a construção civil para os tanques do sistema MBBR/IFAS é consideravelmente inferior, pois o processo requer um menor volume, ficando entre 37% e 49% do valor dos tanques do sistema de lodo convencional. O valor dos sistemas de aeração é bastante similar. Entretanto, o valor gasto com as biomídias para os sistemas MBBR/IFAS é bastante considerável, resultando em valores de 213% a 303% mais elevados em relação aos lodos ativados.

A Tabela 6, a seguir, apresenta os custos finais de implantação dos processos, para os casos em que se considera população de 500.000 habitantes (casos 1 e 2), incluindo os custos de aquisição de terreno, para construção, levando em consideração o preço de algumas cidades do interior do estado de São Paulo, e da capital, onde R é a relação de preço entre os sistemas de lodo ativado e os sistemas

MBBR/IFAS Para a estimativa de preço do terreno foram consideradas regiões em cada uma das cidades consideradas propícias para a instalação de uma estação de tratamento de efluentes. O preço do metro quadrado e as cidades analisadas foram: Valinhos R\$ 210,00; Jundiaí R\$ 180,00; Atibaia R\$ 120,00; Vinhedo R\$ 160,00; São Paulo R\$ 430,00. Os valores foram estimados a partir de dados obtidos em 2013 (Oliveira et al., 2013).

Tabela 6 - Custos finais, considerando custos de terreno.

População	Processos	Cidades (Valores em reais R\$)				
		Atibaia	Vinhedo	Jundiaí	Valinhos	São Paulo
500.000 Habitantes	Lodo ativado alta taxa	3.698.987	3.803.987	3.856.487	3.935.237	4.512.737
	MBBR/IFAS	7.330.564	7.368.004	7.386.724	7.414.804	7.620.724
	R (%)	50%	52%	52%	53%	59%
500.000 Habitantes	Lodo ativado convencional	4.308.904	4.434.904	4.497.904	4.592.404	5.285.404
	MBBR/IFAS	9.803.765	9.855.405	9.881.225	9.919.955	10.203.975
	R (%)	44%	45%	46%	46%	52%
50.000 Habitantes	Lodo ativado com aeração prolongada	1388165	1.442.725	1.470.005	1.510.925	1.811.005
	MBBR/IFAS	3.819.128	3.853.768	3.871.088	3.897.068	4.087.588
	R (%)	36%	37%	38%	39%	44%

Fonte: Oliveira et al. (2013).

Percebe-se que à medida que o preço do metro quadrado da cidade aumenta, a diferença de custo entre os processos diminui.

Levando em consideração que o preço das biomédias tem impacto substancial sobre os valores, a Tabela 7, a seguir, leva em consideração um valor para as biomédias de R\$ 900,00. Assim, pode-se avaliar o impacto do preço deste componente sobre a estimativa de custo total. Esta medida é interessante, pois podemos conjecturar que à época desta pesquisa (2013) a tecnologia era bastante recente no Brasil. O acesso às biomédias era escasso, e conseqüentemente os preços eram mais elevados. Além disso, as tecnologias mais atualizadas contam com biomédias mais modernas, que requerem um volume menor de preenchimento do volume do tanque

aerado, o que reduz consideravelmente a quantidade de biomédias a serem compradas. As biomédias de espuma de poliuretano, por exemplo, que terão sua eficiência avaliada adiante, neste trabalho, requerem somente 7% do volume do tanque de aeração para performar com eficiência, comparado às biomédias polietileno mais antigas, que chegam a precisar de até 60% do volume do reator.

Tabela 7 - Custos finais considerando as biomédias R\$ (900,00).

População	Processos	Cidades (Valores em reais R\$)				
		Atibaia	Vinhedo	Jundiaí	Valinhos	São Paulo
500.000 Habitantes	Lodo ativado alta taxa	3.698.987	3.803.987	3.856.487	3.935.237	4.512.737
	MBBR/IFAS	4.231.290	4.268.730	4.287.450	4.315.530	4.521.450
	R (%)	87%	89%	90%	91%	100%
500.000 Habitantes	Lodo ativado convencional	4.308.904	4.434.904	4.497.904	4.592.404	5.285.404
	MBBR/IFAS	5.543.465	5.595.105	5.620.925	5.659.655	5.943.675
	R (%)	78%	79%	80%	81%	89%
50.000 Habitantes	Lodo ativado com aeração prolongada	1.388.165	1.442.725	1.470.005	1.510.925	1.811.005
	MBBR/IFAS	2.196.078	2.230.718	2.248.038	2.274.018	2.464.538
	R (%)	63%	65%	65%	66%	73%

Fonte: Oliveira et al. (2013).

Pode-se observar que a perspectiva de evolução para a tecnologia MBBR/IFAS é promissora. À medida que os valores de material suporte forem reduzidos, a viabilidade econômica do processo aumenta drasticamente.

