



## **9895 - DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA O PLANEJAMENTO DE MODERNIZAÇÃO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO**

**Ana Carolina Daniel Morihama<sup>(1)</sup>**

Doutora em Saneamento Ambiental pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Mestre em Engenharia Química pelo Politécnico di Torino (IT). Engenharia Química pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). Engenheira na JNS Engenharia, Consultoria e Gerenciamento Ltda..

**Teresa Cristina Lampoglia**

Mestre em Engenharia Industrial na Universidade de Lima. Pós graduada em Engenharia Sanitária pelo International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering (Delft University of Technology / Netherlands Universities Foundation for International Co-operation) - Delft (Holanda). Engenheira Civil pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). Coordenadora de Projetos na JNS Engenharia, Consultoria e Gerenciamento Ltda..

**Elton Roberto Pinho da Silva**

Engenheiro Civil pela Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista (UNESP). Sócio Diretor na JNS Engenharia, Consultoria e Gerenciamento Ltda..

**Patrícia Pamplona de Oliveira Guimarães**

Engenheira Civil pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP). Engenheira na SABESP.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Pedroso de Moraes, 433, 11º andar - Pinheiros - São Paulo - SP - CEP: 05419-902- Brasil - Tel: +55 (11) 3039-1166 - Fax: +55 (11) 3039-1169 - e-mail: [ana.carolina@jnsecg.com.br](mailto:ana.carolina@jnsecg.com.br).

### **RESUMO**

A necessidade de recuperação da qualidade dos corpos hídricos exige padrões cada vez mais rigorosos para os efluentes das estações de tratamento de esgoto. Avanços recentes em tecnologia de tratamento de esgoto são direcionados à elevada eficiência de remoção de nutrientes, conjuntamente com a ocupação de áreas reduzidas. Neste sentido, este estudo teve como objetivo desenvolver uma metodologia para o planejamento da modernização de uma estação de tratamento de esgoto, visando não só à melhoria da qualidade do efluente final tratado, como também à gestão integrada de nutrientes, à recuperação de recursos e ao fornecimento de produtos com valor agregado. Os resultados obtidos indicaram que há um grande avanço no desenvolvimento tecnológico na indústria de tratamento de esgoto. Observa-se que, dependendo da tecnologia adotada, a estação de tratamento de esgoto pode ser planejada para produzir efluentes com excelente qualidade e ainda propiciar a recuperação de recursos no tratamento de correntes secundárias.

**PALAVRAS-CHAVE:** Modernização de ETEs, tratamento de esgoto, tecnologias de tratamento.

### **INTRODUÇÃO**

Os recursos hídricos são direta e indiretamente afetados pelo tipo de uso e ocupação do solo das bacias hidrográficas. A degradação do corpo hídrico está relacionada ao aumento das cargas de poluição das diversas fontes relacionadas às atividades desenvolvidas na bacia (LEITHOLD et al., 2017).

Os corpos hídricos de regiões densamente ocupadas apresentam altas demandas de água, tanto para abastecimento, como para diluição das cargas poluidoras (FANTIN et al., 2017). A disponibilidade de água em condições de equilíbrio quali-quantitativo para os seus múltiplos usos é fundamental para a manutenção dos processos naturais e do bioma, bem como para a saúde e atividades humanas (LEITHOLD et al., 2017).

Os cursos d'água superficiais constituem, usualmente, o principal destino final dos esgotos tratados. Desta forma, o planejamento e projeto de sistemas de tratamento de efluentes devem considerar a capacidade de assimilação e de suporte dos corpos d'água (REIS et al., 2015). Além disso, o planejamento deve estar de acordo com as legislações relacionadas ao uso de recursos hídricos, que definem quais os limites máximos para concentração de determinados constituintes que podem ser descartados nos corpos receptores e definem o enquadramento dos corpos hídricos. Entre as principais leis de referência estão:



- Resolução CONAMA nº 357/2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes e dá outras providências;
- Resolução CONAMA nº 430/2011, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005;
- Decreto Estadual nº 10.755, de 22 de novembro de 1977, que dispõe sobre o enquadramento dos corpos de água receptores na classificação prevista no Decreto nº 8.468, de 8 de setembro de 1976, e dá providências correlatas<sup>1</sup>.
- Decreto Estadual nº 8468, de 8 de setembro de 1976, que aprova o Regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a Prevenção e o Controle da Poluição do Meio Ambiente<sup>1</sup>.

Neste contexto, na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), o Governo do Estado de São Paulo deu início em 1991 à implantação do Programa de Despoluição do Rio Tietê – Projeto Tietê, com o objetivo de projetar e construir redes coletoras, coletores-tronco, interceptores e Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), sob responsabilidade da SABESP, e ações referentes ao controle de poluição hídrica dos efluentes industriais.

