ESTUDO DE CASO DO PROJETO DE AMPLIAÇÃO DA ETE BARUERI: TECNOLOGIAS INTENSIVAS NA FASE LÍQUIDA

Marcelo Kenji Miki [(1)]
Consultor em Tratamento de Esgoto. Engenheiro Civil e Mestre pela Escola Politécnica da USP.
Bruno Piotto Hespanhol [(2)]
Gerente de Departamento de Projetos de Tratamento/EPT, Sabesp
Rosane Ebert Miki [(3)]
Engenheira do Departamento de Projetos de Tratamento/EPT, Sabesp
Fabrício Bonadias da Silva [(4)]
Engenheiro do Departamento de Projetos de Tratamento/EPT, Sabesp
Lucas Fonseca Sobral [(5)]
Engenheiro do Departamento de Projetos de Tratamento/EPT, Sabesp

Endereço [(1)]: Sabesp, Av. Santos Dumont, nº 555 - São Paulo – SP - CEP: 01101-000 – Brasil - e-mail: mmiki@mikisan.com.br

RESUMO

O projeto de ampliação da ETE Barueri trouxe desafios na seleção da rota tecnológica de tratamento da fase líquida devido a limitação de área disponível para implantação de novas unidades, bem como do uso das unidades existentes. Em função da constatação de gargalos hidráulicos e de processos, fez-se necessária a prospecção de tecnologias intensivas de processo que tivessem aderência ao contexto da ETE Barueri. Para o módulo novo de expansão, correspondente a ½ módulo do sistema existente, composto por 2 módulos, adotou-se o Processo A/B através da tecnologia Triple A, como processo A (alternativa ao decantador primário), fazendo o redirecionamento do Carbono para produção de biogás nos digestores e aliviando o processo B de oxidação biológica no Tanque de aeração. Neste, adotou-se o sistema de controle da aeração através do AvN – Amônia vs Nitrato com aeração intermitente, possibilitando uma nitrificação e desnitrificação balanceada. No sistema de lodo ativado com seletor biológico, fez-se uso da tecnologia de densificação do lodo através de hidrociclones InDense para melhoria e controle das características de sedimentação do lodo secundário. A seleção das rotas considerou aspectos técnicos, de eficiência dos processos e tecnologias e custos de implantação (Capex) e operação (Opex).

PALAVRAS-CHAVE: tratamento de esgoto, inovação tecnológica, economia circular.

INTRODUÇÃO

A ETE Barueri, inaugurada em 1988, é a maior estação do Sistema Integrado de Tratamento de Esgoto da RMSP - Região Metropolitana de São Paulo, com população de 20 milhões de habitantes, conforme o Censo do IBGE de 2022.A última ampliação ocorreu em 2018 para atender a capacidade de projeto de 16 m^3/s na fase líquida. Em função do aumento da demanda de tratamento para atendimento das metas de Universalização do Saneamento, iniciou-se o Estudo de Ampliação para a vazão de 22,5 m^3/s (população equivalente de atendimento de mais de 10 milhões de habitantes). Dentre os desafios, para ampliação da ETE, estava a limitada disponibilidade de área para instalação das novas unidades.
Fez-se necessário a busca do uso de tecnologias intensivas de tratamento de esgoto, de modo a atender aos requisitos de aumento de vazão, bem como das metas de padrões de qualidade final de tratamento.

1 OBJETIVO

O objetivo do trabalho é mostrar um descritivo das premissas e hipóteses adotadas no projeto de ampliação da ETE Barueri para 22,5 m^3/s e a alternativa final escolhida com o uso de inovação tecnológica de processos intensivos de tratamento de esgoto.

2 HISTÓRICO

A Concepção original da ETE Barueri inaugurada em 1988 teve enfoque na remoção de Carga Orgânica, através de processo de lodo ativado com baixa idade de lodo e sem meta de remoção de N. Assim, não foi prevista a instalação dos processos de Nitrificação e Desnitrificação e os volumes dos tanques de aeração possuem tempos de detenção relativamente curtos, não permitem uma desnitrificação completa no estágio atual tecnológico.

2.1 METAS DE LANÇAMENTO

Na Licitação de Contratação Integrada em 2024, as metas de tratamento estabelecidas para as ETEs Barueri, São Miguel e Parque Novo Mundo eram:

- concentração média mensal de DBO ≤ 30 mg/L;
- concentração média mensal de Fósforo Total ≤ 1 mg/L;
- concentração média mensal de Nitrogênio Amoniacal ≤ 2 mg/L

Para a ETE Parque Novo Mundo foi dado o prosseguimento da contratação integrada das licitações realizadas em 2024, cuja alternativa escolhida foi de lodo aeróbio granular/ Nereda®, sem Fase Sólida de Tratamento e descarte para o lodo duto com destino para a ETE Barueri.

2.1.1 AVALIAÇÃO DAS ROTAS TECNOLÓGICAS: PREMISSAS E CRITÉRIOS

A avaliação integrada das rotas tecnológicas considerou:

- Qualidade do efluente tratado.
- Área disponível para ampliação.
- Custos de implantação (CAPEX).
- Custos operacionais (OPEX), como atendimento do limite regulatório;
- Cálculo do valor presente líquido (VPL), considerando período de concessão dos serviços (até 2060), taxa de desconto de 11,91% e recuperação de parte do investimento para incorporação na tarifa.
- Limitação do custo.

Para escolhas das rotas tecnológicas, foram avaliadas tecnologias convencionais e inovadores prospectadas, com foco na intensificação dos processos de tratamento e balanços de energia mais favoráveis, seja pelo menor consumo de energia elétrica, seja pelo direcionamento do carbono para aumento da produção de biogás, bem como de otimização de produtos químicos.

A decisão da rota tecnológica foi baseada em avaliação técnica, considerando comprovação de do desempenho das tecnologias, quantidade de plantas operacionais, prospecção em algumas destas plantas para constar condições operacionais e de manutenção, além das condições de pós-venda das principais tecnologias, com disponibilidade de atendimento no Brasil.

Na fase de estudo de alternativas, a Sabesp juntamente com as projetistas, elaborou um projeto preliminar de cada alternativa e consultou os fornecedores das tecnologias para discutir as soluções e o custo de cada tecnologia. Com base nos projetos preliminares e informações técnicas e financeiras de fornecedores e da Sabesp.

Em termos econômico-financeiros, as tecnologias foram avaliadas considerando o TOTEX mais favorável, ou seja, o efeito conjunto dos custos de investimento (CAPEX) e operacionais (OPEX). As rotas tecnológicas com balanços de energia mais favoráveis, seja pelo menor consumo de energia elétrica, seja pelo direcionamento do carbono para aumento da produção de biogás, que pode gerar energia e com menor demanda por produtos químicos (polímeros), apresentam menor OPEX.2.2. A situação atual da ETE Barueri está ilustrada na Figura 2.1.

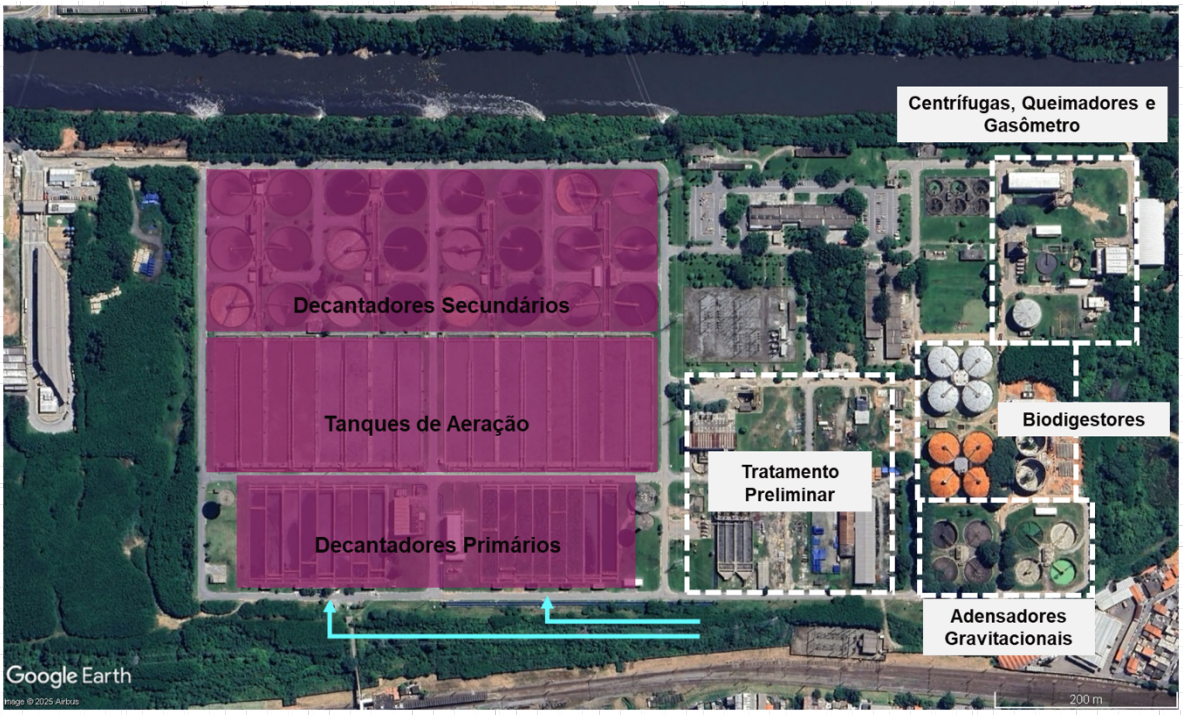


Figura 2.1: Configuração atual da ETE Barueri
Fonte: Sabesp

Número de Módulos: 2 Módulos, M1 e M2

Decantadores Primários

- número de unidades: 16;
- dimensões de cada unidade: 18m x 95m x 3,5m;
- volume unitário: 5.895 m^3;
- volume total: 95.760 m^3;

