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

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
Rosane Ebert Miki [(3)]
Engenheira do Departamento de Projetos de Tratamento
Marcel Costa Sanches [(4)]
Diretor de Engenharia da Sabesp
Michel Argeri [(5)]
Gerente de Operação das ETEs da RMSP, 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 Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Barueri, para vazão de 22,5 m³/s, impôs desafios significativos à seleção da rota tecnológica da fase sólida, em função da limitada área disponível e da defasagem entre a capacidade da fase líquida (16 m³/s) e a capacidade implantada na fase sólida (14 m³/s). O presente trabalho avaliou tecnologias intensivas de tratamento de lodo como adensamento com centrífuga com injeção de ar, digestão anaeróbia mesofílica avançada com hidrólise externa, secagem térmica com tecnologia de filme fino e recuperação energética do biogás. A metodologia compreendeu a prospecção de rotas de hidrólise externa (térmica, termoalcalina e biológica), a análise de balanços de massa e energia, e a comparação técnico-econômica entre alternativas com base em CAPEX, OPEX e desempenho energético. Os resultados indicaram que a rota de hidrólise biológica associada a digestores de alta taxa apresentou o melhor desempenho global, permitindo redução do número de digestores de 22 para 12 unidades, aumento da produção de biogás e autossuficiência térmica sem consumo de gás natural. A combinação com secagem térmica em filme fino de duplo estágio resultou em demanda energética específica inferior a 500 kWh/t de água removida. Conclui-se que a solução integrada é técnica e economicamente viável para ETEs de grande porte, alinhada aos princípios de recuperação de recursos e economia circular.

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

1 INTRODUÇÃO

A ETE Barueri, inaugurada em 1988, é a maior estação do Sistema Integrado de Tratamento de Esgoto da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), que atende uma população de aproximadamente 20 milhões de habitantes, conforme o Censo do IBGE de 2022. Sua última ampliação significativa na fase líquida ocorreu em 2018, para a capacidade de projeto de 16 m³/s. Na fase sólida, contudo, as unidades existentes permaneceram dimensionadas para a vazão de projeto original de 14 m³/s, gerando uma defasagem que se tornou crítica diante da necessidade de ampliação para 22,5 m³/s, visando atender às metas de universalização do saneamento.

Em função do espaço limitado para implantação de novas unidades, tornou-se necessária a adoção de tecnologias intensivas de tratamento, capazes de maximizar a eficiência por área ocupada. Este artigo apresenta o estudo de caso do processo de seleção tecnológica da fase sólida, desde o diagnóstico da configuração existente até a definição da rota final, passando pela prospecção de alternativas e pela avaliação integrada de desempenho técnico, energético e econômico.

A complexidade do sistema de Barueri exige uma abordagem que transcenda o tratamento convencional. A integração de processos de hidrólise e digestão de alta taxa surge como resposta à escassez de área física, permitindo que a infraestrutura existente seja otimizada sem a necessidade de grandes expansões territoriais, o que seria inviável no contexto urbano densamente povoado da RMSP.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar e comparar diferentes rotas tecnológicas intensivas para o tratamento da fase sólida da ETE Barueri, considerando critérios de desempenho técnico (eficiência de destruição de sólidos voláteis, produção de biogás, área requerida), econômico (CAPEX e OPEX) e energético (balanço térmico e elétrico, autossuficiência), de modo a selecionar a alternativa mais adequada ao contexto específico da estação. Busca-se, especificamente, identificar a configuração que minimize a dependência de combustíveis fósseis externos, como o gás natural, através da maximização da produção e do uso eficiente do biogás gerado internamente. A análise foca na integração entre as etapas de hidrólise, digestão e secagem.
Adicionalmente, o estudo visa fornecer subsídios técnicos para a tomada de decisão em projetos de ampliação de ETEs de grande porte no Brasil, onde a restrição de área e a necessidade de eficiência energética são desafios comuns. A meta final é a consolidação de um modelo de economia circular aplicado ao saneamento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 RECUPERAÇÃO DE RECURSOS

Em 2012 a entidade norte americana Water Environment Federation/WEF propôs uma mudança do termo ETE/Estação de Tratamento de Esgoto (WWTP Wastewaster Treatment Plant) para Estação Recuperadora de Recursos (Water Resource Recovery Faciltity), de forma a mudar o foco de resíduo para produção de recursos, como água de reuso, nutrientes, energia, biopolímeros etc.

Após mais de uma década, esforços do setor de água vêm sendo realizados para alcançar esta meta, no entanto, de forma prática, entre os recursos mais explorados por uma ETE é e continua sendo o biogás, como forma de energia.

No Brasil, o tipo de energia considerado mais fácil de ser explorado é a energia que pode ser consumida na própria ETE, como por exemplo, a energia elétrica e a energia térmica para serem utilizadas em seus próprios processos. Já o Biometano, apesar de sua atratividade econômica pode ser interpretada pelo Agente Regulatório como uma Receita Acessória e com isso, ser totalmente capturada. No Reino Unido, houve diferentes épocas e contextos podendo ser explorado tanto o biometano como a energia elétrica.

Do ponto de vista pragmático do saneamento como negócio, entende-se que o biogás como fonte de energia é o recurso a ser perseguido em novas concepções de ETE.

3.2 REDIRECIONAMENTO DO CARBONO

E na rota tecnológica de produção de biogás numa ETE, Verstraete et al (2009) propuseram um modelo de ETE para a geração de recursos, onde a primeira etapa seria o encaminhamento do fluxo com concentração de sólidos do esgoto para produção de biogás através da digestão anaeróbia, conforme a Figura 3.1.

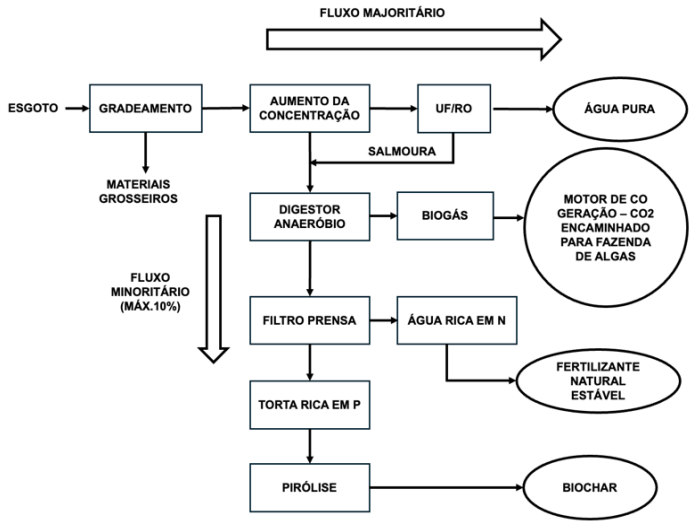


Figura 3.1 Esquema de processo de aumento de concentração do esgoto numa planta centralisada permitindo a máxima recuperação de recursos do esgoto doméstico
Fonte: Verstraete et al (2009)

Entre os métodos propostos para a realização desta concentração inicial de sólidos, podemos citar entre os processos mais tradicionais: flotação de ar dissolvido, membranas de filtração, filtros de areia, Chemical Enhanced Primary Treatment/CEPT – Tratamento Físico Químico com sais de ferro e polímero na Decantação Primária. E nesta época já surgiam debates sobre outros métodos como a adsorção bio aeração.
No Brasil, pode-se afirmar que houve uma variante deste tipos de configuração atravé do processo UASB, onde de certa forma ocorre uma concentração de sólidos no manto de lodo e produção de biogás no próprio reator. No entanto, Verstraete et al (2009) alegavam que em países temperados o clima não favorecia o desempenho destes reatores para esgoto doméstico. Além disso outra crítica severa era de que parte significativa do metano é perdida dissolvida no efluente. Outra crítica que se pode acrescentar é que a DQO rapidamente biodegradável é totalmente consumida no UASB, prejudicando a etapa posterior de nitrificação e desnitrificação para a remoção de nutrientes. Com o aumento das exigências dos orgão ambientais nos padrões de emissão de Nitrogênio, algumas ETEs no Brasil resolveram abandonar esta rota tecnológica, apesar de já terem reatores UASB instalados.