Dentro do escopo do Projeto Tietê, o Plano Diretor de Esgoto (PDE) da RMSP vem sendo implantado em etapas sucessivas. A primeira etapa (1992 – 1998) resultou no aumento do percentual da população urbana atendida por coleta de esgoto e na capacidade de tratamento. A segunda etapa (2000 – 2008) revisou o PDE dando subsídios para a continuidade do Projeto Tietê e ampliando os índices de coleta de esgoto e tratamento do esgoto coletado, deixando de ser lançados milhões de litros de esgotos in natura nos cursos hídricos. Recentemente foi elaborado o PDE-10, que identificou as demandas e propôs as ações para a expansão do Sistema Principal e dos sistemas isolados de esgoto da RMSP para o horizonte de 2030. O PDE-10 considerou a continuidade dos processos e tecnologias atuais das ETEs existentes.

Porém, com o aumento stress hídrico quali-quantitativo, a proteção da qualidade dos corpos receptores cria a necessidade de implantar processos de tratamento de esgoto que considerem a redução da carga de nutrientes (nitrogênio e fósforo) no efluente final do sistema. Avanços recentes em tecnologia de tratamento de esgoto são direcionados à elevada eficiência de remoção de nutrientes para a melhoria da qualidade do efluente tratado, conjuntamente com a ocupação de áreas reduzidas, já que muitas estações de tratamento de esgoto existentes têm limitação de espaço para acomodar a modernização.

Neste cenário, em 2013 a SABESP contratou a Elaboração do Plano de Modernização do Tratamento de Esgotos na Região Metropolitana de São Paulo (PLAMTE), que servirá de instrumento para orientar o processo decisório da definição e estabelecimento da sequência de ações e investimentos nas ETEs do Sistema Principal da RMSP, para atender as recomendações do PDE-10. O objetivo do PLAMTE é a contribuição para a melhoria da qualidade das águas dos rios e córregos que recebem os efluentes finais das ETEs, identificando e quantificando as diferentes fontes de poluição.

No projeto PLAMTE, foram desenvolvidos cenários de aporte de poluição que possibilitaram a realização de simulações de qualidade da água dos rios. Estes estudos darão subsídios para a elaboração dos Estudos de Concepção para a seleção da melhor alternativa a ser implementada em cada ETE.

A demanda mundial por modernização de instalações existentes levou o mercado de tratamento de esgoto a desenvolver novas tecnologias que combinam o incremento da qualidade do efluente tratado com as restrições de área para a sua implantação, sem descuidar da complexidade da solução e dos custos envolvidos não apenas para investimento como para operação e manutenção.

Novas tecnologias de tratamento encontram-se em diferentes estágios de desenvolvimento, requerendo uma maturação da solução para sua aplicação em larga escala. O grande desafio é como considerar estes avanços no planejamento de longo prazo, sem descuidar da necessidade de modernização e/ ou de ampliação em curto e médio prazo.

<sup>1</sup> Aplicável apenas no Estado de São Paulo



Neste contexto, o estabelecimento de metodologias para o planejamento de modernização de uma estação de tratamento de esgoto, visando à recuperação e manutenção da qualidade do corpo receptor, e ao mesmo tempo inserindo-se dentro das limitações de espaço e recursos existentes, torna-se um desafio complexo.

## OBJETIVO

Desenvolvimento de metodologia para o planejamento de modernização de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), visando à melhoria da qualidade do efluente final tratado, gestão integrada de nutrientes, a recuperação de recursos e fornecimento de produtos com valor agregado.

## METODOLOGIA

A ciência do tratamento de esgoto tem se expandido rapidamente nos últimos anos, não só como resultado da exigência de padrões de qualidade cada vez mais rigorosos para os efluentes, mas também pela adoção de ferramentas avançadas de simulação como parte do processo de concepção do projeto e ainda, da maior precisão dos sistemas de monitoramento e controle da operação. A otimização do espaço e custo envolvidos no tratamento dos efluentes tem resultado no desenvolvimento de novas tecnologias que paulatinamente vem sendo comprovadas através de sua aplicação em instalações em escala industrial.

O planejamento de modernização de Estações de Tratamento de Esgoto deve prever a flexibilidade da tecnologia do tratamento proposto para atender as necessidades, atuais e futuras, da qualidade do efluente tratado, visando à recuperação e preservação dos corpos hídricos receptores e ao reuso da água, quando aplicável. Além disso, devem-se levar em consideração as limitações físicas das instalações existentes e que a implantação da modernização proposta impacte minimamente a operação da planta existente.