Na Tabela 8, a seguir, segue estimativas de custo com energia elétrica.

Tabela 8 - Estimativa dos custos de energia elétrica

População (hab.)	Processo de Tratamento	Potência (kW.h/h)	Custo em 20 anos (R\$)
500.000	Lodo ativado alta taxa	933	42.884.946
	MBBR/IFAS	933	42.884.946
	R (%)	-	-
500.000	Lodo ativado convencional	1.252	57.717.333
	MBBR/IFAS	1.672	76.999.436
	R (%)	-	75
50.000	Lodo ativado aeração prolongada	221	10.189.205
	MBBR/IFAS	298	13.736.080
	R (%)	-	74

Fonte: Oliveira et al. (2013).

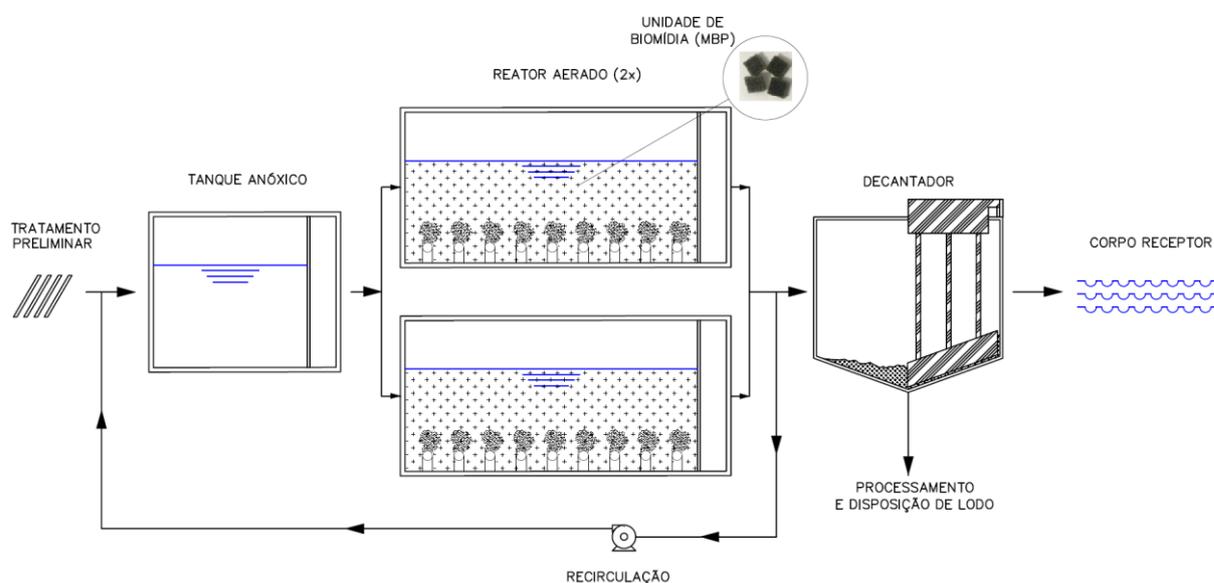
Constata-se que os valores são bastante próximos entre as tecnologias. Embora a tecnologia MBBR/IFAS demande dimensões menores para o reator aerado, ela também requer mais oxigênio dissolvido, o que gera mais gastos com bombeamento de ar.

5.2. ETE Gênesis

Conhecida como ETE Gênesis, a unidade de tratamento de esgoto da Sabesp está localizada no município de Santana do Parnaíba, trata uma vazão média de 7m³/h. O volume dos tanques de aeração é de 64,5m³ sendo o tempo de detenção na câmara aerada de 10,6 horas. O sistema também conta com um tanque anóxico, que recebe o efluente dos decantadores, para estabilização. Este empreendimento é um caso excelente para a análise do impacto das novas mídias de poliuretano enriquecida com carbono ativado, e com maior área superficial disponível para o crescimento biológico, da ordem de 12.000 m²/m³ a 20.000 m²/m³, pode trazer ao processo

MBBR/IFAS em comparação com as mídias de polietileno ou polipropileno, com área superficial menor, na ordem de $300 \text{ m}^2/\text{m}^3$ a $1.200 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Isto porque a ETE, em sua concepção, usava mídias de polipropileno, desde janeiro de 2016. Devido a necessidade de aumentar a capacidade de tratamento da unidade, a SABESP resolveu, em caráter experimental, realizar a troca das mídias de poliuretano, por mídias de espuma de poliuretano, denominadas Monera Bio Power (MBP), fornecidas pela empresa Monera Eco Solutions.

Figura 9 - Fluxograma básico do processo - ETE Gênesis.



Fonte: Do autor.

Observando as Figuras 10 e 11 pode-se identificar a diferença estrutural das biomídias. As Biomídias de polipropileno são sólidas, composta por armação rígida, de plástico endurecido, em formato de anéis cilíndricos. As biomídias de poliuretano têm formato de blocos, e uma constituição esponjosa.