3.2 PROCESSOS A/B

Aproximadamente uma década após o trabalho de Verstraete, começam a surgir um renovado interesse pelos chamados Processos A/B, onde o estágio A caracteriza-se pela captura direta ou conversão de DQO em biogás através da digestão anaeróbia e sem produção de excesso de lodo seguido do estágio B para a remoção de nitrogênio.
Esta renovação do interesse partiu de uma série de reflexões descritas a seguir e compiladas por Liu et at (2019).
O processo de lodo ativado, descoberto há mais de 100 anos, apesar de seu sucesso de uso como tratamento de esgoto, tem sofrido diversas críticas pelo alta demanda de energia elétrica nos sistemas de aeração para a oxidação da matéria orgânica, resultando em grandes produções de lodo. Praticamente todas as ETEs são deficitárias em termos de energia.
Já do ponto de vista téorico, o esgoto tem energia química na forma de DQO para rodar 5 vezes todo o processo de tratamento. Assim, necessita-se repensar todo o Processo de Tratamento e uma das respostas é a adoção do Processo A/B.
Em termos de diagnóstico de demanda energética, o consumo no setor de tratamento de esgoto representa 3% de energia produzida nos EUA (epa.gov). No cenário de referência do International Energy Outlook 2021 (IEO2021), projeta-se que, na ausência de mudanças significativas em políticas públicas ou avanços tecnológicos disruptivos, o consumo global de energia aumentará em quase 50% nos próximos 30 anos. No Brasil, a meta de Universalização do Saneamento contribuirá para este aumento da demanda de energia elétrica no Brasil (ANA).
A ETE de Strass na Áustria é uma das referências de eficiência energética e adotou o Processo A/B. No começo da década de 90, as exigências de remoção de nutrientes implicaram em esforços de modo a conciliar a eficiência energética com remoção de nutrientes.
Isto foi obtido através de um intenso trabalho de pesquisa em processo de de HRAS – High Rate Activated Sludge, ou lodo ativado de alta taxa com curta idade do lodo e levando posteriormente ao processo Triple A.
O Triple A – Alternating Activated Adsorption é um processo em batelada com tempo de ciclo de 1 hora e idade do lodo curta de 0,5 dia com remoções de Sólidos em Suspensão da ordem de 77% e DQO de 66%, incluindo com remoções de N de 30% e P de 50%. Em relação a DQO solúvel, há uma redução de 30%.

3.3 Tecnologias de Hidrólise Externa para Digestão Anaeróbia

O fator limitante no Processo de Digestão Anaeróbia de Lodo é a etapa de Hidrólise, onde polímeros orgânicos insolúveis como proteínas, carboidratos (polissacarídeos) e lipídios são quebrados em monomeros solúveis, como ácidos, acúcares e acidos graxos de longa cadeia.
De forma a acelerar esta fase do processo, pode fazer usos de tecnologia de hidrólise externa como o Processo de Hidrólise Térmica, Processo de Hidrólise Termo Alcalina e o Processo de Hidrólise Biológica e Enzimática, cujas caractreísticas estão descritas na Tabela 3.1.

Tecnologia	Tipo de Lodo de Entrada	Requisito de Pré-Processamento	Parâmetros de Processo
Hidrólise Térmica	1º + 2º 2º	Pré-Desidratação a 16% Diluição a vapor (-3%) Diluição a 10% para Digestor	T ciclo = 50 min T = 150 a 160ºc P = 90 a 100 psi
Hidrólise Termo Alcalina	2º	Adensamento de 5 a 10%	t_d = 2 a 2,5 horas T = 65 – 70ºC 1,5 a 2 L de NaOH (50%) por m^3 de Lodo 2º
Hidrólise Termo Biológica	1º + 2º	Entre 7 a 10%	t_d = 3 dias T = 42ºC

Tabela 3.1: Caracterísiticas dos processos de hidrólise externa de lodo
Fonte: autor

Em relação a taxa de degradação na digestão anaeróbia, o lodo biológico de descarte de lodo ativado apresenta aproximadamente metade da taxa de um lodo primário.
Uma das formas de otimizar o processo de Hidrólise externa é justamente aplicar este processo para o lodo biológico de modo a diminuir o tamanho dos reatores e demanda energética, já que o lodo primário não se beneficia muito com este tipo de processo por ser de fácil degradação.
Os benefícios da adoção da hidrólise externa de lodo são:

- aumento da produção de biogás;
- diminuição da produção de lodo em base seca, devido à maior destruição de sólidos voláteis;
- aumento do teor de cinzas do lodo digerido e consequentemente aumentando do teor de sólidos da torta na desidratação.

3.3.1 Hidrólise Termo Biológica

A Hidrólise Termo Biológica foi desenvolvida no Reino através da Operadora de Saneamento United Utilities com o fornecedor de tecnologia Monsal através de um projeto de demonstração da ETE de Blackburn.
A concepção original não incluía uma etapa de pasteurização de lodo, que foi posteriormente acoplada através de um estágio em batelada, conforme ilustrado na Figura 3.2.

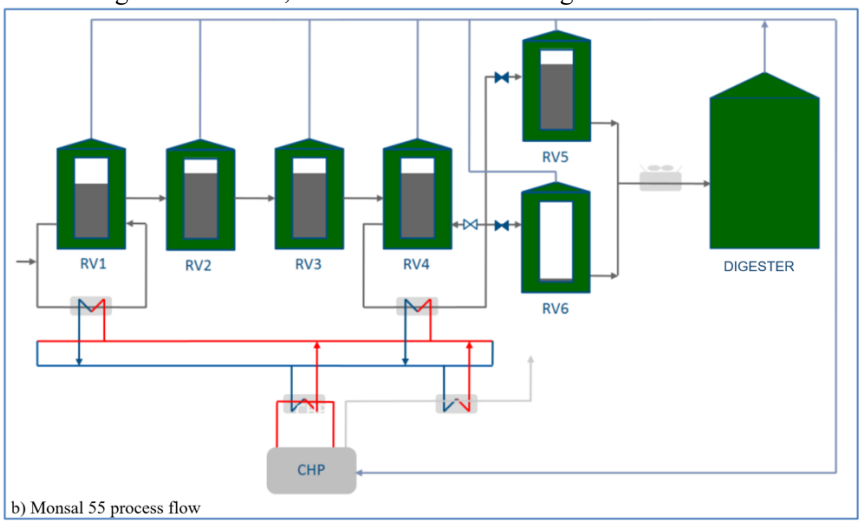


Figura 3.2 – Processo de Hidrólise Biológica (Theodolou et al, 2017)

Conforme Werker et al. (2007), a Hidrólise Biológica aumentou a destruição de sólidos voláteis em 10%, resultando numa destruição total de sólidos voláteis de 50% em relação a 41%, correspondendo a um aumento de 24% na produção de biogás da ETE de Blackburn.

Conforme Theodoulou et al. (2017), uma possibilidade desta tecnologia é aumentar efetivamente a Taxa de Aplicação Orgânica nos digestores através da diminuição do tempo de detenção e do aumento do teor de sólidos da alimentação, podendo chegar em 4 kg SV/m^3.dia. A produção específica de biogás pode atingir 350 Nm^3/t de lodo aplicado. Muitas plantas com Hidrólise Biológica operam com tempos de detenção entre 12-14 dias. Em Great Billing, o tempo de detenção situa-se em 16 dias, mostrada na Figura 3.3.
Conforme Riches (2010), em relação a torta de lodo houve uma superação das expectativas, com teor de sólidos de 28% por um período de 6 meses, com valores variando entre 25 e 30%.