Tanques de Aeração

- número de unidades: 16;
- dimensões de cada unidade: 25,5m x 130m x 6,0m, para regime de reator de mistura completa;
- volume unitário: 19.890 m^3;
- volume total: 95.318.240 m^3;

Decantadores Secundários

- número de unidades: 24;
- diâmetro: 46 m;
- área unitária: 1.662 m^2
- H = 3,5 m;
- Área total = 39.888 m^2;

Arranjo do Sistema de Lodo Ativado (1/2 Módulo)

O arranjo do sistema de Lodo Ativado está ilustrado na figura 2.2.

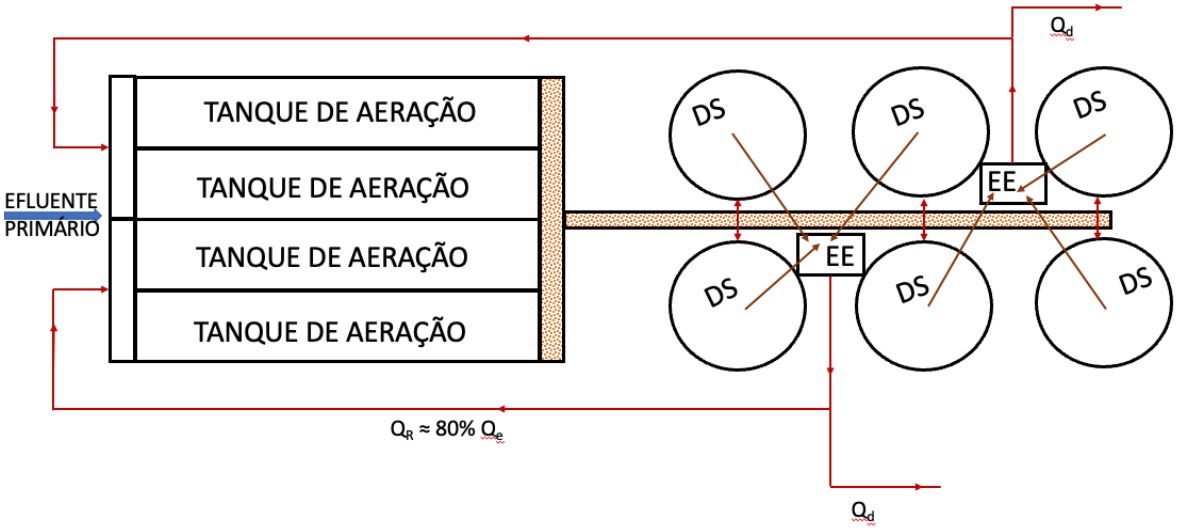


Figura 2.2: Arranjo do sistema de Lodo Ativado da ETE Barueri (1/2 módulo)
Fonte: Autor

O Efluente do Decantador Primário é encaminhado para o Módulo de Lodo Ativado, composto de 4 tanques de aeração, 6 Decantadores Secundários e 2 Estações Elevatórias de Retorno de Lodo biológico.
O efluente conjunto de 4 tanques de aeração são encaminhados para um canal de alimentação para o conjunto de 6 decantadores secundários. Para cada conjunto de 3 Decantadores Secundários está associado a uma Estação Elevatória de Retorno de Lodo. Na Estação Elevatória de Retorno de Lodo fica instalada a linha de descarte de excesso de lodo, que é encaminhado para as centrífugas de adensamento mecânico.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Processos A-B

O processo de lodo ativado no tratamento de esgoto é utilizado extensivamente no mundo e um dos grandes desafios impostos desta tecnologia é torná-lo menos demandante de energia.
Uma das estratégias de se aumentar a eficiência energética global de uma ETE é através da utilização dos Processos A-B, onde o Estágio A é projetado para captura direta ou conversão da DQO para produção de metano através da digestão anaeróbia, sem a produção de excesso de lodo e o Estágio B é dimensionado para remoção de nitrogênio, abrindo caminho para que as ETEs possam se tornar produtoras de energia, ao invés de consumidoras.
Há algumas décadas foi desenvolvido o processo A denominado CEPT – *Chemically Enhanced Primary Treatment,* que seria um tratamento primário avançado com aumento de remoção de sólidos inorgânicos e orgânicos através da adição de coagulantes químicos, como sais férricos e polímero. No entanto este tipo de tratamento não alcançou a popularidade inicialmente esperada nas ETEs devido ao alto custo de produtos químicos e aumento na quantidade de lodo gerado.
No Brasil, pode-se afirmar que o UASB seria um Processo A pois direciona a DQO para a produção de biogás, podendo ser acoplado com um Processo B de lodo ativado para complementação da oxidação biológica. Como no UASB há a remoção da DQO rapidamente degradável, normalmente faz-se um by-pass do esgoto bruto de forma a complementar o tratamento no sistema de lodo ativado.

3.1.1 HRAS/High Rate Activated Sludge - Lodo Ativado de Alta Taxa

A tecnologia HRAS propõe-se a oferecer um tecnologia para maximizar a captura de particulados e DQO coloidal e solúvel do esgoto, através da biossorção e bioacumulação, com mínima hidrólise e mineralização. Para este propósito, são adotadas condições de baixa tempo de detenção hidráulico, baixa idade do lodo e baixa oxigenação. O lodo resultante deste processo é um lodo "jovem", mais digerível que um lodo biológico de descarte do processo convencional de lodo ativado e, portanto, com expectativa de maior taxa de recuperação de energia através da digestão anaeróbia.
Os processos HRSAS são dimensionados com base em duas configurações: adsorção/biooxidação e estabilização de contato, conforme **figura 3.1**. Normalmente o estágio de adsorção é alimentado com uma alta

carga orgânica e operado com um baixo tempo de detenção hidráulico e baixa idade do lodo. Sob estas condições, a matéria orgânica é removida primariamente através de adsorção através dos flocos de lodo ativado ao invés de assimilação e mineralização microbiológica.

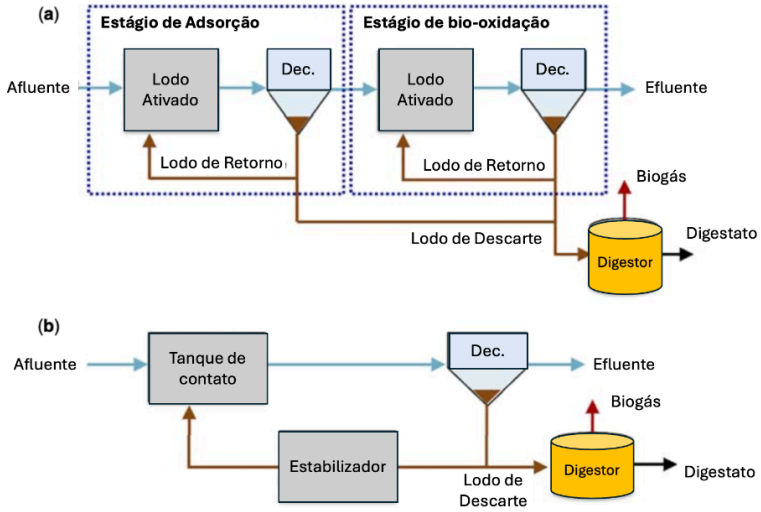


Figura 3.1: Representações esquemáticas de processos típicos HRAS. (a) process de adsorção/bio-oxidação e (b) processo de estabilização de contato.
Fonte: Liu et al (2020)

O processo de estabilização de contato é realizado através na mistura do lodo ativado no tanque de contato num certo período e limitada concentração de oxigênio dissolvido, onde a DQO é removida principalmente através da adsorção biológica e estocagem em condições dinâmicas no tanque de contato.
Sob condições alternadas de alta e baixa relação F/M Food/Microrganism (A/M, Alimento/Microrganismo), o lodo tem maior capacidade de adsorção de DQO e estocagem no tanque de estabilização.
De forma geral, um processo HRAS pode capturar entre 55-65% da DQO de entrada, incluindo 30% da DQO solúvel, podendo até mesmo atingir um nível total de captura de 80%. Além disso, há uma remoção de 80-95% dos sólidos em suspensão/SS e uma pequena parte de nitrogênio também pode ser simultaneamente removida.
Normalmente, a energia elétrica recuperada através de biogás do digestor anaeróbio atende somente entre 50 a 60% da demanda energética total de uma ETE. De modo a amplificar este efeito, podem ser acopladas tecnologias de hidrólise do lodo de modo a possibilitar maior extração de energia e discutido em outro artigo.