Os tanques aerados da ETE Gênesis são em duas unidades, e dispõe de um volume total de $64,5 \text{ m}^3$. Foram aplicados $4,51 \text{ m}^3$ da nova mídia de poliuretano (MBP), que corresponde a 7% do volume dos tanques de aeração, sendo que para as mídias utilizadas anteriormente, o volume de mídias era de 32 m^3 , aproximadamente 50% do volume dos tanques de aeração. A norma regulamentadora brasileira NBR 12.209:2011 recomenda a aplicação de uma quantidade de biomídia entre 30% e 70% do volume do tanque. O processo também conta com a recirculação do efluente dos reatores aerados por um tanque anóxico, para fomentar a desnitrificação. As novas mídias começaram a ser usadas no dia 18 de agosto de 2018.

É importante salientar que a única alteração feita na ETE foi a substituição das mídias. Todas as outras instalações da ETE, e os protocolos de operação da mesma não foram alterados. Também não foi usado inóculo biológico, a fim de averiguar o crescimento de biofilme natural na biomídia de poliuretano enriquecida.

Figura 10 - Biomídia de anéis de polipropileno usada na ETE Gênesis



Fonte: Imagem – ETE Gênesis.

Figura 11 - Biomídia de espuma de poliuretano (MBP) aplicada na ETE Gênesis



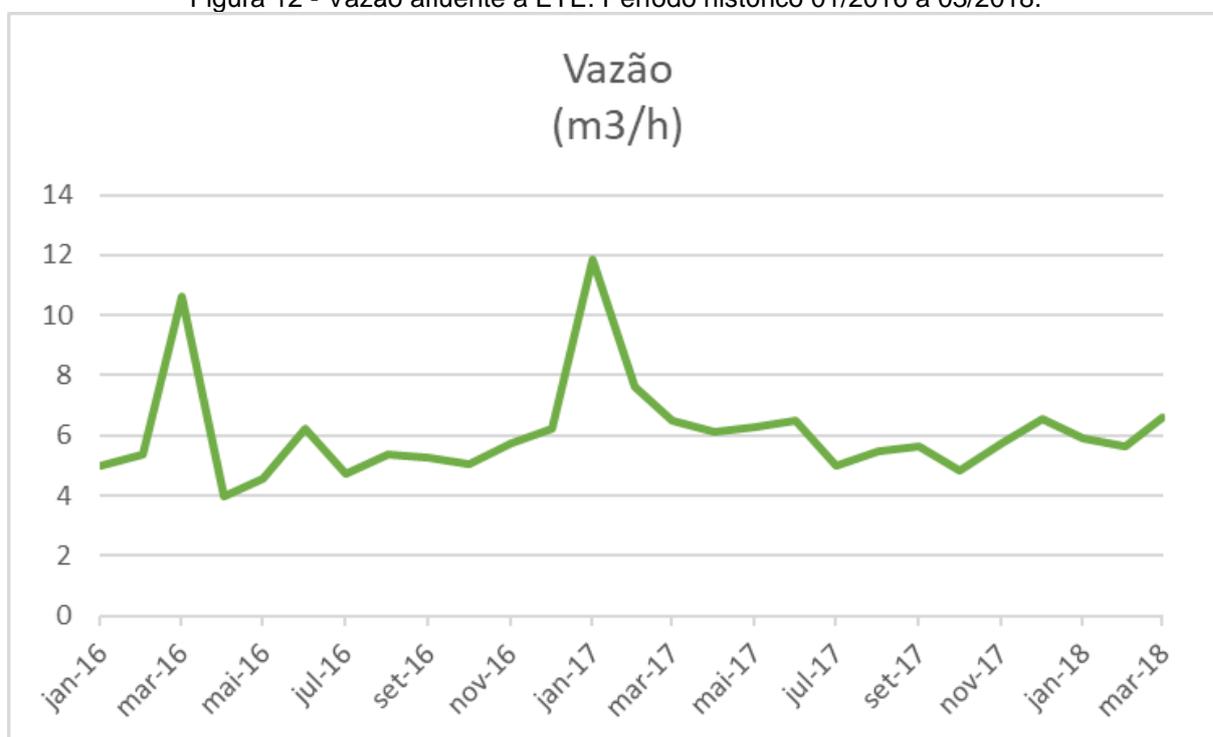
Fonte: Imagem – ETE Gênesis.

Logo no processo de remoção das mídias antigas, observou-se a presença de um borão escuro no fundo do tanque, e que as mídias, estavam concentradas no fundo dos tanques de aeração. Por ter um peso específico mais elevado, a tendência

era que as mídias de polipropileno precipitassem ao fundo do tanque, sendo necessário uma vazão muito grande de ar sendo bombeada no tanque para homogeneizar a mídia em todo o volume útil. Posteriormente, veio a se constatar que as novas biomídias são mais suscetíveis à fluidização, precisando de uma vazão de ar menor sendo bombeada no tanque, para que ela seja homogeneizada.