Figure 3.3 – Sistema Monsal de Hidrólise Biológica com Pasteurização na Usina de Great Billing/Anglian Water, Reino Unido
Fonte: Autor (2018)

Apesar da United Utilities ter sido a inventora e pioneira na utilização da Hidrólise Biológica, foi a Anglian Water quem mais fez uso desta tecnologia, bem como propondo outro tipo de configuração, criando o HpH – Heating Pasteurization Hydrolysis, mostrada na Figura 3.4.

Apesar da United Utilities ter sido a inventora e pioneira na utilização da Hidrólise Biológica, foi a Anglian Water quem mais fez uso desta tecnologia, bem como propondo outro tipo de configuração, criando o HpH – Heating Pasteurization Hydrolysis, mostrada na Figura 3.4.



Figure 3.4 – Sistema Helea de Hidrólise Biológica com Pasteurização na ETE de Colchester/Anglian Water, Reino Unido
Fonte: Autor (2025)

3.3.2 Digestão Anaeróbia em Regime Plu Flow - Ephyra

Ephyra é um sistema patenteado pela Haskoning de digestão anaeróbia em regime de pistão, conforme ilustrado nas figuras 3.5 e 3.6.

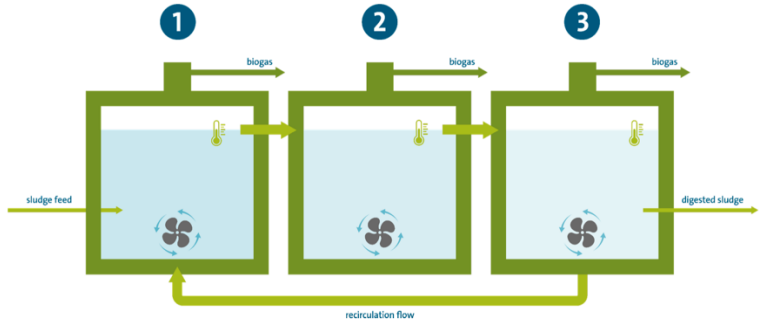


Figure 3.5 Configuração de um sistema Ephyra de Digestão Anaeróbia
Fonte: Haskoning



Figure 3.6 – Digestores Ephyra na ETE de Ringsend, Dublin, Irlanda
Fonte: Autor (2025)

EVANGELOU (2016) em sua dissertação sobre Ephyra teve as seguintes conclusões:

- a produção de biogás pode ser de 10 a 20% maior que um sistema convencional;
- a melhor taxa de recirculação de desempenho no sistema foi obtida com um valor de 8%;
- diminuindo-se o número de reatores em série de 4 para 3 não mudou a eficiência do sistema.

3.4 Processos para aumento do teor de sólidos do Lodo

3.4.1 Adensamento de Lodo

As fontes geradoras de lodo numa ETE são o tratamento primário e o tratamento biológico.
No tratamento primário, devido a grande quantidade de água presente ainda presente no lodo primário faz-se necessário o uso do adensamento, que pode ser por gravidade ou mecanizado. No adensamento de lodo primário por gravidade, pode-se atingir um teor de sólidos em torno de 5% e captura de sólidos em torno de 85%.
Já no adensamento do lodo biológico, o processo por gravidade não é muito efetivo, sendo mais comum o uso de equipamentos mecanizados como filtro de esteira ou centrífuga, com dosagem de polímero.
Normalmente os processos de adensamento de lodo são dedicados ao tipo de lodo. No caso da ETE Barueri, adotou-se o adensamento por gravidade para o lodo primário com meta de se atingir 5% de teor de sólidos. Já para o lodo secundário, a concepção original foi a adoção da flotação por ar dissolvido que posteriormente foi trocada para centrífuga para se atingir 6% de teor de sólidos.
Na Europa há uma outra configuração de processo, onde a mistura do lodo primário e biológico é submetida a um processo de adensamento conjunto de lodo. Na ETE de Neuberg na Alemanha, Figura 3.7, este adensamento conjunto de lodo é realizado através de Adensador Mecânico de Disco, S-Disc Huber, atingindo um valor de 8% de teor de sólidos, possibilitando uma maior taxa de aplicação de sólidos voláteis no digestor

anaeróbio, bem como diminuindo a demanda de energia térmica devido a diminuição de água no lodo. Conforme a WEF, MOP 11, (2017), a digestão com alta concentração de sólidos é realizada em várias instalações na Europa com entradas de 7 a 8% de teor de sólidos, devendo se tomar cuidado nos equipamentos de mistura e dispositivos anti espuma.



Figura 3.7 – Adensamento mecânico de Disco para Mistura de Lodo Primário e Biológico na ETE de Neuburg, Alemanha
Fonte: autor (2025)

3.4.2 Pré-desidratação para THP

No Reino Unido é comum a configuração de uma Usina Central de Lodo com recepção de lodos de ETEs satélites para processamento de digestão e maior produção de biogás. Neste tipo de configuração, o lodo encaminhado através de torta deve ser diluído para ser processado na Digestão Anaeróbia de Lodo.
Através de diversas experiências, muitas usinas adotaram teores de sólidos de lodo maiores que o valores convencionais numa faixa de 7 a 10%. Este tipo de configuração foi favorecida pelo uso da Hidrólise Externa do Lodo, como o THP ou o BHP, que permite que se trabalhe em maiores teores de sólidos, devido a melhoria da viscosidade devido a hidrólise. No caso do THP, o teor de sólidos requerido pelo processo é de 16% de teor de sólidos, que é atingido pela etapa de pré-desidratação do lodo, que é um processo que se situa entre o adensamento e desidratação de lodo. Os desenvolvedores da tecnologia THP encontraram este teor de sólidos como o mais adequado para o processo em termos de balanço de massa e de energia. Após o processo do THP, ocorre um diluição do lodo, resultando num teor de sólidos em torno de 13%, devido a injeção de vapor como método de aquecimento do lodo. Para os processos onde toda a produção de lodo é submetida ao THP, deve-se ainda abaixar o teor de sólidos para um valor em torno de 10% antes de ser encaminhado para o Digestor Anaeróbio.
Para o THP, investigou-se o uso desta tecnologia somente para o lodo biológico, que é o lodo que apresenta menor grau de digestão em relação ao lodo primário, que se beneficia pouco do processo de hidrólise. Neste tipo de configuração de THP dedicada para lodo biológico, haveria uma menor demanda de energia bem como de menor necessidade de unidades de THP em comparação com o uso da mistura de lodo primário e lodo biológico.
A ETE de Long Reach operada pela Thames Water adotou esta configuração de THP para o lodo biológico. Um artifício utilizado para melhorar o desempenho da etapa de pré-desidratação foi através da introdução de uma fração de lodo primário ao lodo biológico, de modo a economizar na dosagem de polímero, tornando o processo mais atrativo, mesmo que o lodo primário não se beneficie tanto no THP.
Para a realização da pré-desidratação do lodo biológico, a prática mais comum é a adoção de um estágio de adensamento mecânico seguido de um estágio de desidratação. Como se trata de uma operação um tanto trabalhosa fazer a pré-desidratação em dois estágios, foi feito uma avaliação de mercado de tecnologias que pudessem receber um lodo com teor de sólidos em torno de 0,6% e pudessem atingir o teor de sólidos de 16%. E em contato com os fornecedores de equipamentos, a empresa Flottweg relatou que forneceu centrífuga de pré-desidratação em 1 estágio para pre-desidratação do lodo biologico da ETE de Psyttalia em Atenas para sistema THP WAS Only da Cambi.
A dosagem de polímero para pré-desidratação de lodo biológico situa-se entre 7 a 10 kg/ton.