A modernização das ETEs deve atender alguns critérios, como o padrão de qualidade do efluente tratado e a inserção da unidade dentro das áreas disponíveis, além de cumprir com outros requisitos, entre eles a limitação de recursos disponíveis para investimento, operação e manutenção. Na atualidade, buscam-se soluções para que essas instalações não tenham como único objetivo o tratamento de efluente, mas que também sejam recuperadoras de recursos e fornecedoras de produtos com valor agregado.

O planejamento da modernização das ETEs deve considerar a flexibilidade de se adaptar a novas tecnologias, considerando seus diferentes níveis de desenvolvimento, dependendo do horizonte de planejamento:

- **Adoção de Tecnologia em Curto Prazo:** O termo curto prazo refere-se ao próximo projeto de expansão ou modernização em uma instalação; para planejamento a curto prazo normalmente são consideradas tecnologias já comprovadas em instalações de porte similar às que estão sendo projetadas;
- **Adoção de Tecnologia em Médio Prazo:** O termo médio prazo refere-se ao horizonte de cinco a dez anos e incluiria as tecnologias atualmente conhecidas que estão em seus estágios mais iniciais de adoção. Estas tecnologias podem ser usadas na ocasião de uma segunda fase de modernização de uma instalação, após se ter desenvolvido uma base suficiente de experiência no campo;
- **Adoção de Tecnologia em Longo Prazo:** É importante reconhecer que o planejamento para longo prazo é extremamente incerto. Ao considerar um horizonte de mais de 15 anos, o nível de incerteza em uma ampla faixa de fatores torna o planejamento detalhado impraticável. Entretanto, também é muito importante planejar uma instalação para longo alcance da melhor maneira possível de forma a reduzir impactos negativos de decisões de curto prazo na viabilidade de longo prazo de uma instalação. O planejamento de longo prazo normalmente envolve o uso das tecnologias emergentes. Não se espera que estas tecnologias na verdade sejam aplicadas na etapa do planejamento, mas que sejam representativas em relação ao que pode ser utilizado no futuro.

Sendo assim, na elaboração do planejamento de modernização de uma ETE, os primeiros aspectos que deverão ser avaliados são os requerimentos relacionados à tecnologia de tratamento a ser adotada. Deve-se



considerar a melhoria na eficiência e a confiabilidade do tratamento, ao mesmo tempo, minimizar a área ocupada e maximizar a sua flexibilidade para modernizações futuras.

Alguns dos condicionantes principais que devem ser considerados para a modernização das instalações incluem:

- Minimização da área ocupada: reduzir a área de instalação das unidades de tratamento, frente a uma restrição de espaço cada vez maior nas áreas urbanas;
- Soluções inovadoras e flexíveis: a concepção de instalações deve adotar o conceito de flexibilidade e capacidade de adaptação da planta para permitir a incorporação de modernizações futuras;
- Melhorar a eficiência e confiabilidade do tratamento: considerar tecnologias que minimizem os custos com operação e manutenção das instalações, ao mesmo tempo em que proporcione uma qualidade adequada de efluente tratado de maneira confiável;
- Redução de impactos ambientais no entorno em que se inserem;
- Eficiência energética: reduzir o consumo de energia para a redução dos custos operacionais das instalações e se possível que se alcance a neutralidade de energia na estação de tratamento de esgoto.
- Recuperação de Recursos: A *Water Environment Federation* (WEF), nos EUA, recomenda usar o termo “Instalações de Recuperação de Recursos da Água” (*Water Resource Recovery Facility - WRRFs*) ao invés de Estação de Tratamento de Esgoto. A mudança da nomenclatura reflete um paradigma na mudança de objetivo da instalação, que deve ter o foco na recuperação de recursos de água, nutrientes e energia (GOLDSTEIN, 2018).

Atualmente, as tecnologias de tratamento de esgoto disponíveis permitem alcançar qualquer nível de qualidade de efluente que um corpo receptor possa precisar. Ressalta-se que nem sempre é possível atingir qualidades mais elevadas do efluente tratado adotando apenas melhorias na tecnologia existente, muitas vezes é necessária a adição de outras unidades de processos ou tecnologias de tratamento.

Para desenvolver o planejamento de modernização de ETEs, propõe-se a análise das tecnologias existentes, seu grau de consolidação, as condições para sua implantação, os custos de investimento e operação e os impactos ambientais envolvidos, confrontados com a necessidade do corpo hídrico receptor e o horizonte do planejamento, para a determinação da solução mais adequada. É fundamental que esta análise envolva não só os processos para tratamento da fase líquida, mas também inclua a avaliação do tratamento e disposição final do lodo gerado, das correntes secundárias resultantes do processo selecionado e o potencial da instalação para a recuperação de recursos.