3.1.2 Tecnologia Triple A

De forma a aprimorar o Decantador Primário e incorporar a filosofia do HRAS, foi desenvolvida a tecnologia Triple A, ou AAA/Alternating Activated Adsorption, com depósito de patente no Brasil BR112016027563-2 B1 e Internacional WO 2015/181270 A1, pelo Engenheiro Bernhard Wett da Austria.
WETT et al (2024), citam que o problema para a maioria dos Processos A é a limitada biofloculação e incapacidade de aprisionar, de forma apropriada, os organismos heterotróficos que contém nitrogênio no estado coloidal. Os sistemas de lodo ativado de alta taxa devem capturar partículas finas de DQO através da biossorção, que é bem relacionada com os EPS - *Extracellular Polymeric Substances*. Estes EPS assimilam adicionalmente nutrientes e DQO na forma de produtos de estocagem. O decantador do AAA usa um floco filtro de contato, que é um decantador de manto de lodo, para melhorar a captura de colóides através da alimentação de fundo, enquanto o efluente tratado escoa no topo através de um vertedor de nível constante.

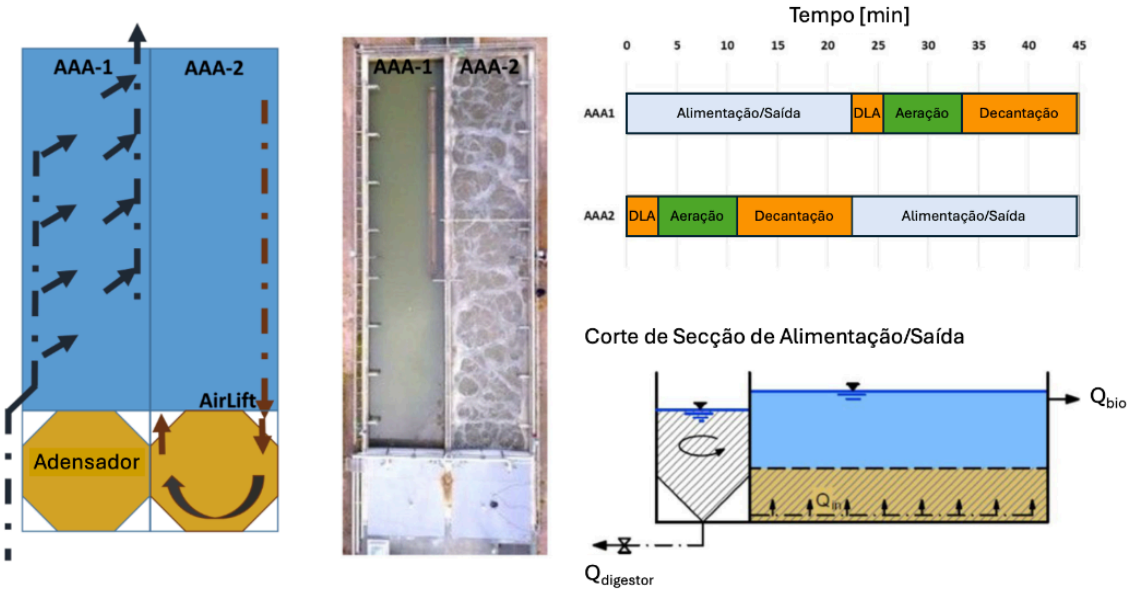


Figura 3.2: Visão superior de esquema de Processo AAA retangular com alimentação de fundo simultânea com saída de topo no ciclo do reator AAA1 e DLA - descarte de lodo ativado/Reação de Aeração e Decantação no reator AAA2 e corte de secção de alimentação/saída para uma dada programação do processo de ciclo
Fonte: WETT et al (2024).

Os modelos matemáticos existentes de lodo ativado foram normalmente desenvolvidos para descrever a remoção de DQO em idades do lodo superior a 3 dias e falham ao simular em baixas idades do lodo, como nos sistemas de HRAS (HAUDUC et al, 2019). Dentre os modelos matemáticos existentes o SUMO da Dynamita possui um módulo que incorpora a remoção de material coloidal, geração de EPS, floculação e estocagem intracelular, de modo a incorporar um maior alcance de estações com idades de lodo muito curtas.

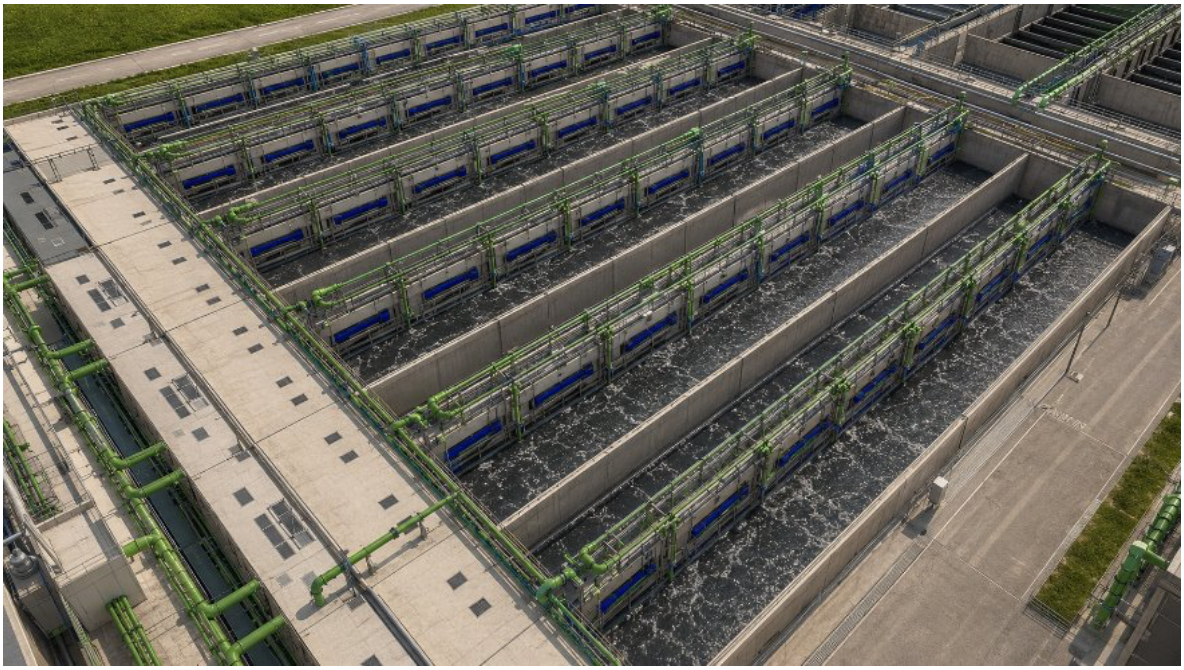


Figura 3.3: Reatores Triple A na ETE Barueri do Módulo M3
Fonte: Sabesp

3.2 Densificação de Lodo

Densificação nos sistemas de tratamento de esgoto é a incorporação simultânea de seletor biológico e seletor físico, possibilitando processos mais eficientes. A densificação é entendida como um produto intermediário em sistemas contínuos entre o lodo floculento e o lodo granular aeróbio, AGS/Aerobic Granular Sludge, que é gerado em sistemas de reatores batelada como o Nereda®, com fração de granulação superior a 70%. Um lodo densificado contem grânulos, mas em frações bem menores de biomassa e é operado de forma similar a um lodo ativado convencional, tipicamente em fração inferior a 40%. O grânulo de lodo é definido como um agregado de biofilmes com tamanho mínimo de 212 µm, sendo que uma das grandes vantagens é a velocidade de sedimentação do lodo biológico. (WRF, 2024).

3.2.1 Seletor biológico

O seletor biológico é o ponto chave para a formação do grânulo e sem esta etapa, os seletores físicos tem alcance limitado, pois a seleção biológica é o que controla a extensão do tamanho e densidade que os grânulos podem atingir. Portanto a densificação só ocorre na combinação da seleção biológica para a formação do grânulo e a sua seleção física para a sua retenção.

A seleção biológica é direcionada para organismos que sedimentam de forma mais rápida, que são aqueles que rapidamente retiram o excesso de substrato e realizam a estocagem intracelular (tais como os PAOs – *polyphosfate accumulating organisms* e os GAOs-*glycogen-accumulating organisms)* ou convertem em EPS – *Extracellular Polymeric Substances.* Estes produtos de estocagem aumentam a densidade dos organismos e portanto para uma sedimentação mais rápida.

As condições de altas concentrações de substrato requeridas para a seleção biológica são tipicamente obtidas através do estabelecimento de um seletor em frente ao processo de tratamento secundário. Os componentes para a seleção biológica são: projeto da zona seletora, relações relevantes de F/M – Food/Microorganism e condições de abundância-fome.