3.4.3 Adensamento de lodo com centrífuga THK

Na prospecção de tecnologias de adensamento de lodo, fez-se uma investigação de tecnologias com diferenciais tecnológicos e que trouxessem benefícios operacionais em termos de processo e gasto operacional, principalmente em relação ao gasto de polímero.
A tecnologia THK da Centrisys foi investigada e apresenta como diferencial tecnológico a injeção de ar comprimido, onde normalmente ocorre o cone da centrífuga. Este diferencial tecnológico permite a centrífuga a trabalhar com uma menor rotação, bem como menor dosagem de polímero.
Normalmente, o adensamento de lodo primário e biológico são realizadas de forma separada. O lodo primário pode ser adensado por gravidade, atingindo valores entre 3 a 5%. Já o lodo biológico não apresenta características favoráveis de ser adensado por gravidade, a não ser que seja misturado com o lodo primário.
As figuras 3.8 e 3.9 são apresentadas para ilustrar esta tecnologia.

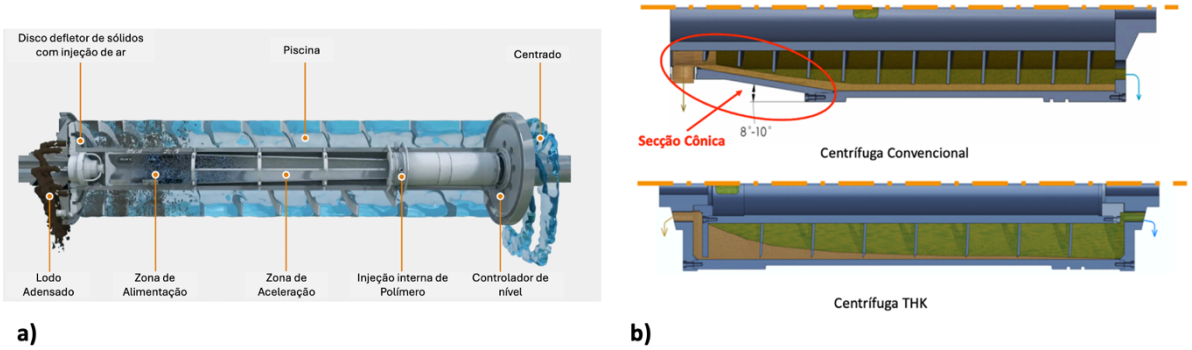


Figura 3.8 a) Tecnologia THK de Adensamento de Lodo da Centrisys; Fonte: internet Centrisys ; b) Configuração sem cone da Centrífuga THK **Fonte:** Gable (2014)

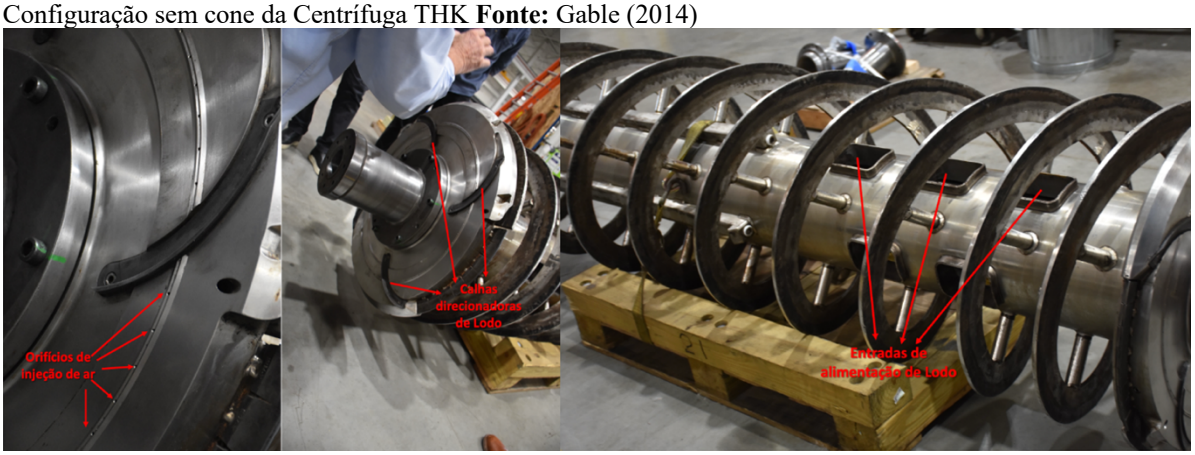


Figura 3.9 – Detalhes de Inovação da Centrífuga THK
Fonte: autor (2025)

Para efeitos de projeto, adotou-se como parâmetros as seguintes premissas:

- Entrada de Lodo Primário a 3,5%: dosagem de polímero a 1,9 kg/t e teor de sólidos final a 6,0%;
- Entrada de Lodo Biológico a 0,75%: dosagem de polímero a 3,2 kg/t e teor de sólidos final a 9,0%;
- Entrada de Lodo Primário e Biológico a 1,25%: dosagem de polímero de 2,0 kg/t e teor de sólidos final a 9,0%.

3.5 Aquecimento de lodo com sistema de injeção de vapor

No processo convencional de digestão anaeróbia de lodo normalmente são utilizados os trocadores de calor do tipo casco e tubo, onde ocorre a troca térmica indireta entre o lodo e água quente. Se por um lado a tecnologia da Hidrólise Externa de Lodo permite a adoção de maiores teores de sólidos na Digestão Anaeróbia levando a menor demanda volumétrica de reatores, por outro torna o lodo alta viscosidade, tornando mais favoráveis problemas como o cozimento do lodo (“baking”) que atrapalham o processo de transferência de calor.
De modo a não depender de uma característica não conhecida como viscosidade do lodo, optou-se por investigar o uso de injeção direta de vapor como método de aquecimento do lodo.

O método tradicional indireto apresenta as seguintes características:

- Mais apropriado para recuperação energética em líquido-líquido;
- Sujeito a entupimento e incrustrações;
- Exige maior área de instalação;
- Tempo de resposta mais lento e controle de temperatura mais limitado;
- Pode utilizar água de arrefecimento a 90ºC de motor CHP como fluido de aquecimento para troca indireta.
- Requer informação de viscosidade aparente do lodo.
- Manutenção mais dispendiosa com interrupção mais prolongada de tempo.

O método de aquecimento direto do lodo por injeção de vapor apresenta as seguintes características:

- Controle de temperatura mais preciso;
- Eficiência energética de 20 a 25% superior ao método indireto;
- Menor área de instalação;
- Manutenção menos dispendiosa e mais rápida;
- Problemas de entupimento são minizados com altas velocidades de injeção de vapor;
- Aplicável em fluidos de alta viscosidade;
- Requer caldeira de vapor;
- Consumo de água de alta qualidade que é incorporada no processo;

A figura 3.10 ilustra os métodos de aquecimento indireto e direto de lodo.

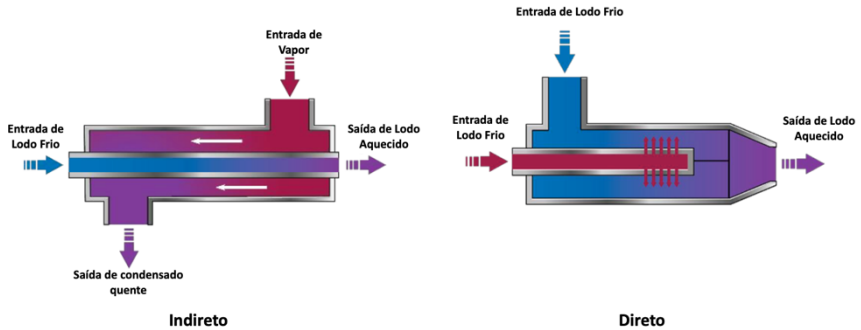


Figura 3.10 – Métodos de aquecimento indireto e direto de lodo
Fonte: Hydro Thermal