## RESULTADOS OBTIDOS, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O tratamento da fase líquida em uma Estação de Tratamento de Esgoto, em geral, é dividido em cinco etapas:

- Tratamento preliminar: sua principal função é proteger os equipamentos a jusante, de materiais grosseiros e detritos que eventualmente chegam à planta junto com o esgoto bruto. Consiste no gradeamento e remoção de areia;
- Tratamento primário: etapa de separação sólida/líquida onde partículas são removidas do fluxo vindo do tratamento preliminar. Esta é considerada uma etapa opcional, mas representa um bom custo-benefício para instalações de médio e grande porte;
- Tratamento secundário: etapa de tratamento biológico e uma separação de sólidos. No tratamento biológico, organismos microbiológicos são usados para degradar/remover contaminantes de águas residuais, removendo material carbonáceo e pode também incluir a remoção de nutrientes como nitrogênio e fósforo;



- Tratamento Terciário: etapa de separação de sólido/líquido para polimento do efluente secundário, com remoção adicional de sólidos e/ou nutrientes. Considera-se esta etapa de tratamento para atender a padrões restritivos de qualidade de efluente;
- Desinfecção: Normalmente a última etapa de tratamento antes do descarte de efluente, a desinfecção é usada para reduzir o número de patógenos presentes no efluente final da instalação. Esta etapa nem sempre é requerida nas instalações.

Os desenvolvimentos tecnológicos no tratamento da fase líquida concentram-se na remoção de carbono ou nas combinações de remoção de carbono, nitrogênio e fósforo, dependendo dos requisitos de qualidade do efluente da instalação. Existem duas categorias gerais de tratamento biológico: processos com biomassa suspensa ou com biofilme. Todos os processos de crescimento suspenso e alguns processos de biofilme requerem uma etapa de separação de sólidos/líquido.

### **Biomassa Suspensa (Lodos Ativados)**

O tratamento secundário mais utilizado é o processo de biomassa suspensa (também chamado de lodos ativados).

Nos sistemas de lodos ativados cultiva-se no biorreator a biomassa com o esgoto afluente em ambientes com diferentes condições (aeróbio, anóxico e anaeróbio) para atingir objetivos específicos do processo de tratamento.

Em um sistema de lodos ativados com remoção biológica de nitrogênio, diversas configurações de zonas aeróbia e anóxicas internas ao biorreator podem ser utilizadas. Esses processos incluem zonas pré-anóxicas (processo de Ludzak-Ettinger), zona pré-anóxica com recirculação interna da zona aeróbia para a anóxica (processo Ludzak-Ettinger Modificado – MLE), alimentação escalonada (*step-feed*) em zonas anóxicas, zona pós-anóxica, etc.

O processo Ludzak-Ettinger Modificado para a configuração dos biorreatores tem a vantagem de se adaptar a limitação de área disponível e conseqüentemente minimização dos custos de investimento e operação (menor bombeamento, menos canais/tubulações) e a menor complexidade de construção e operação.

É possível também incluir no sistema zonas anaeróbias, para remoção de fósforo. No caso de limites muito restritivos de fósforo, a remoção deverá ser complementada com processos físico-químicos.

O processo de tratamento com biomassa suspensa inclui também uma fase de separação da biomassa, que poderá ser feita por gravidade, em decantadores convencionais, ou através de membranas de ultrafiltração ou microfiltração (sistemas MBR), a qual será recirculada aos reatores para garantir as concentrações de microrganismos nos reatores biológicos. A biomassa em excesso é retirada do sistema de tratamento secundário e enviada para estabilização no sistema de tratamento de biossólidos.

Inclui ainda o fornecimento de ar ao sistema biológico aeróbio, para garantir as condições ótimas de crescimento dos microrganismos envolvidos no processo aeróbio.

### **Tratamento Biológico de Múltiplos Estágios**

O tratamento biológico de múltiplos estágios utiliza processos biológicos em série, cada um com sua própria biomassa. O exemplo mais comum é o processo em dois estágios em que no primeiro estágio realiza-se a remoção do carbono e no segundo estágio, a nitrificação (remoção de amônia). Um terceiro estágio pode ser adicionado para desnitrificação. Alternativamente, a nitrificação e a desnitrificação podem ser incluídas no segundo estágio.

Normalmente, cada estágio do tratamento biológico incluirá um processo de separação de sólidos, mas não necessariamente a mesma alternativa de separação de sólidos em cada estágio. Por exemplo, o primeiro estágio pode realizar a remoção de carbono e usar decantadores secundários, enquanto o segundo estágio pode alcançar a nitrificação e usar membranas.