Um seletor pode ser anaeróbio, anóxico ou aeróbio. O ambiente redox para a zona seletora depende da configuração existente da ETE e as metas de remoção de nutrientes. Por exemplo, se a ETE tem a meta de remoção biológica de P, o seletor deve ser anaeróbio de modo a permitir o desprendimento de fósforo.

Há 2 requisitos que um seletor deve ter para favorecer o desenvolvimento de um lodo estável e de rápida sedimentação:

- **Altas concentrações de substrato:** isso favorece o crescimento de organismos que absorvem e armazenam facilmente substratos ,que não podem ser metabolizados imediatamente e, portanto, formam flocos densos.
- **Absorção completa ou quase completa do substrato**: a prevenção da dispersão do substrato para as zonas subsequentes é crucial para evitar o crescimento de organismos filamentosos que podem se beneficiar da baixa disponibilidade de substrato.e Absorçao completa (ou quase completa de substrato)

Para seletor anaeróbio ou anóxico recomenda-se uma realação F/M de 1,5 g DQO/g SST/d.

O efluente de um seletor deve ter idealmente uma DQOrb entre 15-30 mg/L de modo a prevenir o crescimento de organismos filamentosos mas também preservar as as condições de form para a seleção de partículas densas e estáveis. Nunca haverá a completa eliminação de DQOrb na zona de fome, já que a DQOlb ou DQO particulada que não estavam disponíveis imediatamente para os organismos no seletor serão hidrolisadas para formar a DQOrb.

Zona anaeróbias são preferencialmente utilizadas para seleção de PAOs, que são heterotróficos de estocagem de carbono responsáveis pelo bio-P. No entanto, pode haver outros organismos estocadores de carbono que não estão envolvidos no bio-P que podem contribuir para a sedimentação.

3.2.2 Seletor Físico

Enquanto os fatores de seleção biológica facilitam o crescimento do grânulo, seleção física é essencial para a retenção do grânulo. Em ETEs com remoção biológica de P há a formação de grânulos, mas como normalmente não há seletores, todas as partículas são igualmente descartadas. Por outro lado a seleção física sem a seleção biológica não é ideal para a máxima melhoria de desempenho. As particulas mais densas que existem no sistema podems ser seletivamente selecionadas. Isto pode melhorar o IVL, no entanto sem a indução de crescimento de partículas de maior densidade a extensão de melhoria de sedimentabilidade pode ser limitada.

Os seletores físicos pode se focar tanto em tamanho como em densidade. As peneiras retem as partículas de dimensões maiores que o poro, enquanto que os hidrociclones focam nas diferenças de densidade e descarta as partículas mais leves, indepente do tamanho. Apesar de haver uma variedade de configurações e métodos

utilizados para a seleção física em laboratório ou escala piloto, tais como peneiras, reatores de airlift, decantadores de multi zona, apenas os hidrociclones foram demonstrados em escala plena para sistemas contínuos (Regmi et al., 2023).
A tecnologia de hidrociclone para uso em sistema de lodo ativado é patenteada e recebe o nome de InDense, com registro no Brasil de nº BR 112016030233-8 A2, 2017. O InDense é uma tecnologia de seleção gravimétrica que proporciona um método para reter a biomassa mais densa e descarta fração mais leve de SST do sistema de tratamento biológico. O aumento de densidade proporciona um lodo com melhor sedimentabilidade que permite a prevenção de perda de biomassa.

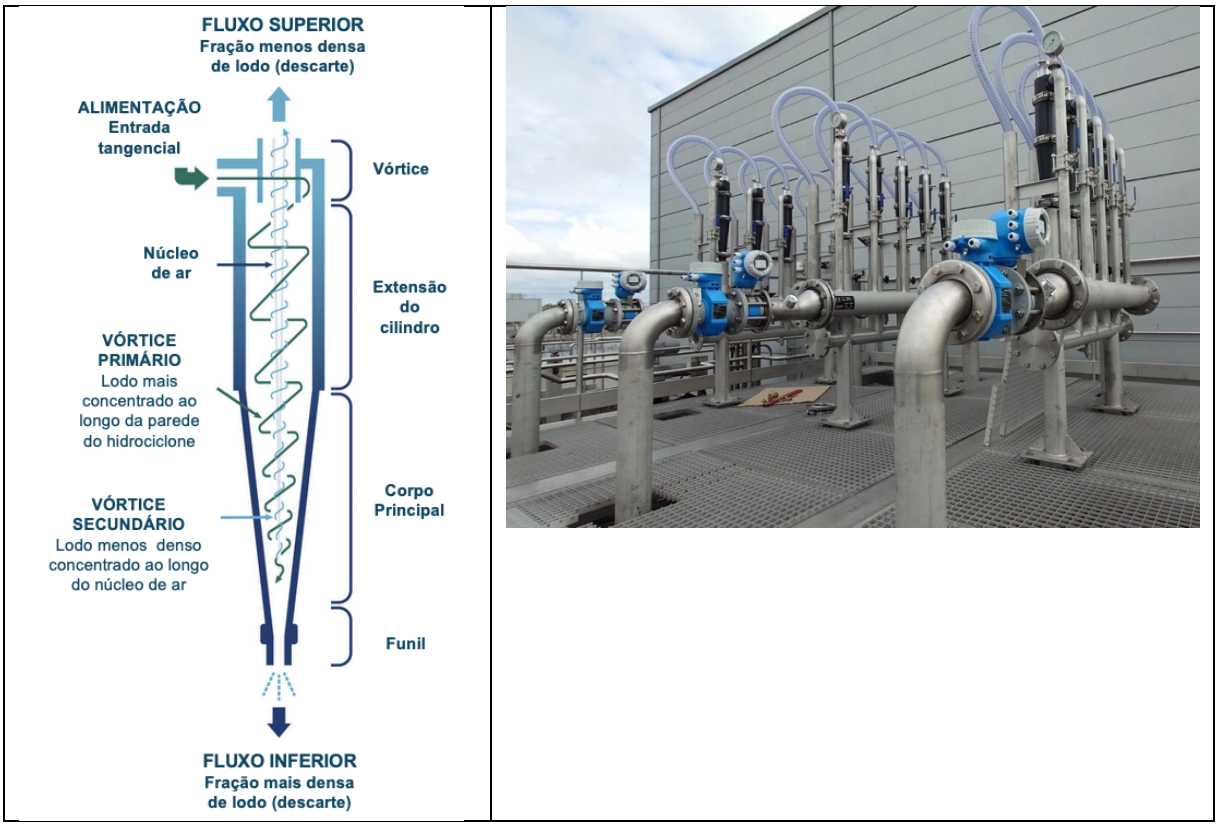


Figura 3.4 Hidrociclone InDense
Fonte: ARA Consult

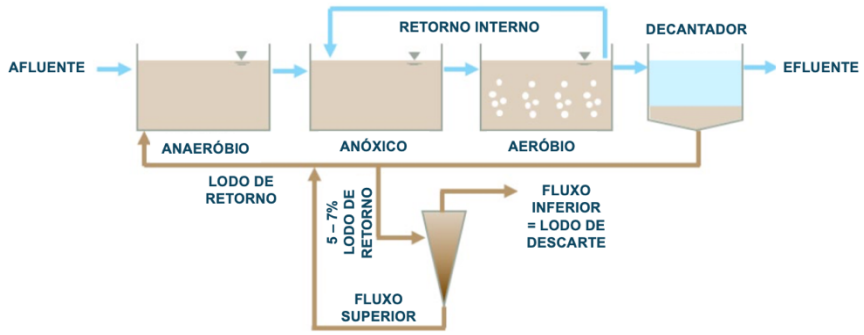


Figura 3.5: Exemplo de representação esquemática de um sistema contínui com hidrociclone alimentado com lodo de retorno
Fonte: WRF, 2024

ROCHE et al (2021) relataram um teste em escala plena na ETE de Dijon na França (população equivalente de 100.000 pessoas). A biomassa densificada inicialmente produziu um lodo com IVL < 100 mL/g por um período de 4 meses e em seguida por um ano em regime constante com IVL < 100 mL/g, incluindo o período crítico de inverno. Do ponto de vista prático, concluiu-se: a) o controle das proporções grânulo-floco permite um ajuste operacional do IVL, permitindo uma maior precisão no projeto do decantador. b) um terço de grânulos aumenta drasticamente as características de sedimentação: de 20% a 35% de grânulos aeróbios proporcionam respectivamente IVLs de 100 a 50 mL/g, respectivamente. c) a biomassa densificada proporciona novas práticas operacionais e de projeto para a idade de lodo e taxas de aplicação no decantador, podendo duplicar a taxa de aplicação superficial de sólidos de 6,0 - 8,5 para 15 -20 kg m^{-2} h^{-1} e taxas de aplicação superficial de 0,6 – 0,8 para 1,5 – 2,4 m/h, e desacoplar a idade do lodo na proporção de 1:4 entre o floco e o grânulo, possibilitando uma nicho de ambiente específico para organismos de crescimento rápido e lento.
A Tabela 3.1 faz uma comparação entre parâmetros operacionais e de projeto para sistemas de lodo ativado convencional e lodo densificado.