A seguir, as Figuras 12 e 13 apresentam, respectivamente, a vazão afluyente à ETE Gênesis no período histórico, do início de 2016 à março de 2018, e de 12/11/2018 a 04/02/2019, período em que foi estudado os resultados de eficiência de tratamento da ETE, após a substituição das mídias livres nos reatores aerados.

Figura 12 - Vazão afluyente a ETE. Período histórico 01/2016 a 03/2018.



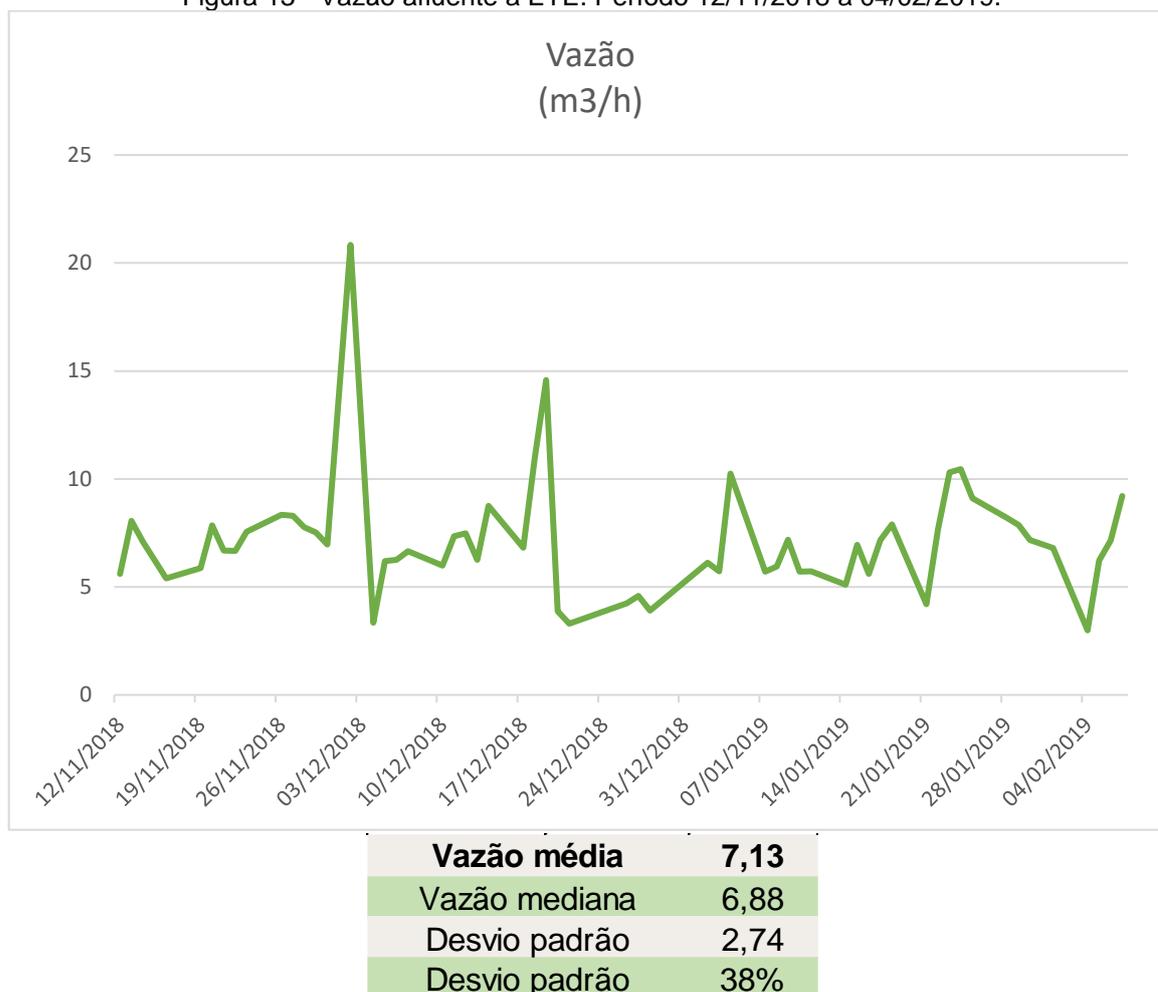
Vazão média 6,09

Vazão mediana 5,73

Desvio padrão 1,68

Desvio padrão 28%

Figura 13 - Vazão afluyente a ETE. Período 12/11/2018 a 04/02/2019.



A carga média afluyente aos tanques de aeração no período, foi de 20,3kgDBO_{5,20}/dia, 50kgDQO/dia e 8,5kgN-NH₄/dia.