O tratamento biológico de dois estágios oferece uma oportunidade para otimização de energia. O processo Adsorções-Belebungsanlagen (também chamado “A/B” ou “Adsorção-Bio-oxidação”) usa um tempo de detenção curto no “Estágio A” para capturar no lodo produzido muito da energia do afluente, permitindo que ela seja direcionada aos digestores anaeróbios. Com tempo de detenção mais longo, o “Estágio B” é usado para remover carbono residual e alcançar as metas estabelecidas para nitrogênio no efluente final.

### **Biorreator de membrana (MBR)**

Os biorreatores de membranas (MBR) são processos biológicos com biomassa suspensa com separação de sólidos por meio de membranas de baixa pressão (microfiltração ou ultrafiltração). Os tipos mais comuns de membranas de separação são de fibra oca e de placa plana (que são instaladas imersas nos reatores) e as tubulares (que são instaladas em uma linha paralela – *sidestream*). As membranas de fibra oca possuem a maior relação área de filtração/volume ocupado, requerem a menor quantidade de energia e menor investimento para instalação (WEF, 2011). Os biorreatores também podem combinar zonas anaeróbias, anóxicas e aeróbias para a remoção de matéria carbonácea, nitrogênio e fósforo.

Comparando o MBR com processos que utilizam decantadores secundários, há diferenças na concentração de biomassa, configuração do processo, uso de energia e na qualidade do efluente. O efluente filtrado pela membrana contém concentrações insignificantes de sólidos suspensos e bactérias.

Os biorreatores de membranas podem operar a concentrações de biomassa muito maiores comparadas a decantadores secundários, impactando na redução da área requerida para o tratamento secundário. Em sistemas MBR, de acordo com a especificação da membrana a ser utilizada para separação de sólidos, recomenda-se concentração de SSTA (Sólidos Suspensos no Tanque de Aeração) no reator entre 8.000 e 12.000 mg/L. Valores de SSTA de até 30.000 mg/L podem ser usados, porém atingem uma limitação prática na quantidade e frequência de limpezas químicas que devem ser realizadas nas membranas, com eventual redução de vida útil e maior tempo de parada da operação.

Os arranjos de operação de um sistema MBR variam em relação à alimentação e a recirculação do licor misto dos tanques de membranas para os biorreatores:

- “*pump from*” (bombear de): a alimentação dos tanques de membrana é feita por gravidade e a recirculação de licor misto é bombeada. Recomenda-se que haja uma bomba de recirculação do licor misto para cada tanque de membrana;
- “*pump to*” (bombear para): a alimentação dos tanques de membrana é bombeada e a recirculação do licor misto feita por gravidade. É possível utilizar uma única elevatória com unidades de bombeamento de maior capacidade unitária, facilitando assim a operação, diminuindo o número de unidades e minimizando sensivelmente o espaço requerido em layout.

A razão de recirculação do licor misto dos tanques de membranas para os biorreatores impacta diretamente a concentração de SSTA no sistema de MBR. A razão de recirculação relaciona a vazão de retorno de lodo ativado dos tanques de membrana à vazão afluente aos biorreatores. Em sistemas MBR a razão de recirculação recomendada é entre 300 a 500% (WEF, 2011).

Quanto maior a razão de recirculação, mais elevada se torna a concentração de SSTA nos biorreatores, sem aumento da concentração nos tanques de membrana, otimizando-se assim a biomassa ativa (maiores taxas de reação). O benefício do aumento da razão de recirculação deve ser balanceado pelo aumento do custo operacional (OPEX), devido a maior capacidade de bombeamento necessária para as vazões e maior demanda de aeração, pois quanto maior o teor de sólidos nos reatores, maior será a viscosidade, o que diminui a eficiência na transferência de oxigênio. Além disso, a utilização de razão de recirculação muito elevada também acarretará um aumento sensível no custo de investimento (CAPEX), devido à necessidade de instalação de equipamentos e condutos de maior capacidade, tais como bombas, sopradores, canais e tubulações para recirculação.

Além da concentração de SSTA, a idade do lodo afeta diretamente as reações cinéticas que ocorrem no processo biológico. Atualmente, recomenda-se idade do lodo na ordem de 12 dias para os processos MBR, sendo que a utilização de valores inferiores a esse pode resultar em elevadas concentrações de compostos



causadores de *fouling* (depósito) nas membranas. Como consequência, haveria um aumento mais rápido da pressão transmembrana (PTM), elevando a necessidade de limpezas físicas e químicas periódicas, além de retrolavagem, para reestabelecimento das taxas de filtração, similar ao que ocorre no caso da operação com concentrações de SSTA acima da faixa recomendada.