Tabela 3.1: Comparação de limites operacionais e de projeto entre Lodo Ativado Convencional e Lodo densificado

		Lodo Ativado Convencional no Inverno no estudo	**Limite de Projeto Lodo Ativado (ATV 2000)**	**Biomassa densificada no Inverno no estudo**	**Possíveis Diretrizes de Projeto com biomassa densificada**
IVL diluído	(mL/g)	200-250	150	45	60-75
SSTA	(g/L)	3,5	3,5	3,5	3,5 – 5,5
Velocidade mínima observada de sedimentação do lodo em teste em batelada no estudo	(m/h)	1,4	-	5,9	-
Máxima Taxa de Aplicação superficial conforme ATV -> QsV/(IVL d*SST)	(m/h)	0,57 – 0,71	0,95	3,17[a]	1,5 – 2,4[a]
Mínimo valor observado de Taxa de aplicação de sólidos do teste em batelada	($kg.m^{-2}.h^{-1}$)	4,3	-	20,1	-
Máxima Taxa de aplicação de sólidos de Projeto	($kg.m^{-2}.h^{-1}$)	-	6,0 – 8,5	-	12,0 – 15,0
Altura do Manto de Lodo calculada pela ATV ($h_1+h_2+h_3+h_4$)	(m)	5,3	3,0	1,3	2,0
Concentração máxima do lodo de retorno 2m em 2h conforme ATV	(g/L)	6,3	8,4	28,0	16,8
Taxa mínima praticável de vazão de retorno de lodo do decantador	(%)	125%	71%	14%	26%
Vazão última de evento de águas pluviais sem mudança da área do decantador	(m^3/h)	1517	2023	6743	4036

Fonte: ROCHE et al (2021)

Os hidrociclones InDense são unidades padronizadas montadas em estruturas com múltiplos hidrociclones, com capacidade unitária de 10 m^3/h e pressão de 2.4 bar. O bico de saída com diâmetro de 18 mm proporciona como regra operacional prática de desempenho, uma divisão de vazão e massa do fluxo superior/inferior na faixa de 80%/20% e 60%/40%, e com os parâmetros desejados de idade do lodo e concentração do lodo de descarte, pode-se dimensionar o número de unidades requeridas. Outros tamanhos de bicos variam de 15 a 25 mm, e mudam as razões de divisão de vazão e massa do fluxo superior/fluxo inferior.



Figura 3.6: Representação de Skids de InDense no M3 na ETE
Fonte: Sabesp

3.3 AvN

O AvN é um método e aparato para maximizar a remoção de Nitrogênio do Esgoto, com patente US 9,352,990 B2/2016, de propriedade da DC Water & Sewer Authority e Hampton Roads Sanitation District.

A origem do nome do controlador AvN vem de Amônia vs Nitrato. Em termos de automação, a malha de controle num sistema convencional de lodo ativado é através da concentração de OD-Oxigênio Dissolvido no Tanque Aeração com a quantidade de injetada. Já no AvN, deve ser incorporado as medidas online de amônia e nitrato para o controle da aeração.

A principal função do controle AvN é otimizar as frações volumétricas anóxicas e aeróbias, de modo a atingir a menor concentração possível de Nitrogênio total para um dado sistema e características do efluente. Isto pode ser conseguido através da variação de frequência e duração da aeração intermitente (baseado na flutuação dos períodos aeróbios e anóxicos) ou variando a concentração de OD para sistemas de aeração constantes (baseado na flutuação da concentração de OD). O ponto de ajuste do AvN é a relação das concentrações de amônia e NOx e normalmente é ajustado para o valor igual a 1, mas pode ser reduzido (por exemplo em 0,7 – 0,9) para se atingir concentrações menores de amônia caso necessário. A concentração de Nox pode ser tanto nitrato ou a combinação de nitrato/nitrito dependendo da tecnologia de sensor/analisador utilizado.

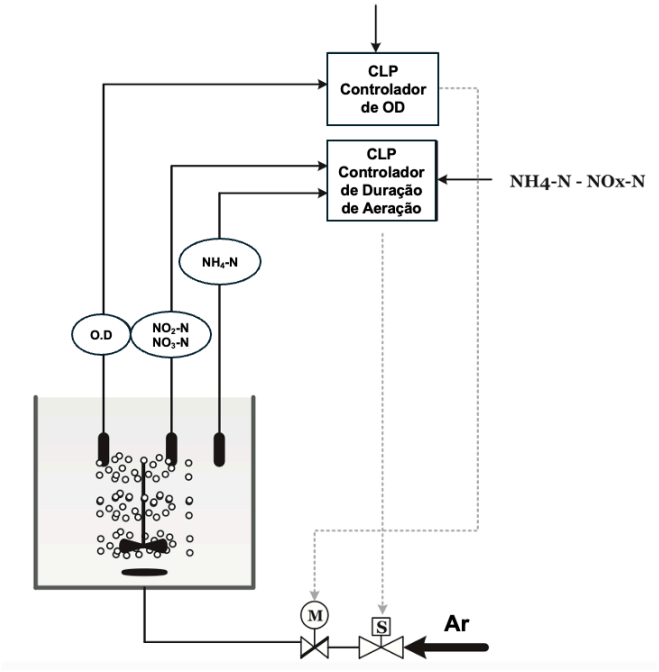


Figura 3.5: Controlador AvN representado por controlador de duração de aeração com entrada de sinais de NH_4+, NO_2^- e NO_3^- e controlador de OD
Fonte: Patente AvN

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 GARGALO HIDRÁULICO

Na condução do Projeto de Ampliação da ETE Barueri foi realizada a avaliação crítica da capacidade hidráulica do módulo de lodo ativado, sendo que os Módulos atuais **M1** e **M2** teriam uma capacidade total de **14 m³/s** (7 m³/s cada módulo). Assim, a capacidade original de projeto da ETE Barueri para os módulos M1 + M2 e ½ Módulo seria **17,5 m³/s,** ou seja, bem menor que a proposta de ampliação para 22,5 m³/s.
Considerando o uso do InDense, adotou-se como premissa uma taxa de recirculação de 40%, bem acima da mínima permitida de 26% e bem abaixo da taxa de 80% do lodo ativado convencional. O motivo desta redução da vazão de retorno é devido a uma maior concentração do lodo de retorno/descarte.
Adotando-se as seguintes premissas:

- Nível do canal de alimentação dos DS: 722,19 m
- Nível da caixa de alimentação dos DS (Após comporta): 722,01 m
- Nível máximo dos DSs: 721,85 m

A tabela 4.1 apresenta os resultados dos cálculos.

Tabela 4.1: Verificação da perda de carga na comporta de alimentação dos DSs

COMPORTA DE ALIMENTAÇÃO	
C_d	0,6400
h_1 (nível do canal)	722,1900
h_2 (nível da caixa)	722,0100
a (m)	1,2000
b (m)	1,2000
Q_{comp} (m³/s)	**1,7319**

Calculando a perda de carga nas tubulações do DS utilizando o software Watercad obtemos a vazão máxima por DS de 1742 L/s, conforme figura a seguir.

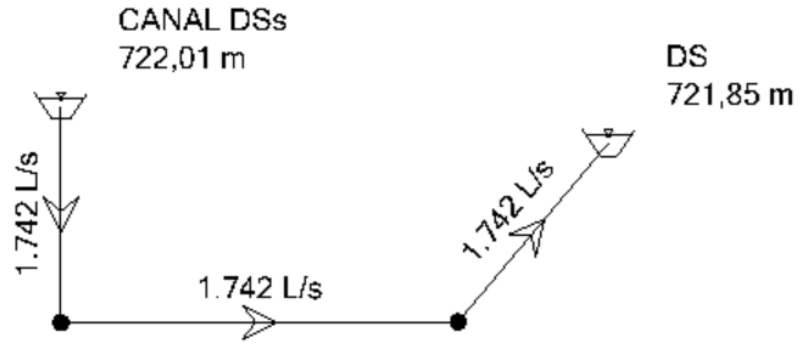


Figura 4.1: Simulação hidráulica no Watercad do Canal de alimentação aos Decantadores Secundários
Obs. DW-fórmula universal e perda de carga singular através de comprimento equivalente.

Para avaliação dos gargalos hidráulicos, foi a adotado o meio módulo do sistema de lodo ativado conforme figura, com 4 tanques de aeração e 6 decantadores. Foi estabelecida a vazão de **1,732 m³**/s como máxima possível por DS, considerando que os vertedores dos primários e tanques de aeração não estão afogados. Também foi considerado um decantador fora de operação por sistema de lodo ativado (1/2 módulo).