A Tabela 9 apresenta as informações de carga de DBO no esgoto bruto e no efluente tratado, e de eficiência na remoção de DBO do sistema, levando em consideração a carga de DBO antes da substituição das biomédias (biomédia de polipropileno) e após a substituição das biomédias (espuma de poliuretano).

Tabela 9 - Valores de DBO_{5,20}

Anéis de polipropileno		Espuma de poliuretano			
		DBO _{5,20} (mg/L)			
		Após 28 dias		Após 40 dias	
Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
205	23	332	35	256	4
Eficiência		Eficiência		Eficiência	
88,7%		89,3%		98,4%	

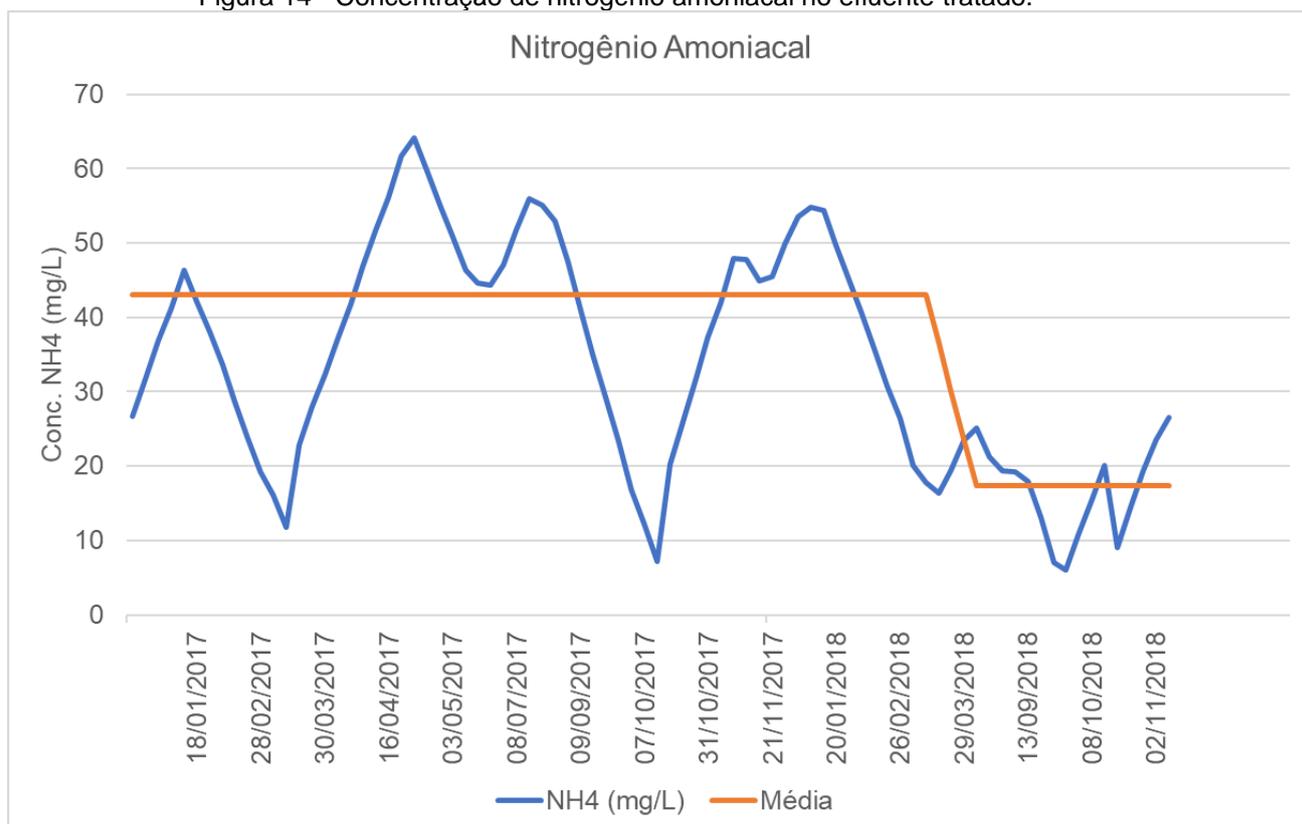
Fonte: Laudo técnico ETE Gênesis.

Observa-se que a eficiência de remoção de DBO no sistema, já superou o nível de prévio anteriores em apenas 28 dias, após a reposição das mídias, sendo que todo o biofilme foi removido dos tanques de aeração, e não houve fornecimento de inóculo biológico. O que demonstra a rápida maturação da fauna microbológica no ambiente da estrutura das biomédias de poliuretano (Biofilm Reactors, WEF, 2010).

Após 40 dias, a eficiência do processo utilizando as biomédias de poliuretano, já era consideravelmente superior, alcançando 98% de eficiência. O que pode indicar uma menor carreamento de matéria biológica ativa, para os tanques dos decantadores. Entre outros fatores, esta circunstância pode estar relacionada à maior capacidade dos microrganismos de se aderir à nova biomédia. Há também a possibilidade de a biomassa ter uma maior capacidade metabólica, sendo capaz de consumir mais matéria orgânica, estando presente em menor concentração.