A figura 3.13 ilustra a tecnologia de injeção de vapor no lodo

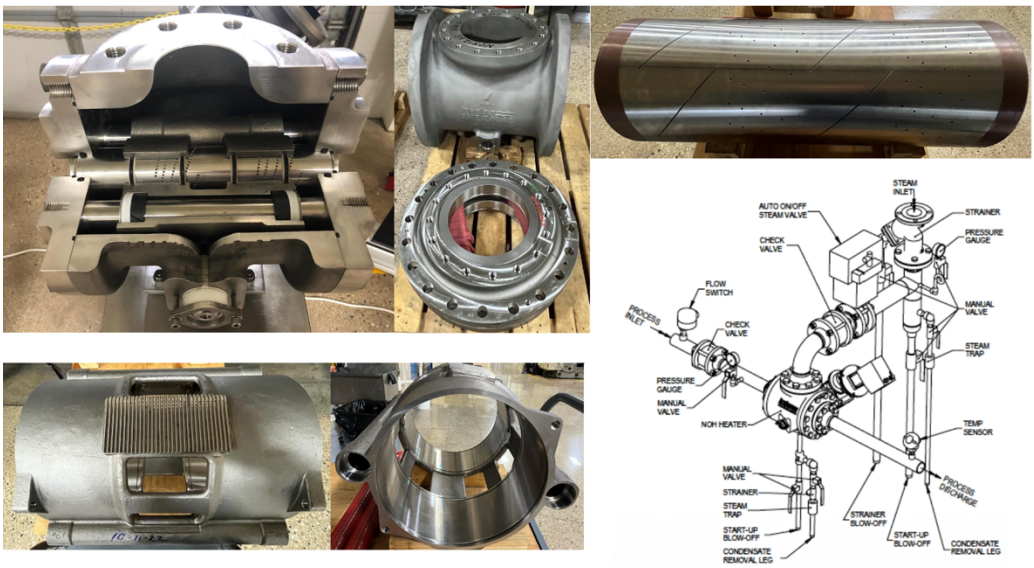


Figura 3.13: Dispositivo de Injeção de vapor no lodo
Fonte: Hydro Thermal

3.6 Secagem térmica do lodo

Para a secagem térmica do lodo foram estudadas tecnologias como secador térmico de esteira, filme fino e leito fluidizado.

Um dos principais fatores para a escolha da tecnologia foi a eficiência energética, pois no Brasil o gás natural é um combustível relativamente caro em relação a outras fontes de energia, como a elétrica. De modo a tornar o projeto mais atrativo do ponto de vista econômico, a dependência de gás natural para secagem deveria ser a mínima possível. Assim, a análise abordou a autossuficiência em duas frentes: maior produção de biogás na digestão anaeróbia de lodo e menor demanda específica de energia em kWh/ton água evaporada.

A tecnologia de secagem térmica por esteira é uma das mais difundidas e com mais de um fornecedor no mercado, ganhando tração frente a outra tecnologias menos seguras e geradoras de pó. MILLS (2014) cita que o secador tambor pode criar uma quantidade de pó considerável em um ambiente com ar aquecido a 400ºC. Já o secador de esteira possui uma esteira perfurada dentro de uma câmara com ar aquecido entre 60 a 120 ºC, podendo ser aquecido com água quente.

Uma desvantagem desta tecnologia refere-se a uma limitação da consistência da torta de lodo que pode estar correlacionada com o teor de sólidos final da torta. A secagem térmica de esteira requer que o lodo seja extrudado de forma a alimentar a esteira. Na ETE de Kenosha em Wisconsin, pode-se atingir teores de sólidos próximo de 30% através de centrífugas, no entanto, a limitação foi a extrusora do secador térmico que limitou este teor de sólidos mais para baixo. Apesar desta limitante, isso não foi critério de exclusão desta tecnologia, conforme descrito no item 3.6.1.

3.6.1 Secagem térmica de filme fino

O secador de filme fino é uma tecnologia de secagem de contato indireto se utiliza de uma jaqueta térmica, podendo utilizar como fluido de aquecimento óleo quente ou vapor. A secagem do lodo ocorre por condução e não por convecção, como o secador por esteira.

Nas operações de secagem industrial, há uma demanda de manipular certos materiais em temperaturas não tão altas. Dessa forma, uma maneira de se trabalhar com estes materiais industriais foi através da aplicação de vácuo, diminuindo assim a temperatura de evaporação. Com este mesmo fundamento, a SMS desenvolveu um sistema de secagem de lodo com filme fino com um primeiro estágio à vácuo a 100 mbar seguido de um segundo estágio em pressão atmosférica. Nesta configuração há um reaproveitamento de calor de um estágio para outro, diminuindo a demanda total de energia térmica. A figura 3.14 ilustra estes aproveitamentos de calor nos 2 estágios com filme fino.

No primeiro estágio de filme fino com lodo sujeito a vácuo a 100 mBar, utiliza-se água em temperatura um pouco abaixo da temperatura de ebulição, com saída de lodo com teor de sólidos entre 36 e 39%.

No segundo estágio de filme fino com lodo a pressão atmosférica, utiliza-se vapor a 10 bar e 184ºC, com saída de lodo com teor de sólidos de aproximadamente 70%.

Após a secagem em processo de filme fino, há a complementação com o secador tipo linear de modo a atingir 90% de teor de sólidos, que utiliza vapor a 10 bar e 184ºC.

A demanda específica de energia para o secador de filme fino com estágio de vácuo e secador linear é de no máximo 500 kWh/ton água removida.

As figuras 3.14 a 3.15 ilustram o secador de filme fino.

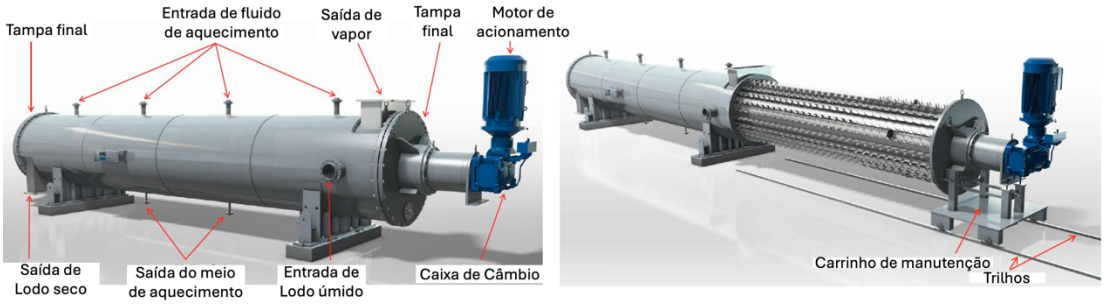


Figure 3.14 – Detalhes de construtivos do secador de filme fino
Fonte: SMS, proposta técnica 2025



Figure 3.15 – Secador Térmico de Filme Fino em Manutenção na ETE de Karlrsruhe, Alemanha

Fonte: Autor (2025)

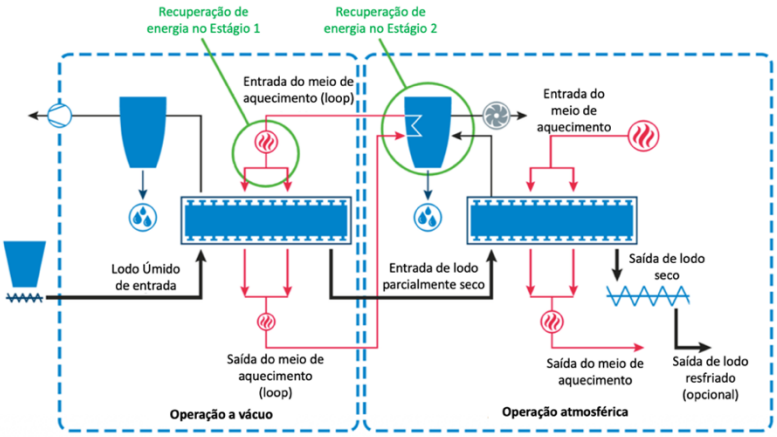


Figure 3.16 - Secador Térmico de Filme Fino com 2 estágios

Fonte: SMS, proposta técnica 2025

3.7 Peneiramento do Lodo

A visita técnica em várias ETEs ao redor do mundo bem como a troca de experiências entre projetista, fornecedores e operadores mostra que mesmo com um tratamento preliminar de grade fina na entrada do processo de tratamento sempre ocorre a passagem de sólidos grosseiros, como fibras. Este tipo de material acaba favorecendo a ocorrência de problemas como obstruções, entupimentos e travamentos nos processos da fase sólida.