Tabela 4.2: Verificação hidráulica para ½ Módulo, razão de recirculação convencional de 80% e todos decantadores secundários em operação

Vazão Média (m³/s)	4,5	4,0	3,75
Taxa de Recirculação (%)	80%	80%	80%
Vazão de Pico (m³/s), f = 1,5	6,75	6	5,625
Vazão de Pico + Recirculação (m³/s)	12,15	10,8	10,125
Número de DS em funcionamento	6	6	6
Vazão por DS (m³/s)	2,025	1,8	1,6875
RESULTADO	**ERRO!**	**ERRO!**	**OK!**

Tabela 4.3: Verificação hidráulica para ½ Módulo, razão de recirculação convencional de 80% e um decantador secundário fora de operação

Vazão Média (m³/s)	4,5	4,0	3,75	3,5	3,25	3,0
Taxa de Recirculação (%)	80%	80%	80%	80%	80%	80%
Vazão de Pico (m³/s), f = 1,5	6,75	6	5,625	5,25	4,875	4,5
Vazão de Pico + Recirculação (m³/s)	12,15	10,8	10,125	9,45	8,775	8,1
Número de DS em funcionamento	5	5	5	5	5	5
Vazão por DS (m³/s)	2,43	2,16	2,025	1,89	1,755	1,62
Resultado	**ERRO!**	**ERRO!**	**ERRO!**	**ERRO!**	**ERRO!**	**OK!**

Tabela 4.4: Verificação hidráulica para ½ Módulo, razão de recirculação de 40% com hidrociclone e todos decantadores secundários em operação

Vazão Média (m³/s)	5,0	4,75
Taxa de Recirculação (%)	40%	40%
Vazão de Pico (m³/s), f = 1,5	7,5	7,125
Vazão de Pico + Recirculação (m³/s)	10,5	9,975
Número de DS em funcionamento	6	6
Vazão por DS (m³/s)	1,75	1,6625
Resultado	**ERRO!**	**OK!**

Tabela 4.5: Verificação hidráulica para ½ Módulo, razão de recirculação de 40% com hidrociclone e todos decantadores secundários em operação

Vazão Média (m^3/s)	4,5	4,0
Taxa de Recirculação (%)	40%	40%
Vazão de Pico (m^3/s), f = 1,5	6,75	6
Vazão de Pico + Recirculação (m^3/s)	9,45	8,4
Número de DS em funcionamento	5	5
Vazão por DS (m^3/s)	1,89	1,68
RESULTADO	**ERRO!**	**OK!**

Tabela 4.6: Verificação hidráulica para ½ Módulo, razão de recirculação de 40% com hidrociclone e um decantador secundário fora de operação

Vazão Média (m^3/s)	4,75	4,5
Taxa de Recirculação (%)	26%	26%
Vazão de Pico (m^3/s), f = 1,5	7,125	6,75
Vazão de Pico + Recirculação (m^3/s)	8,9775	8,505
Número de DS em funcionamento	5	5
Vazão por DS (m^3/s)	1,7955	1,701
RESULTADO	**ERRO!**	**OK!**

Conclusões da Capacidade Hidráulica Existente da ETE Barueri

- Em situação ideal com todos os decantadores secundários em operação, a ETE Barueri tem uma capacidade de **vazão média de 15 m^3/s** (4 x 3,75), através do método convencional com taxa de recirculação de 80% e fator de pico de 1,5, conforme Tabela 4.2. Considerando eventos de retirada de um decantador secundário por sistema de lodo ativado (1 em 6), a capacidade de **vazão média é** de **12 m^3/s** (4 x 3,0), através do método convencional com taxa de recirculação de 80% e fator de pico de 1,5, conforme Tabela 4.3.
- Já com o uso do hidrociclone é possível diminuir a taxa de recirculação devido a maior concentração de SST na vazão de retorno. Conforme ROCHE et al (2021), pode-se chegar numa taxa de recirculação de 26%. Para efeitos de projeto, adotando-se uma taxa de recirculação de 40%, foram calculados novos valores. Na situação ideal com todos os decantadores secundários em operação, com tecnologia de hidrociclone, taxa de recirculação de 40% e fator de pico de 1,5, a capacidade de **vazão média é de 19 m^3/s** (4 x 4,75), conforme Tabela 4.4. Considerando eventos de retirada de um decantador secundário por sistema de lodo ativado (1 em 6), a capacidade de **vazão média é** de **16 m^3/s** (4 x 4), taxa de recirculação de 40% e fator de pico de 1,5, conforme Tabela 4.3.
- Outro cenário que vale a pena ser estudado é naquela com retirada de um decantador secundário, taxa de recirculação de 26% e fator de pico de 1,5. Neste caso, a capacidade de **vazão média é de 18 m^3/s** (4,5 x 4) e **vazão de pico hidráulico de 27 m^3/s (6,75 x 4).** Complementarmente, considerando 15 decantadores primários em operação e mantendo-se a taxa de recirculação de 26% a jusante, verifica-se capacidade hidráulica de 27,75 m^3/s, ligeiramente superior à vazão de pico de 27 m^3/s, indicando compatibilidade hidráulica entre as unidades primárias e secundárias nessa condição operacional.

A constatação do gargalo hidráulico na ETE Barueri decorrente da alimentação do canal do DS para os decantadores secundários levou a eliminação da alternativa de uso do CEPT – *Chemically Enhanced Primary Treatment* com M_1 e M_2, que previa capacidade de vazão média de 18 m^3/s e novo módulo M_3 (equivalente a meio módulo do M_1 ou M_2) tratando 4,5 m^3/s de vazão média.

4.2 GARGALO DA ALCALINIDADE

Conforme VAN HANDEL & MARAIS, 1999, nas regiões tropicais e subtropicais o desenvolvimento parcial ou total do processo de nitrificação será inevitável durante pelo menos parte do ano (estação quente). Se o nitrato formado não for removido antes do licor misto chegar ao decantador final, então neste desenvolver-se-á a desnitrificação e causará perda de lodo e, consequentemente, um desempenho insatisfatório do sistema no que se refere à remoção de material orgânico, o que é justamente o objetivo do tratamento secundário. Portanto o tratamento terciário nas regiões de clima quente não é realmente opcional: a omissão de incluir a nitrificação

e desnitrificação no projeto tenderá a causar instabilidade operacional do sistema e uma eficiência insatisfatória dos tratamentos primário e secundário.

Durante a condução do projeto básico, detectou-se um outro gargalo no processo biológico. Em simulações de modelos matemáticos, detectou-se a necessidade de uma correção de pH no tanque de aeração devido ao consumo de alcalinidade devido ao processo de nitrificação, levando a uma demanda de alcalinizante não possível de ser atendida do ponto de vista operacional de aproximadamente 600 ton/dia de cal virgem. Uma das principais causas desta demanda de alcalinizante é a concentração alta de 80 mg/L de N Total. Este alto valor teve influência do lançamento de carga através do lodo duto do Parque Novo Mundo para a ETE Barueri.

Uma proposta levantada nas discussões foi a revisão da premissa de nitrificação e desnitrificação. Alegou-se que uma saída técnica seria trabalhar em baixa idade de lodo, de modo a evitar a nitrificação.

Do ponto de vista operacional, entende-se que a execução e controle deste tipo de operação é muito instável, pelo tempo de resposta envolvido no comando e controle.

De modo a contornar esta situação, foi avaliada a utilização do controlador AvN no tratamento biológico da ETE Barueri, com a meta de nitrificar somente o que fosse possível desnitrificar, dentro das limitações de volumes de processo. Através do monitoramento online com sondas de nitrato e nitrogênio amoniacal, seriam controlados os níveis de aeração. Entende-se que este tipo de automação tem uma resposta mais rápida e confiável que através do método da baixa idade do lodo. Nos países temperados, o fator limitante para a nitrificação é a baixa temperatura que ocorre no período de inverno. Já nos países tropicais, a nitrificação é inevitável devido a altas temperaturas. Estas diferentes situações de temperatura, bem como as metas de remoção de nitrogênio total ou amoniacal, podem levar a uma confusão na adoção de fatores de segurança dos parâmetros de projeto.

Através do Modelo SUMO/Dynamita checou-se o uso do AvN tanto no modo contínuo (flutuação do OD) como intermitente (flutuação de período).