A Figura 14 apresenta os dados de remoção de nitrogênio amoniacal na ETE Gênesis.

Figura 14 - Concentração de nitrogênio amoniacal no efluente tratado.



Fonte: Laudo técnico ETE Gênesis.

Apenas 6 dias depois da aplicação da nova mídia, o sistema já apresentou melhora significativa na eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal. Antes a eficiência média era por volta de 13%, e passou a ser maior que 60%.

A melhoria na remoção de nitrogênio amoniacal, sem o aumento na concentração de nitrogênio na forma de nitrato, indica a ocorrência de processos de nitrificação e desnitrificação. A O pH do sistema se manteve em média, na faixa de 7 a 7,5 o que indica que a remoção de nitrogênio é por ação biológica. Além da desnitrificação na parte anóxica do sistema, é possível que a biomídia propicie condições para a desnitrificação na parte aeróbia. Isso se dá, pois no interior dos microporos da biomídia esponjosa, ocorrem camadas de menor teor de oxigênio, formando zonas anóxicas ou mesmo anaeróbias, o que propicia o desenvolvimento de bactérias capazes de realizar o processo de desnitrificação. Sendo assim, o processo de nitrificação e desnitrificação podem ocorrer simultaneamente, nos próprios tanques aerados, além da desnitrificação que ocorre nos tanques anóxicos.

Após 6 meses de operação, uma amostragem de mídia foi retirada do tanque de aeração da ETE. A unidade de mídia apresentava desenvolvimento microbiológico, sem apresentar colmatação, fenômeno este, que era bastante comum de ocorrer nas

mídias de polipropileno, e era prejudicial ao processo, uma vez que gera o “entupimento” das mídias. Tal processo impede a circulação de oxigênio e efluente, reduzindo a área de contato deste com os microorganismos, reduzindo a eficiência do processo.

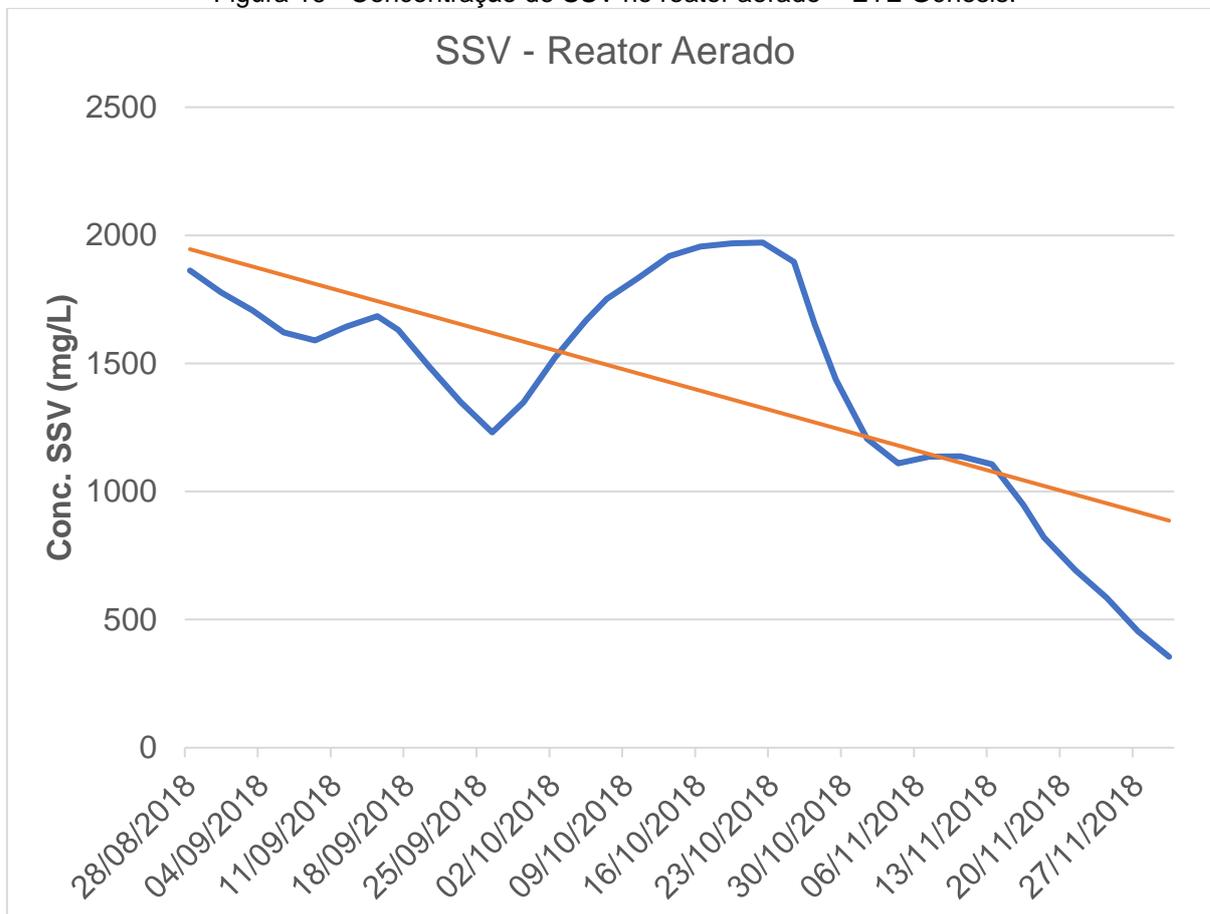
Figura 15 - Foto microscópica da biomídia de poliuretano aplicada na ETE Gênesis, após 06 meses de operação.