Em visita técnica na ETE de Piscataway, EUA, com sistema de digestão avançada com Processo de Hidrólise Térmica Cambi, foi constatada o uso de um dispositivo de peneiramento de lodo denominado Strainpress da marca Huber, conforme figura 3.18. A Figura 3.19 ilustra um gráfico em função da abertura e do teor de sólidos do lodo primário. A Figura 3.20 o princípio de funcionamento do equipamento Strainpress, que é uma rosca transportadora inserida num tubo perfurado, sendo o material grosseiro transportado para a extremidade oposta a alimentação.



Figure 3.18 – Peneiramento de lodo Straipress na ETE de Piscataway, Estados Unidos

Fonte: autor (2025)

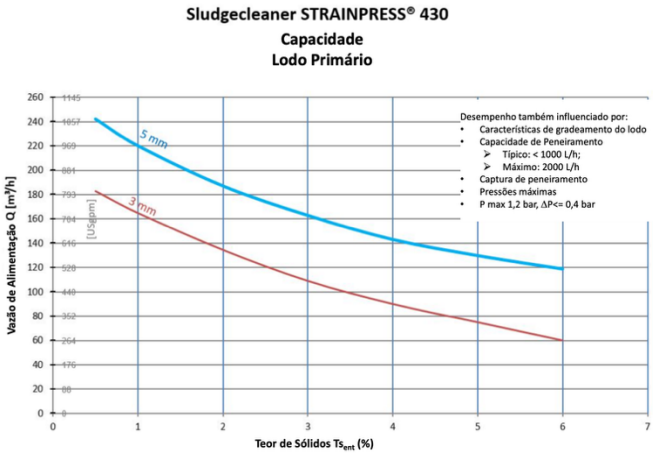


Figure 3.19 – Gráfico de capacidade de modelo de peneira em função de abertura e teor de sólidos do lodo

Fonte: Huber

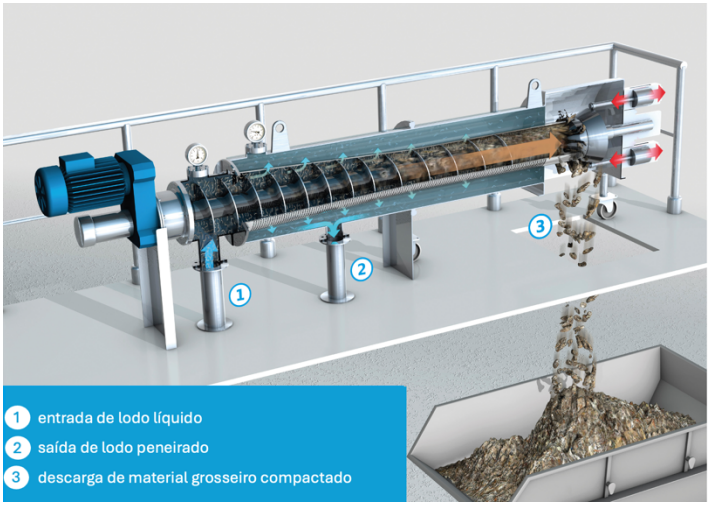


Figure 3.20 – Esquema de funcionamento do Strainpress

Fonte: Huber



Figure 3.21 – Ilustração de material peneirado do lodo

Fonte: Huber

4 METODOLOGIA

4.1 Premissas de Projeto

A principal diretriz estabelecida para a fase sólida foi a adoção da secagem térmica como etapa final de tratamento, visando a redução substancial do volume de lodo destinado à disposição final. Na avaliação das tecnologias, além do desempenho técnico e do custo de implantação (CAPEX), foram considerados os custos operacionais (OPEX), incluindo produtos químicos para adensamento e desaguamento, energia térmica para aquecimento dos digestores e secagem, energia elétrica, transporte e disposição final do lodo.

Estabeleceu-se como meta a autossuficiência energética, sem consumo de gás natural, priorizando a geração de energia elétrica a partir do biogás para consumo interno da ETE. O projeto considerou um horizonte de 20 anos, com vazões incrementais até atingir os 22,5 m³/s previstos para a saturação do sistema.

4.2 Configuração Atual da Fase Sólida

A configuração existente da fase sólida da ETE Barueri é composta por:

- Adensadores por Gravidade (lodo primário): 8 unidades, D = 29 m, H = 3,5 m, área total de 5.284 m²; Centrífugas de Adensamento (lodo biológico): 6 unidades, capacidade nominal de 100 a 110 m³/h cada;
- Digestores Anaeróbios Mesofílicos: 10 unidades, D = 33 m, profundidade = 12,3 m, volume unitário de 10.520 m³;
- Centrífugas de Desidratação (lodo digerido): 4 unidades, capacidade nominal de 100 a 110 m³/h cada.

A eficiência atual de remoção de sólidos voláteis nos digestores gira em torno de 45%, o que é considerado padrão para sistemas mesofílicos convencionais, mas insuficiente para as metas de redução de massa e produção de biogás estabelecidas para a ampliação.

4.3 Tecnologias Avaliadas e Critérios de Seleção

Foram avaliadas três rotas de hidrólise externa integradas à digestão anaeróbia mesofílica: (i) hidrólise térmica (THP) a 165 °C; (ii) hidrólise termoalcalina a 60 °C; e (iii) hidrólise biológica a 42-44 °C. Para a secagem térmica, foram consideradas as tecnologias de leito fluidizado, esteira de baixa temperatura e filme fino (simples e duplo estágio).

Os critérios de avaliação incluíram:

- Desempenho técnico: eficiência de destruição de sólidos voláteis, produção de biogás, teor de sólidos final;
- CAPEX: equipamentos principais, obras civis, montagem e comissionamento;
- OPEX: produtos químicos, energia elétrica e térmica, transporte e disposição final, manutenção;
- Balanço energético: capacidade de autossuprimento térmico e elétrico.

Adicionalmente, foi avaliada a tecnologia de adensamento mecânico THK (Centrisys), que utiliza injeção de ar comprimido no cone da centrífuga para permitir menor rotação e menor dosagem de polímero. Esta

tecnologia foi considerada chave para alimentar os processos de hidrólise com lodo em alta concentração (7-10% de sólidos).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Balanço de Massa e Energia

Os estudos técnico-econômicos demonstraram que os processos de hidrólise externa permitem um balanço de massa e energia significativamente superior ao da digestão mesofílica convencional, viabilizando a autossuficiência térmica sem consumo de gás natural. O lodo seco resultante ainda apresenta poder calorífico para geração adicional de energia, etapa que foi postergada para desenvolvimento futuro.

A produção de biogás estimada para a rota selecionada é de aproximadamente 45.000 Nm³/dia, o que representa um aumento de 35% em relação à configuração convencional sem hidrólise. Este excedente de biogás é fundamental para alimentar as caldeiras de vapor da secagem térmica e os motores de cogeração.

Na discussão com os fornecedores, observou-se que a hidrólise biológica, embora apresentasse maior tempo de processo, tornou-se mais atrativa quando combinada com o adensamento conjunto de lodo primário e biológico em alta concentração de sólidos, utilizando a centrífuga THK. Essa combinação mostrou-se decisiva tanto em CAPEX quanto em OPEX, especialmente devido ao impacto do consumo de polímero.