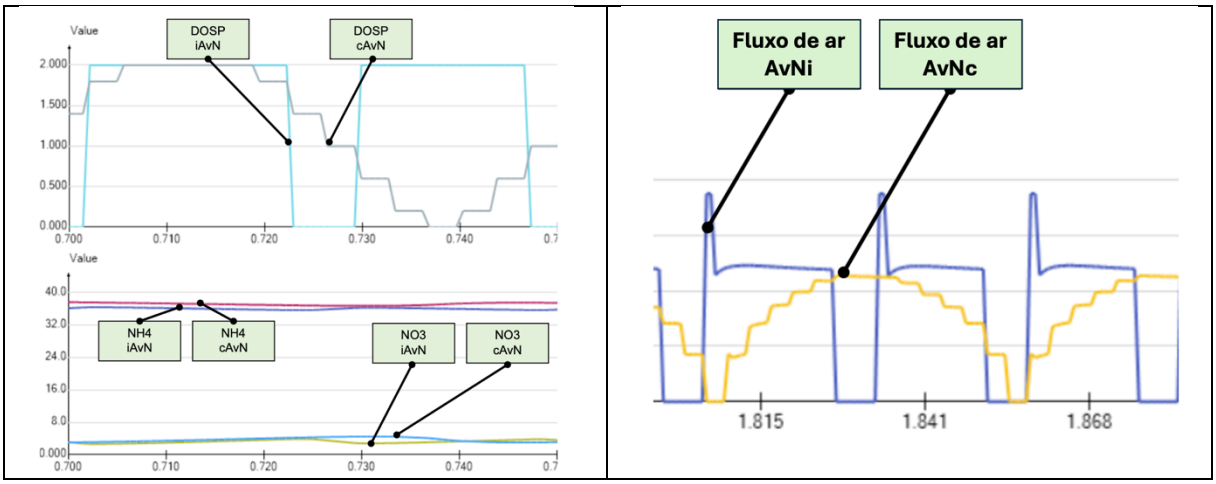


Figura 4.1: Gráficos de concentrações de NH_4, OD e fluxo de ar conforme o tempo
Fonte: ARA Consult

A aplicação do AvN em sistemas com meta de remoção de Nitrogênio Total, ou seja, com a remoção de nitrato e não somente de nitrogênio amoniacal, é interessante utilizar o AvN igual a 1 de modo a otimizar as remoções.

Para o caso da ETE Barueri, não há meta de remoção de nitrogênio. A adoção do uso do AvN permitiu uma nitrificação e desnitrificação balanceada, evitando o decaimento brusco da alcalinidade e a diminuição do pH, o que levaria a necessidade de introdução massiva de alcalinizantes. A adoção de valores de AvN maiores que 1 leva a uma recuperação da alcalinidade.

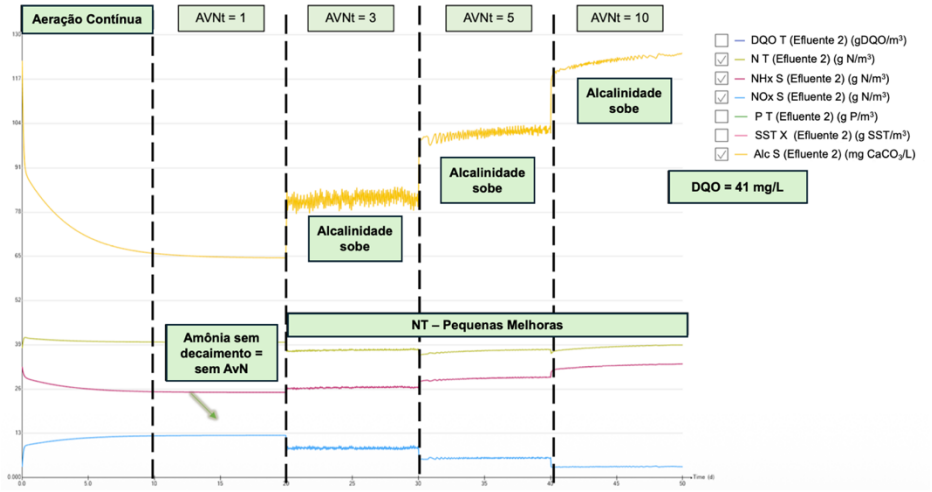


Figura 4.2: Gráficos da relação AvN com a Alcalinidade
Fonte: ARA Consult

4.3 CONFIGURAÇÃO DO TRIPLE A

4.3.1 OTIMIZAÇÃO DO CICLO DE AERAÇÃO DO TRIPLE A

Conforme observado no item da descrição do Triple A, a configuração normalmente utilizada é de 2 reatores, com os tempos de ciclo apresentados na Figura.

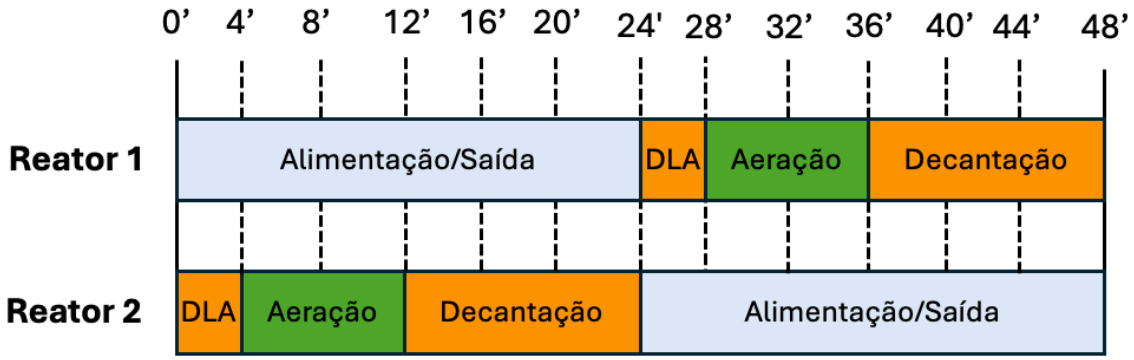


Figura 4.3: Tempos de ciclo típicos num Processo Triple A com dois reatores
Fonte: ARA Consult

Em sistemas de pequeno e médio porte, a ocorrência de sistemas com 2 reatores pode não representar problemas em termos de capacidade instalada de sopradores de ar. Já para sistemas de grande porte, utilizar um sistema de soprador por 16 minutos (para os dois reatores) em 48 minutos, aparenta ser muita potência instalada para utilização momentânea.
Foi estudada para a configuração de 6 reatores, ou 3 sistemas, uma configuração de uso de soprador mais distribuída, conforme figura. Observa-se que a fase aeração sempre ocorre e fica distribuída em seus 6 reatores dos 3 sistemas. Também não ocorre sobreposição de fase de aeração entre os reatores, não ocorrendo demanda de extra de ar decorrente de configuração.
Para o descarte de lodo ativado, normalmente para os sistemas convencionais de Triple A adota-se o mesmo soprador utilizado na aeração. Por decisão de projeto, decidiu-se utilizar um soprador dedicado para o descarte de lodo.

Reator/tempo (min)	1			2			3	
	1	2		3	4		5	6
4	Alimentação	Descarte		Decantação	Alimentação		Aeração	Alimentação
8	Alimentação	Aeração		Decantação	Alimentação		Decantação	Alimentação
12	Alimentação	Aeração		Alimentação	Descarte		Decantação	Alimentação
16	Alimentação	Decantação		Alimentação	Aeração		Decantação	Alimentação
20	Alimentação	Decantação		Alimentação	Aeração		Alimentação	Descarte
24	Alimentação	Decantação		Alimentação	Decantação		Alimentação	Aeração
28	Descarte	Alimentação		Alimentação	Decantação		Alimentação	Aeração
32	Aeração	Alimentação		Alimentação	Decantação		Alimentação	Decantação
36	Aeração	Alimentação		Descarte	Alimentação		Alimentação	Decantação
40	Decantação	Alimentação		Aeração	Alimentação		Alimentação	Decantação
44	Decantação	Alimentação		Aeração	Alimentação		Descarte	Alimentação
48	Decantação	Alimentação		Decantação	Alimentação		Aeração	Alimentação

Figura 4.4: Tempos de ciclo típicos num Processo Triple A com 6 reatores
Fonte: ARA Consult

4.3.2 TRIPLE A COM VAZÃO CONSTANTE DE PICO HIDRÁULICO

A avaliação da capacidade hidráulica da ETE Barueri mostrou que os 2 Módulos de Tratamento de Lodo Ativado, M_1 e M_2, suportam uma vazão média de 18 m^3/s com recirculação de 40% através do uso de hidrociclone InDense com todos os decantadores secundários em operação. Para a expansão da capacidade da ETE Barueri, previu-se a construção de mais meio módulo, denominado M_3, cuja meta inicial seria absorver uma vazão média de 4,5 m^3/s, com 80% de recirculação de lodo ativado e fator de pico hidráulico de 1,5. Após a constatação do gargalo hidráulico resolveu-se adotar outra configuração.
O Triple A tem como característica uma maior eficiência de captura de DQO para ser encaminhada para os Digestores Anaeróbios e consequentemente produzir mais energia através de biogás, bem como reduzir a carga orgânica para o sistema de lodo ativado. Do ponto de vista energético, há uma grande vantagem do uso dessa tecnologia em detrimento do uso do decantador primário. Para o caso da ETE Barueri, foi descartada a conversão dos Decantadores Primários existentes dos Módulos M_1 e M_2, devido a necessidade de grandes intervenções para a conversão em Triple A. Assim, procurou-se preservar as instalações existentes que foram submetidas a obras de melhoria, como instalações de pontes raspadoras e serviços de manutenção dos tanques.

Uma forma de fazer uso mais intensivo da tecnologia Triple A na ETE Barueri de forma a favorecer a produção de biogás foi adotar a configuração do Módulo M_3 para uma vazão constante de pico. Ou seja:

- vazão média de 22,5 m^3/s, com os módulos M_1 e M_2 absorvendo uma vazão média de 15,75 m^3/s e o módulo M_3 absorvendo uma vazão de pico constante de 6,75 m^3/s. Nestes casos, todos os módulos de lodo ativado ainda suportam as condições de pico e de recirculação mesmo com um decantador secundário fora de operação no sistema de lodo ativado.