Fonte: Imagem – ETE Gênesis.

A Figura 16 apresenta os valores de concentração de sólidos suspensos voláteis (SSV) no reator aerado.

Figura 16 - Concentração de SSV no reator aerado – ETE Gênesis.



Fonte: Laudo técnico ETE Gênesis.

A concentração de SSV no início do período, após a substituição das biomédias no tanque de aeração, era de 1.920 mgSSV/L. Aproximadamente 4 meses depois, a concentração de SSV caiu para 740 mgSSV/L a 370 mgSSV/L. Isso corresponde a uma queda de 70% na produção de sólidos, sem prejudicar a eficiência na remoção de DBO do sistema. Isto atesta a menor produção de excesso de biomassa no processo MBB/IFAS, usando as biomédias de poliuretano.

5.3. ETE Erval Velho

Localizada no município de Erval Velho, em Santa Catarina, a unidade de tratamento de esgoto é um empreendimento da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN). A ETE é projetada para tratar 9 L/s e opera, em média, com

vazão de 5 L/s. O sistema conta com 4 reatores biológicos, empregando a tecnologia de lodos ativados.

Figura 17 - ETE Erval Velho



Fonte: CASAN.

Em janeiro de 2020, a CASAN definiu um plano de revitalização e melhoria da ETE Erval Velho, com o objetivo de melhorar a qualidade do efluente final da mesma, e para prepará-la para ser capaz de receber cargas orgânicas elevadas, e efluentes tóxicos, permitindo que a ETE passe a recolher efluentes das fossas dos municípios da região.

Para tal finalidade, foi decidido converter a estação para operar como MBBR, aplicando biomédias de espuma de poliuretano para atuar como material suporte, similares as biomédias utilizadas na ETE Gênese, com área superficial disponível para aderência de biofilme de aproximadamente $20.000 \text{ m}^2/\text{m}^3$. A aplicação das novas biomédias foi realizada no dia 16/01/2020.

A Tabela 10 apresenta os dados de eficiência do processo após a aplicação das biomédias de poliuretano.

Tabela 10 - Análise amostras ETE Erval velho

Amostra 19/02/2020			
	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Eficiência
DBO	174	15	91,4%
DQO	406	100	75,4%
N-Amoniacal	26,6	10,2	61,7%
Nitrato(mg/L)		2,1	
pH	7,1	7,01	
Amostra 19/03/2020			
	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Eficiência
DBO	156	< 10	93,6%
DQO	315	< 69	78,1%
N-NH ₃	47,9	13,4	72,0%
Nitrato(mg/L)		9,7	
pH	7,46	7,28	

Fonte: Laudo técnico ETE Erval Velho.

Dentro de um mês a eficiência na remoção de DBO obtida no processo da ETE, que antes ficava na média de 78%, aumentou para 91,4%. Além de passar a verificar a remoção de nitrogênio amoniacal, e a presença de nitrato. O processo de desnitrificação não era alcançado anteriormente, em níveis significativos.

6. CONCLUSÃO

Quanto à viabilidade econômica, a implementação de uma estação de tratamento de esgoto projetada para operar com a tecnologia MBBR/IFAS, de modo geral, é consideravelmente mais custosa do que uma estação de tratamento de esgoto operando com lodo ativado convencional, para tratar o efluente em conformidade com os padrões exigidos pela legislação. Isso se dá, em razão ao alto custo das biomédias, e os gastos com energia elétrica, para aeração dos reatores biológicos. O alto custo do material suporte, não compensa a economia oriunda da necessidade de uma menor área e volume dos reatores, na maioria dos casos. A tecnologia torna-se mais interessante para casos em que o espaço é um fator limitante, como em grandes metrópoles densamente povoadas, ou em casos em que se busca incrementar o desempenho de estações e tratamento de esgoto já existentes operando sistemas de lodo ativado, através da adaptação das instalações já existentes.