Esta infraestrutura, embora robusta, apresenta limitações de capacidade para a nova vazão de projeto. Para os adensadores por gravidade optou-se por utilizá-los para a mistura dos lodos gerados no Decantadores Primários do Módulos M_1 e M_2 e nos Adensadores do Triple A do Módulo M_3. Adotou-se como premissa de projeto um teor de sólidos final de 4% nos Adensadores por Gravidade desta mistura de lodo Primário e do Triple A.

Para o lodo secundário, a premissa adotada foi de geração de lodo com 0,75% de teor de sólidos no descarte.

Para efeitos ilustrativos, mostra-se a seguir um exemplo teórico numérico de modo a mostrar o critério utilizado.

- Lodo Primário/Triple A: 500 t/dia; Teor de Sólidos a 4% após adensamento por Gravidade; Q = 12.500 m³/dia; T = 19ºC;
- Lodo Secundário: 500 t/dia e Teor de Sólidos a 0,75% no descarte de lodo;

A tabela 5.1 mostra o impacto no consumo de polímero na pré-desidratação e adensamento avançado das configurações de Hidrólise Térmica e Hidrólise Termo Alcalina, combinado com o lodo primário/Triple A adensado por gravidade.

Configuração	Lodo 2º (t/d)	TS Lodo 2º Inicial	TS Lodo 2º Final	Dosagem de Polímero (kg/t)	Consumo de Polímero (kg/t)	Dosagem Total de Polímero (kg/t)
HIDRÓLISE TÉRMICA	500	0,75%	16% (pré-desidratação)	8	4000	4000
HIDRÓLISE TERMO ALCALINA	500	0,75%	9% (adensamento avançado)	3,2	1600	1600

Tabela 5.1: Consumo de Polímero nos Processos de Hidrólise Térmica e Alcalina

A tabela 5.2 mostra o impacto no consumo de polímero no adensamento avançado da configuração de Hidrólise Biológica com o lodo biológico de descarte combinado com o lodo primário/Triple A adensado por gravidade.

Configuração	Combinação de Lodo 1º e 2º (t/d)	TS de lodo combinado inicial (%)	TS de lodo combinado final (%)	Dosagem de Polímero (kg/t)	Consumo de Polímero (kg/t)
HIDRÓLISE BIOLÓGICA	1000	1,26%	9%	1,6	1600

Tabela 5.2: Consumo de Polímero nos Processos de Hidrólise Térmica e Alcalina

Nota-se que o consumo da pré-desidratação para o Processo de Hidrólise Térmica é o mais alto para todas as alternativas.

Na Hidrólise Térmica, o teor de sólidos cai em torno de 3% devido a utilização de injeção de vapor, resultando em 13%. Assim a combinação de lodo biológico hidrolisado com lodo primário adensado por gravidade resulta em:

- Lodo Biológico Hidrolisado Termicamente: 500 t/d; TS = 13%: Q = 3846 m^3/dia; T = 102ºC (Barber, 2020);
- Combinação de Lodo Biológico Hidrolisado e Lodo Primário/Triple A adensado por gravidade: Q = 16.346 m^3/dia; TS = 6,1%;
- Temperatura de Lodo combinado = (3846 x 102 + 12.500 x 19)/(16.346) = 38,5ºC, OK!;

Nesta configuração de Hidrólise Térmica, a mistura de lodo biológico hidrolisado como lodo primário/Triple A adensado por gravidade resulta em temperatura operacional do digestor mesofílico. Pode-se avaliar outros cenários como o adensamento avançado de lodo primário de modo a resultar que o lodo combinado atinja valores entre 9 a 10% de teor de sólidos. Estas configurações adicionais irão impactar tanto no consumo de polímero, que já é alto, para o lodo primário, como também exige a instalação de centrífugas dedicadas. E também pode ser necessário uma etapa adicional de ajuste da temperatura do lodo, como por exemplo, resfriamento de lodo de modo a não superar em muito a faixa ótima.

Na Hidrólise Alcalina, a demanda de polímero resultou no mesmo valor. Em termos de produtos químicos deve-se adicionar o custo do NaOH para a hidrólise termo alcalina. Fazendo-se o Balanço de massa e térmico tem-se:

- Lodo Biológico Hidrolisado por método Alcalino: 500 t/d; TS = 9%: Q = 5.555 m^3/dia; T = 70ºC;
- Combinação de Lodo Biológico Hidrolisado por método alcalino e Lodo Primário/Triple A adensado por gravidade: Q = 18.055 m^3/dia; TS = 5,5%;
- Temperatura de Lodo combinado = (5555 x 70 + 12.500 x 19)/(18.055) = 34,7ºC, OK!;

As mesmas conclusões obtidas para Hidrólise Térmica podem ser feitas para a Hidrólise Termo Alcalina.

Assim a Hidrólise Termo Biológica apresentou:

- Melhor configuração referente a etapa de ajuste de teor de sólidos ao fazer a combinação de lodo primário/Triple A e Lodo biológico no que se refere a etapa de adensamento avançado em termos de consumo de polímero e equipamentos;
- Os outros processos de Hidrólise poderiam fazer outras operações adicionais referentes ao lodo primário, mas iriam exigir demanda de polímero e equipamentos dedicados. Além disso, a temperatura ambiente do lodo primário/Triple A poderia exigir um resfriamento posterior do lodo ao se fazer a combinação com o lodo biológico hidrolisado, tornando mais complexa a operação.

5.2 Desempenho das Tecnologias e Seleção da Rota

Para as condições específicas de carga de sólidos, demanda energética e estrutura de custos da ETE Barueri, a rota de hidrólise biológica apresentou desempenho global superior às alternativas térmica e termoalcalina devido a etapa de ajuste de teor de sólidos. Foi selecionada a tecnologia Helea Lite + Ephyra (Haskoning), que associa hidrólise biológica em meio ácido a 42-44 °C a digestores anaeróbios de alta taxa do tipo Ephyra, operando em regime plug flow com recirculação.

Os digestores Ephyra permitem tempos de detenção hidráulica entre 8 e 15 dias, significativamente inferiores aos aproximadamente 20 dias requeridos em sistemas convencionais. Como resultado, o número de digestores previstos foi reduzido de 22 (configuração convencional) para 12 unidades em função do alto teor de sólidos de 9% estabelecido na fase anterior de processo, sendo que apenas dois novos digestores serão construídos, adaptados para operar como tanques Ephyra.

Para sustentar esta rota tecnológica deve-se salientar que foi incorporada a tecnologia de injeção de vapor como método de aquecimento do lodo devido a não depender das características de viscosidade do lodo. Outro

cuidado necessário foi checar as condições de mistura do lodo nos digestores existentes através da verificação da potência instalada de mistura.

Para a secagem térmica, a tecnologia de filme fino de duplo estágio apresentou o melhor desempenho global, com demanda específica de energia inferior a 500 kWh/t de água removida, resultando em menor consumo de biogás na secagem e maior disponibilidade para cogeração. A compacidade do sistema de filme fino também foi um fator determinante, dada a restrição de área na estação.

5.3 Aproveitamento Energético do Biogás

A estratégia de aproveitamento energético definiu a utilização do biogás para suprimento de energia térmica na secagem e em sistemas de cogeração (CHP). O calor recuperado nos CHPs é reutilizado nos processos de hidrólise e digestão, enquanto a energia elétrica gerada é destinada ao consumo interno.

A geração de biometano foi descartada devido a incertezas regulatórias quanto ao tratamento de receitas acessórias pela agência reguladora. Além disso, o uso interno do biogás para calor e eletricidade apresenta um retorno sobre o investimento (ROI) mais previsível no cenário atual de tarifas de energia no estado de São Paulo.

Para o aquecimento do lodo, optou-se pela injeção direta de vapor, eliminando a dependência de caracterização de viscosidade do lodo para dimensionamento de trocadores de calor. Esta escolha técnica simplifica a operação e manutenção, reduzindo problemas de incrustação e perda de carga nos sistemas de aquecimento.