Para assegurar o funcionamento adequado das membranas, os fornecedores recomendam a limpeza química periódica das mesmas. Há dois tipos de limpeza recomendados: a limpeza de manutenção, feita com maior frequência, e a limpeza de recuperação, mais intensa, e realizada com uma periodicidade de duas a três vezes por ano. A limpeza é feita *in situ*, no próprio tanque de membranas, utilizando o próprio permeado para preparo da solução de limpeza.

Para a limpeza química, é prevista a aplicação de hipoclorito de sódio e ácido cítrico. A solução de hipoclorito de sódio é utilizada para o controle microbiológico, enquanto o ácido cítrico é utilizado para o controle de depósitos de carbonato de cálcio. A frequência da limpeza com ácido cítrico estará associada às características do esgoto.

Além das limpezas químicas para o reestabelecimento das taxas de filtração, os sistemas MBR requerem a retrolavagem das membranas filtrantes. Esta operação pode ser feita por inversão do fluxo da mesma bomba de permeado, ou através de uma bomba dedicada a essa função.

### **Lodo Ativado Granular**

Em um sistema de lodo ativado granular, a biomassa cresce em forma de grânulos suspensos, agregando diferentes tipos de microrganismos. Desta forma, é possível obter, em um mesmo reator, a remoção de matéria carbonácea, nitrificação e desnitrificação e a remoção biológica de fósforo. O resultado é a menor área requerida para a sua implantação, bem como grande economia energética do sistema.

### **Processos com Biofilmes**

No processo com biofilme, a biomassa cresce em um material transportador (tipicamente pedra ou plástico), que a retém dentro do processo. A biomassa em excesso é descartada quando a quantidade de biomassa exceder a capacidade do transportador. Um processo de separação de sólidos pode ser requerido para capturar a biomassa descartada, dependendo dos requisitos do efluente. Os processos com biofilme incluem os filtros biológicos percoladores (FBP), reatores biológicos de contato ou biodiscos (RBC), reatores biológicos de leito móvel (MBBR), biofiltros aerados submersos (BAS). Dentre os processos com biofilme, BASs e MBBRs são os mais compactos.

Os processos com biofilme também podem ser combinados em processos híbridos, cujos exemplos incluem o filtro percolador/lodos ativados (FBP/lodos ativados) e os lodos ativados integrado com biofilme em mídia (IFAS).

Os processos com biofilme podem ser utilizados para remoção de carbono ou carbono e nitrogênio, dependendo da configuração projetada, podendo ou não, no caso da remoção de nitrogênio, requerer adição de fonte externa de carbono.

### **Tratamento de Correntes Secundárias**

As correntes secundárias geradas nos tratamentos da fase líquida e da fase sólida carregam geralmente uma alta concentração de nutrientes (nitrogênio e fósforo). Quando retornadas ao processo, resultam em um aumento no tamanho das unidades e incremento no consumo de energia.

Adicionalmente, o tratamento de correntes secundárias pode agregar um grande potencial de recuperação de recursos em uma ETE modernizada, ao tratar o filtrado ou o centrado das unidades de desidratação para recuperação/remoção de nitrogênio ou fósforo.

- **Remoção de Nitrogênio em Correntes Secundárias**

O filtrado ou o centrado provenientes da desidratação dos lodos anaerobicamente digeridos contém altas concentrações de amônia e representam uma carga de 20 a 30% afluente à ETE. O tratamento separado desta



corrente secundária pode reduzir significativamente a carga de nitrogênio retornada ao processo biológico principal.

O aumento do uso da digestão anaeróbia, acoplado aos limites cada vez mais restritos de nitrogênio total e nitrogênio amoniacal nos efluentes das ETEs, tem levado ao desenvolvimento de tecnologia para o tratamento das correntes secundárias, ricas em nitrogênio. Pode-se mencionar o processo biológico que inclui a nitrificação e a desamonificação, cuja aplicação vem atraindo grande interesse, principalmente devido ao seu potencial de efetividade de custo, reduzidos requisitos de energia e benefícios ambientais totais.

- **Remoção/Recuperação de Fósforo**

No processo de tratamento de correntes secundárias, o fósforo (especificamente ortofosfato) pode ser precipitado e recuperado na forma de estruvita (fosfato de amônia de magnésio) ou fosfato de cálcio, um produto que apresenta valor de mercado como fertilizante. Existem várias opções tecnológicas para a recuperação de estruvita.

O fósforo na corrente secundária também pode ser reduzido pela adição de sais metálicos, como cloreto férrico ou alumina, antes da digestão e/ou desidratação.

A Tabela 1 resume os níveis de remoção que podem ser alcançados com base nas tecnologias existentes na indústria de tratamento de esgoto.