Já para a vazão de pico total de 33,75 m^3/s, o módulo M_3 seria responsável por absorver 1/5 desta vazão. Já em situações de vazões abaixo da média, como por exemplo, no período da madrugada, com um exemplo de vazão de 75% da média, resultaria em 16,875 m^3/s, o M_3 seria responsável por 40% de tratamento da vazão afluente.

Nesta configuração, o M3 trabalharia em vazão de pico constante e todo o resto da vazão seria absorvida pelos módulos M_1 e M_2.

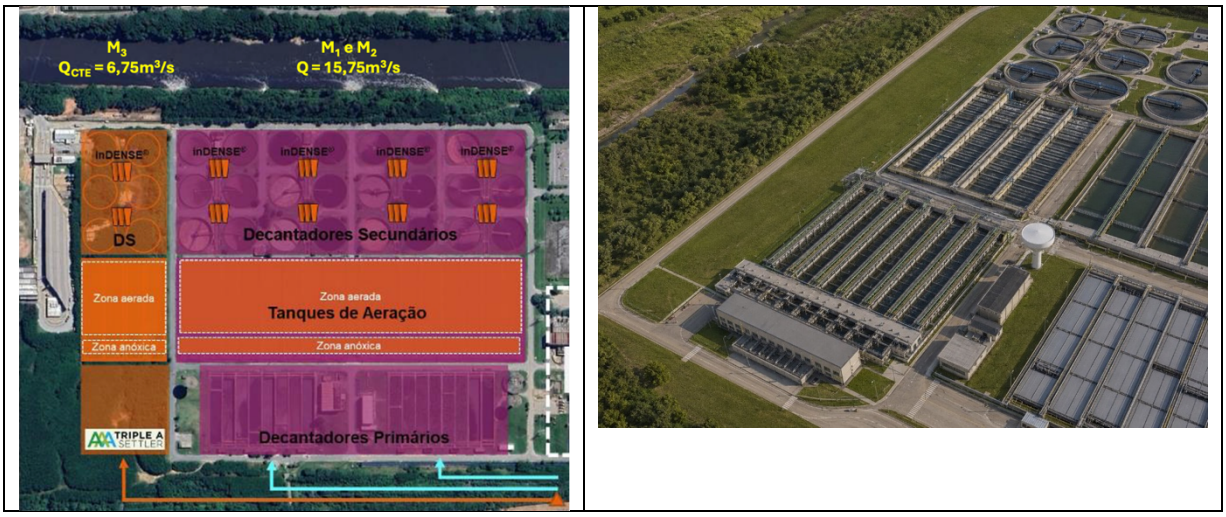


Figura 4.5: Ilustração dos Módulos M1, M2 e M3
Fonte: Sabesp



Figura 4.6: Ilustração do Projeto de Ampliação da ETE Barueri
Fonte: Sabesp

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- A ETE Barueri encontra-se atualmente num local com possibilidades reduzidas de expansão de área utilizada em função da alta demanda de vazão a ser tratada.
- Durante a execução do estudo da rota tecnológica da concepção da ETE Barueri, constatou-se a existência de 2 gargalos de processo: a) gargalo hidráulico, limitando a capacidade dos Decantadores Secundários e b) gargalo da alcalinidade, decorrente dos volumes reduzidos de reatores existentes.
- De modo a atender estas demandas de limitação de área disponível e gargalos de processo, fez-se prospecção tecnológica de processos intensivos de tratamento de esgoto, de forma a fazer "mais com menos". As tecnologias inovadoras prospectadas deveriam ter embasamento técnico e científico e terem sido aplicadas em escala plena, não necessariamente na mesma escala que a ETE Barueri, caso contrário, restringiria muito o leque de alternativas. Visitas técnicas estabelecidas através de Missões de especialistas da Sabesp permitiu o conhecimento no "chão de fábrica" das ETEs do exterior com estas tecnologias, dando confiança no prosseguimento da concepção escolhida.
- A Tecnologia Triple A é um processo A de batelada que prioriza a captura de Carbono para encaminhamento em digestores anaeróbios e produção de biogás. Trata-se de um lodo ativado com baixa idade do lodo, onde se ocorrem os processos de adsorção/biooxidação e estabilização de contato. De modo a intensificar mais o uso desta tecnologia em Barueri, adotou-se a configuração do

novo módulo M3 com Triple A trabalhando em vazão constante de pico hidráulico, correspondendo a 1/3 da vazão média de projeto.

- A adoção do Triple A para novo módulo, representa um aumento de lodo primário e consequente redirecionamento de DQO para a linha de lodo (digestão anaeróbia), reduzindo assim a carga do tratamento principal, nos tanques de aeração, diminuindo os requisitos de volume e a energia de aeração, além de aumentar a produção de biogás. Em termos de redução de carga a ser tratada nos tanques de aeração do meio módulo comTriple A, representa redução de necessidade de tanque de aeração e de capacidade dos sopradores e de consumo de energia, da ordem de 20% se comparada aos tanques existentes que são precedidos de decantador primário. Como a carga direcionada ao módulo com triple A, representa 30% da carga total à ETE, 6% a mais de lodo primário direcionado aos digestores e 6% de redução de demanda energética elétrica na ETE.
- A Tecnologia InDense é um seletor físico que deve ser acoplado a um seletor biológico de modo a propiciar a manutenção de um lodo intensificado, que é uma mistura de lodo floculento com lodo granular, possibilitando uma maior velocidade de sedimentação do lodo e menor necessidade de área de decantação. Em função desta biomassa intensificada, tem-se como efeito uma menor taxa de recirculação de lodo, podendo atingir valores de até 26%. Apesar do InDense permitir um aumento de capacidade nos Módulos existentes M_1 e M_2, optou-se por fazer uso intensivo no novo módulo M_3 com Triple A, de modo a favorecer o balanço energético da planta.

O controlador AvN é utilizado para otimizar a aeração em processos com Nitrificação e Desnitrificação Simultânea, podendo ser utilizado a aeração intermitente ou através do OD flutuante e para controlar a alcalinidade, sem necessidade de adição de produtos químicos.

Agradecimentos:

Sabesp:

- Angel Ibanez, Diretor de Suprimentos;
- Antonio Artur Agostinho Rodrigues Pereira, Engenheiro do Departamento de Projetos de Tratamento;
- Fabio Alceu Akiyama de Moraes, Engenheiro de Apoio Operacional da ETE Barueri;
- Ivana Wuo, Gerente do Departamento de Engenharia de Ativos;
- Marcel Sanches, Diretor de Engenharia;
- Michel Argeri, Gerente do Departamento de ETEs da RMSP.

ARA Consult:

- Bernhard Wett;
- Peter Aichinger;
- Simon Schraml.

Wawatech:

- Robert Zarzycki.

Consórcio Arcadis e JNS:

- Alysson Tavares/Arcadis;
- Ana Carolina Morihama/JNS;
- Ari Caraver/Arcadis;
- Enoch Varon Lenis/Vamaros;
- Fabiana Konig Fernandes/Arcadis;
- Fabio Fujii/JNS;
- Luis Sacoman/Arcadis;
- Nilton Cinti/Arcadis;
- Pedro Alem Sobrinho/Consultor Externo;
- Priscila Rodrigues/Arcadis.

Engecorps:

- Maira Gimenes/Engecorps;
- Nayara Batista Borges/Engecorps.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. HAUDUC, H.; AL-OMARI, A.; WETT, B.; JIMENEZ, J.; DE CLIPPELEIR, H.; RAHMAN, A.; WADHAWAN, T.; TAKACS, I. Colloids, flocculation and carbon capture – a comprehensive plant-wide model. doi: 10.2166/wst.2018.454. Water Science & Technology, 70.1, 2019.
2. LIU, Y.; GU, J.; ZHANG, M. A-B Processes: Towards Energy Self-sufficient Municipal Wastewater Treatment. https://doi.org/10.2166/9781789060089. IWA Publishing, 2019.
3. ROCHE, C.; DONNAZ, S.; MURTHY, S.; WETT, B. Biological process architecture in continuous-flow activated sludge by gravimetric: Controlling densified biomass form and function in a hybrid granule-floc process at Dijon WRRF, France. **https://doi.org/10.1002/wer.1664**, Water Environment Research, 2021.
4. VAN HAANDEL, A.; MARAIS, G. O comportamento do Sistema de Lodo Ativado. Teoria e aplicações para Projetos e Operação, 1999.
5. WETT, B.; AICHINGER, P.; MURTHY, S. Converting rectangular and circular primary tanks into the AAA biologically enhanced clarification settler. Water Environment Research, **https://doi.org/10.1002/wer.11023**, Volume 26, Issue 4, 2024.
6. WRF, THE WATER RESEARCH FOUNDATION. Advancements in Continuous Flow Densified Sludge System – Design and Operation, Project nº 5130, 2024