5.4 Correntes Secundárias

A digestão avançada resulta em alta concentração de nitrogênio amoniacal no centrado da desidratação (aproximadamente 1.500 mg NH_4-N/L), favorecendo o uso de tecnologias como o processo Anammox. Este tratamento de linha lateral é essencial para evitar a sobrecarga de nitrogênio no tratamento biológico principal da ETE.

Na secagem térmica, o condensado gerado apresenta características distintas conforme a tecnologia: no secador de esteira, o condensado é mais diluído (300 a 800 mg/L), porém com maior carga mássica total de nitrogênio; no secador de filme fino, o condensado é mais concentrado, porém em menor volume.

O gerenciamento dessas correntes secundárias foi integrado ao projeto da fase líquida, garantindo que o retorno de carga orgânica e de nutrientes não comprometa a qualidade do efluente final lançado no Rio Tietê. A recirculação controlada do centrado permite uma operação mais estável do sistema de lodos ativados.

5.5 Benchmarking Tecnológico

A solução adotada foi inspirada por experiências internacionais, como a ETE de Long Reach (Thames Water, Reino Unido), que utiliza THP dedicado ao lodo biológico com adição de fração de lodo primário para economia de polímero, e a ETE de Ringsend (Dublin, Irlanda), que opera digestores Ephyra em escala plena.

O benchmarking permitiu mitigar riscos tecnológicos através da observação de lições aprendidas em outras plantas de grande porte.

A colaboração com fornecedores globais garantiu o acesso a dados de performance reais, que foram utilizados para calibrar os modelos de simulação de balanço de massa. A robustez da solução escolhida reflete a maturidade dessas tecnologias no mercado internacional de saneamento.

6 CONCLUSÕES

As tecnologias apresentadas neste artigo foram objeto de avaliação técnica e econômica integrada, considerando as condições particulares da ETE Barueri. A fase sólida teve como diretrizes a máxima eficiência na produção de biogás, na concentração de sólidos e na secagem térmica, resultando em uma solução que não deve ser interpretada como padrão aplicável a todas as ETEs, mas como resultado de um exercício de elaboração e comparação de cenários específicos.

A adoção da digestão avançada com hidrólise biológica permitiu trabalhar com maiores teores de sólidos e menores tempos de detenção, elevando a taxa de aplicação de sólidos e a capacidade volumétrica dos digestores. Isso evitou a necessidade de expansão expressiva do número de digestores, limitando a adição a apenas duas novas unidades. O adensamento combinado de lodo primário e biológico em alto teor de sólidos, viabilizado pela centrífuga THK, reduziu o número de equipamentos e o consumo de polímero, além de

concentrar as operações de tratamento de lodo em um único polo, simplificando a logística e o preparo de polímero.

A autossuficiência térmica sem consumo de gás natural foi alcançada pela soma de ganhos incrementais: maior teor de sólidos na digestão reduziu a demanda de energia para aquecimento; o maior teor de cinzas no lodo digerido favoreceu a desidratação, elevando o teor de sólidos da torta; e a menor geração de lodo em base seca reduziu a carga de água a ser evaporada na secagem térmica. A configuração adotada para o transporte do lodo desidratado, com a desidratação em nível elevado permitindo o fluxo por gravidade para o silo de alimentação da secagem, seguiu concepção típica europeia e contribuiu para a racionalidade operacional do projeto.

A solução integrada adotada para a ETE Barueri atendeu aos requisitos de desempenho técnico, energético e ambiental, alinhando-se aos princípios de estações orientadas à recuperação de recursos. A combinação de hidrólise biológica, digestão anaeróbia de alta taxa e secagem térmica energeticamente eficiente resultou em ganhos expressivos de eficiência e redução de custos operacionais. Os resultados demonstram a viabilidade técnica e econômica da rota tecnológica selecionada para ETEs de grande porte, consolidando a transição de sistemas convencionais para estações de tratamento orientadas à economia circular e à sustentabilidade energética.

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;
- Lucas Fonseca Sobral, Engenheiro do Departamento de Projetos de Tratamento;

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;
- Nayara Batista Borges.

Cambi:

- Davide Ferraro;
- Harald Kleiven;
- Julien Chauzy;
- Joelcio Saturnino;

Centrisys/CNP:

- Andreas Dünnebeil/Pondus
- Christian Raeder;
- Gerhard Forstner;
- Guilherme Gomes;
- Michael Kopper;

Haskoning:

- Adrian Jaques;
- Andre Visser;
- Dominik Krolik;
- Privan Applasawmy;
- Rodrigo Longo;
- Sergio Roberto Rodrigues Ribeiro

Huber

- Elaine Conchon;
- Renan Utri Andreguetto (Ex Gerente de Vendas da Huber)

Hydro-Thermal

- Daniel Frasson Costa;
- Heber Silva;

Veolia:

- Cedric Watrigant.
- Marcus Vallero;
- Michael Theodolou;
- Nicholas Bonkoski;
- Nicolas Capon;

ARA Consult:

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

Wawatech:

- Robert Zarzycki.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Saneamento*. Brasília, DF: ANA, [s.d.]. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/saneamento/>. Acesso em: 27 jul. 2026.
2. BARBER, W.P.F. Sludge Thermal Hydrolysis, Application and Potential. IWA Publishing, 2020. https://doi.org/10.2166/9781789060287
3. CENTRISYS, https://www.centrisys-cnp.com/equipment/sewage-sludge-thickener, acesso em 19/05/2026
4. 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.
5. EVANGELOU, M. Influence of operational conditions and sludge characteristics on anaerobic digestion process of a plug-flow system simulated using a number of complete-mix reactors in series. Delft University of Technology. Master Science Thesis, 2016.
6. GABLE, J.J. Technical, environmental and economic assessment of sludge thickening processes: a comparison of conventional thickening and energy-efficient centrifugal thickening technologies. University of Wisconsin. Master Science Thesis, 2014.
7. 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.
8. Mills, N.; Pearce, P.; Farrow, J.; Thorpe, R.B.; Kirkby, N.F. Environmental & economic life cycle assessment of current & future sewage sludge to energy technologies. Waste Management, Volume 34, 2014. http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.08.024.
9. RICHES, S.; OLIVER, B.; BROWN, C.; ALLEN, J. Delivery and performance of the Great Billing Advanced Digestion Plant as part of Anglian Water's AMP4 Biosolids Sub-Programme. Proceedings 15th European Biosolids and Organic Resources Conference, 2010.

10. VERSTRAETE, W.; VAN DE CAVEYE, P.; DIAMANTIS. Maximum use of resources presented in domestic "used water". Bioresource Technology. Volume 100, Issue 23, December 2009, Pages 5537-5545. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.047
11. THEODOULOU, M.; HARRISON, D.; BONKOSKI, N. MAKING ROOM FOR ENERGY NEUTRALITY. Proceedings. WEF Residuals and Biosolids Conference, 2017. DOI: 10.2175/193864717821496211.
12. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *Energy Efficiency for Water Utilities*. Washington, DC: U.S. EPA, 2026. Disponível em: <https://www.epa.gov/sustainable-water-infrastructure/energy-efficiency-water-utilities>. Acesso em: 27 jul. 2026.
13. U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA). International Energy Outlook 2021. Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2021. Disponível em: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/>. Acesso em: 27 jul. 2026.
14. Water Environment Federation/WEF. Operation of water resource recovery facilities, Manual of Practice - MOP nº 11, 7th Edition, 2017.
15. WERKER, A.; CARLSSON, M.; MORGAN-SAGASTUME, F.; SON LE, M.; HARRISON, D. FULL Scale demonstration and assessment of enzymic hydrolysis pre-treatment for mesophilic anaerobic digestion of municipal wastewater treatment sludge. Proceedings WEFTEC, 2007. DOI:10.2175/193864707787969504.