**Tabela 1: Qualidade do efluente para diferentes tecnologias**

Nível do tratamento	Sólidos Suspensos (mg/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	Amônia (mg NH <sub>3</sub> -N/L)	Nitrato + Nitrito (mg NO <sub>x</sub> -N/L)	N Total (mg N/L)	Fósforo (mg P/L)
Primário	50 a 100	100 a 150	N/A	N/A	N/A	N/A
Secundário	< 30	< 30	1 a 2	< 15	< 20	< 2
Secundário de alta qualidade	< 30	< 15	< 0,25	< 10, < 6, < 3	<10, < 6	< 0,75
Biorreator de membrana	< 1	< 2	< 0,25	< 10, < 6, < 3	<10, < 6	< 0,05
Biológico terciário	10 a 30	< 5	< 0,1	< 1	< 3	N/A
Químico terciário	< 10	< 5	N/A	N/A	N/A	< 0,1
Filtração	< 5	< 5	N/A	N/A	N/A	< 0,1
Membranas terciárias	< 1	< 2	N/A	N/A	N/A	< 0,02

Nota: Todos os valores são aproximados. Podem ocorrer variações significativas dependendo de uma ampla variedade de parâmetros do efluente e características operacionais

Analisando os resultados, observa-se que, dependendo da tecnologia adotada, a Estação de Tratamento de Esgoto pode ser planejada para produzir efluentes com diversas características. Além disso, destaca-se que diferentes qualidades do efluente podem ser alcançadas em diferentes pontos do tratamento dentro de uma mesma ETE.

Com relação à remoção de fósforo, a remoção biológica permite atingir valores da ordem de 1,0 mg/L no efluente. Dependendo do requerimento de qualidade do efluente, será necessário agregar um estágio complementar com remoção química. Para remoção química do fósforo, um sal metálico é adicionado ao tratamento secundário, onde o ortofosfato é absorvido na estrutura de hidróxido de metal resultante.

Ressalta-se que ao se elaborar o planejamento de modernização de uma ETE existente, além das orientações relacionadas à tecnologia de processo de tratamento e suas unidades constituintes, algumas premissas devem ser consideradas para o desenvolvimento do projeto:

- Condições de contorno referentes às características locais: restrições físicas de área de implantação e interferências com instalações existentes são críticas; bem como a ocorrência, em quantidade significativa, de unidades a desmontar ou demolir, assim como redes a serem remanejadas.



- Aspectos operacionais:
  - ✓ Durante a execução das obras de modernização, a planta estará em funcionamento, devendo ser restringidas perturbações aos regimes operacionais até que sejam completadas as intervenções.
  - ✓ Deverá haver variadas alterações das correntes de tratamento no decorrer da implementação das modernizações, resultando em condições e procedimentos operacionais também diferentes eventualmente para uma mesma unidade ao longo desse processo.
  - ✓ A concepção dos sistemas e a especificação dos equipamentos devem prever a simplicidade e durabilidade para que as unidades do sistema possam ter funcionamento com desempenho garantido sem estar sujeitas à excessiva degradação física.
  - ✓ Devem ser previstos acessos e circulação que possibilitem as atividades de operação, para monitoramento e manobra, bem como as de manutenção, considerando necessidades de remoção de elementos para inspeção, conserto e reposição.
  - ✓ O sistema proposto deve considerar a facilidade para a realização de manobras, quando necessário, sendo desejável que os processos e fluxos sejam regulados sem a necessidade de intervenção operacional sempre que possível, com o uso da automação ou mesmo por soluções hidráulicas ou físicas de outra natureza.
- Sequenciamento construtivo da modernização da planta: deve ser planejado considerando racionalidade em relação aos limites de construção de cada etapa, minimizando os transtornos e riscos gerados em cada período de obras. A execução de elementos estruturais e hidráulicos de transição devem ser previstos, para favorecer a execução de escavações e concretagens futuras, assim como abertura e fechamento de escoamentos para as etapas envolvidas nas intervenções.

Destaca-se ainda que uma das influências nos projetos de expansão e modernização de ETEs modernas, por todo o mundo, é a adoção de algumas características mais próximas às de sistemas industriais, em que se observa:

- Uso mais acentuado de tubulações e sistemas em instalação aérea, facilitando aspectos de execução e de operação/manutenção;
- Concepção de sistemas que, quando conveniente, não sejam baseados em estruturas em concreto, simplificando os processos de aquisição, instalação e mesmo de remodelagem quando necessário. Exemplos são os usos de tanques metálicos, montagens em skids mecânicos e plataformas metálicas ou de outros materiais, quando possível.

## CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo demonstram um grande avanço no desenvolvimento tecnológico do tratamento da fase líquida na indústria de tratamento de esgoto. É possível planejar a modernização das ETEs atendendo aos critérios de soluções inovadoras e flexíveis, minimização da área ocupada, melhor eficiência e confiabilidade do tratamento, eficiência energética e recuperação de recursos. Dependendo da tecnologia a ser adotada, a estação de tratamento de esgoto pode ser planejada para produzir efluentes com diversas qualidades, inclusive atendendo a padrões rigorosos, destacando-se ainda o potencial de recuperação de recursos no tratamento de correntes secundárias.

Os recentes avanços no desenvolvimento de novas tecnologias para tratamento, buscando a produção de efluentes de melhor qualidade, oferece uma gama de soluções que permite atender às diferentes demandas na modernização de uma instalação. Como estas tecnologias encontram-se em diferentes estágios de desenvolvimento e uso em larga escala, a sua aplicação deve ser ponderada em função do nível de desenvolvimento em que se encontram e do horizonte de planejamento.



Projetos de implantação a curto prazo devem considerar tecnologias consagradas, já aplicadas em plantas de porte similar. Para médio prazo, o planejamento deve incluir tecnologias ainda em estágios iniciais de adoção em escala industrial, mas que já deverão estar consolidadas por ocasião de sua aplicação.

O planejamento de longo prazo normalmente envolve o uso das tecnologias emergentes. Não se espera que estas tecnologias na verdade sejam aplicadas na etapa do planejamento, mas que sejam representativas em relação ao que pode ser utilizado no futuro.

Sendo assim, na elaboração do planejamento de modernização de uma ETE, os primeiros aspectos que deverão ser avaliados são os requerimentos relacionados à tecnologia de tratamento a ser adotada. Deve-se considerar a melhoria na eficiência e a confiabilidade do tratamento, ao mesmo tempo, minimizar a área ocupada e maximizar a sua flexibilidade para modernizações futuras.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a toda a equipe da Sabesp TEC responsável pela contratação do Plano de Modernização das Estações de Tratamento de Esgotos da Região Metropolitana de São Paulo - PLAMTE. Agradecemos também à Jacobs - CH2MHill, nossa consorciada na elaboração desse projeto. Um agradecimento especial à equipe da JNS Engenharia, Consultoria e Gerenciamento Ltda., pela dedicação e comprometimento no desenvolvimento desse trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. LEITHOLD, J., FERNANDES, C.V.S., KNAPIK, H.G., AZEVEDO, J.C.R. *Quali-quantitative characterization of organic matter in urbanized drainage basins as a basis for the application of Water Resources Management Instrument. Brazilian Journal of Water Resources*, v.22, e55, July 2017.
2. FANTIN, L.L.D, REIS, J.A.T., MENDONÇA, A.S.F. *Proposal of a methodology for pre-selection of sewage treatment systems within watershed. Brazilian Journal of Water Resource*, v.22, e12, October 2016.
3. REIS, J.A.T, VALORY, J.L.P., MENDONÇA, A.S.F. *Seleção de eficiências de tratamento de esgotos a partir da manutenção de equidade entre sistemas de tratamento - uma abordagem para o gerenciamento de bacia. Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.20, n.4, p. 862-871, agosto 2015.
4. BUZZELLA, M.M., RAMIN, M.G., ANTUNES, A.C.G., GUIMARÃES, P.P.O., LEIFERT, S. *Avaliação do Impacto de Diferentes Alternativas de Tratamento de Esgoto na Qualidade da Água do Rio Tietê. Anais do Congresso ABES*, 2017.
5. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA). Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Resolução n. 357, de 17 de março de 2005. DOU n. 053, de 18 de março de 2005, p. 58-63.
6. SÃO PAULO (Estado). Decreto n. 10.755, de 22 de novembro de 1977. Dispõe sobre o enquadramento dos corpos de água receptores na classificação prevista no Decreto n. 8.468, de 8 de setembro de 1976 e dá providências correlatas. DOE n. 221, de 23 de novembro de 1977, p. 1-4.
7. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA). Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Resolução n. 430, de 13 de maio de 2011. DOU n. 092, de 16 de maio de 2011, p. 89.
8. GOLDSTEIN, N. *Codigestion at Water Resource Recovery Facilities. BioCycle*, v.59, n.3, p. 36, March/April 2018.
9. Water Environment Federation (WEF). *Membrane bioreactors, WEF Manual of Practice*, No. 36, 2011.
10. JUDD, S. *The MBR Book. Principles and Applications of Membrane Bioreactors*, in *Water and Wastewater Treatment*, Elsevier, 2006.
11. METCALF & EDDY. *Tratamento de Efluentes e recuperação de recursos*; tradução: Ivanildo Hespanhol, José Carlos Mierzwa. 5 Ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.