Ademais, os estudos de caso da ETE Gênese e ETE Erval Velho, e o sucesso obtido na melhoria da eficiência das ETEs, através da aplicação de novas tecnologias como as biomédias de poliuretano (MBP), demonstram que o processo de MBBR/IFAS ainda tem muito o que evoluir nos próximos anos, e a aplicação da tecnologia em projetos de escala maior, pode vir a se comprovar ainda mais viável economicamente no futuro. As estações de tratamento passaram a apresentar maior eficiência na remoção de DBO, melhores resultados de nitrificação e desnitrificação, com menor geração de lodo a ser estabilizado e descartado.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Águas (ANA); **Atlas Esgotos - Despoluição de Bacias Hidrográficas**, Agência nacional de águas Ministério do Meio ambiente. 2017. Disponível em: <http://atlasesgotos.ana.gov.br/> Acesso em: 2022-07-05.

Agência Nacional de Águas (ANA); **Atlas Esgotos - Sistema nacional de Informações sobre recursos hídricos**. Disponível em: <http://atlasesgotos.ana.gov.br/> Acesso em 05/07/2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.209: Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários**. Rio de Janeiro, 2011.

BIASEA, A.; KOWALSKIA, M. S.; DEVLINA T. R.; OLESZKIEWICZA J. A.; **Moving bed biofilm reactor technology in municipal wastewater treatment: A review**. Department of Civil Engineering, University of Manitoba, Winnipeg, Canada. 2019.

Biofilm Reactors Task Force of the Water Environment Federation.; **Biofilm Reactors**. WEF press, USA, 2010.

BISWAS, K.; TAYLOR, M. W.; TURNER, S. J.; **Successional development of biofilms in moving bed biofilm reactor (MBBR) systems treating municipal wastewater**. Applied microbiology and biotechnology, v. 98, n. 3, p. 1429-1440, 2014.

BÖRNER, C.; TRÜBENBACH, René; **Biological watertreatment: MBBR & IFAS technology**. Mark Allen Group, England. 2017.

CAMPOS, F.; FUJII, F. Y. e PIVELI, R. P.; **MBBR-opção promissora no tratamento de esgotos**. Revista TAE, v. 1, n. maio/ju 2011, p. 40-50, 2011Tradução . . Acesso em: 05/07/2022.

CAVALCANTI, J. E.; **A geração, tratamento e destinação dos lodos das URQs**. 2021. Instituto de Engenharia FIESP, 2021. São Paulo – SP.

FUJII, F. Y.; **Análise comparativa entre o processo de lodo ativado e o reator de biofilme de leite móvel na remoção de nitrogênio de esgoto sanitário.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. doi:10.11606/D.3.2011.tde-12122011-134438. Acesso em: 2022-07-05.

GRADY J.R.; C. P. L.; et al.; **Biological wastewater treatment.** CRC press, 2011.

Ministério da Economia; **Novo marco do Saneamento Básico.** Disponível em: <https://www.gov.br/economia/pt-br/assuntos/noticias/2022/setembro/novo-marco-legal-do-saneamentobasico> Acessado em: 29/08/2022.

MOHD SIDEK, L. et al. **Experimental comparison between moving bed biofilm reactor (MBBR) and conventional activated sludge (CAS) for river purification treatment plant.** In: **Advanced Materials Research.** Trans Tech Publications Ltd, 2015. p. 806-811.

ODEGAARD, H.; **The Moving bed biofilm reactor.** Water environmental Engineering and Reuse of Water, Hokkaido Press, 1999. p. 250-305.

OLIVEIRA, D. V. M.; VOLSCHAN, I.; e 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 Tradução. Acesso em: 06 dez. 2022.

RUSTEN, B. et al. **Design and operations of the Kaldnes moving bed biofilm reactors.** **Aquacultural engineering**, v. 34, n. 3, p. 322-331, 2006.

SANDER, S.; BEHNISCH, J.; WAGNER, M. **Energy, cost and design aspects of coarse-and fine-bubble aeration systems in the MBBR IFAS process.** **Water Science and Technology**, v. 75, n. 4, p. 890-897, 2017.

SENA, H. C.; **Aplicação Em Escala Real De Mídia De Poliuretano Enriquecida Com Carbono E Outros Compostos (Estudo De Caso). 30º Congresso ABES. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Natal – RN. 2019.

SENA, H. C.; **Recebimento de lodo de ETA em ETE por lodo ativado operando com mídia plástica no tanque de aeração (MBBR).** 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. doi:10.11606/T.3.2011.tde-31082011-161023. Acesso em: 2022-12-06.

SPERLING, M. V.; **Lodos ativados.** Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1997.

SPERLING, M. V.; **Princípios Do Tratamento Biológico De Águas Residuárias**, Volume 4. Lodos Ativados. Belo Horizonte, Editora UFMG, 2016.

STEWART, Philip S. **Diffusion in biofilms.** Journal of bacteriology, v. 185, n. 5, p. 1485-1491, 2003.